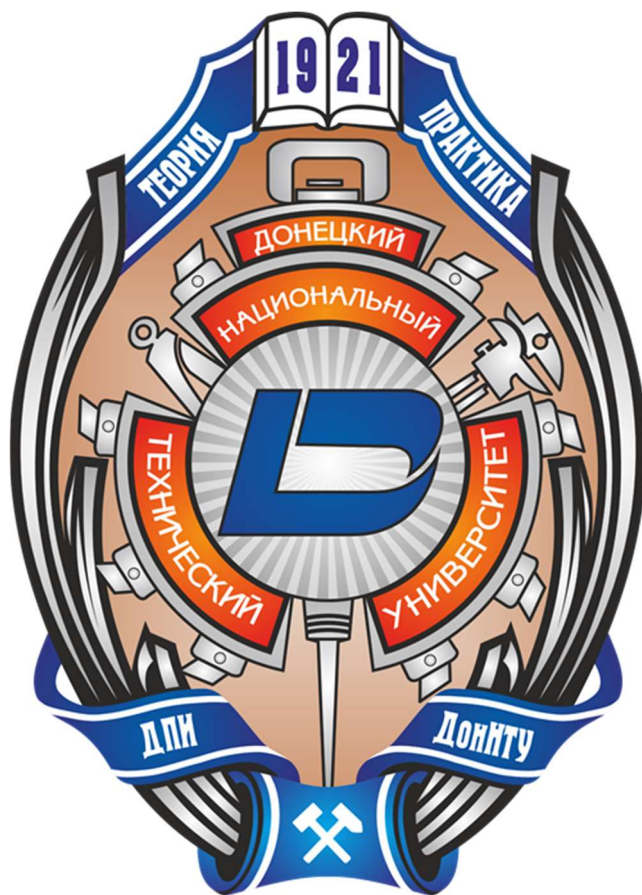


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**



**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА**

**3 (21)**

**Донецк – 2020**

УДК 004.3+004.9+004.2+51.7+519.6+519.7

**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА, № 3 (21), 2020,**  
Донецк, ДонНТУ.

Представлены материалы по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения в области информатики, кибернетики и вычислительной техники.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

**Главный редактор:** Павлыш В. Н., д.т.н., проф.

**Зам. глав. ред.:** Мальчева Р. В., к.т.н., доц.

**Ответственный секретарь:** Воронова А. И.

**Члены редакционной коллегии:** Аверин Г. В., д.т.н., проф.; Аноприенко А. Я., к.т.н., проф.;

Зинченко Ю. Е., к.т.н., доц.; Зори С. А., д.т.н., доц.; Карабчевский В. В., к.т.н., доц.;

Миненко А. С., д.ф-м.н., проф.; Привалов М. В., к.т.н., доц.; Скобцов Ю. А., д.т.н., проф.;

Федяев О. И., к.т.н., доц.; Шелепов В. Ю., д.ф-м.н., проф.

Рекомендовано к печати ученым советом ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки ДНР. Протокол № 3 от 11 сентября 2020 г.

Свидетельство о регистрации СМИ: серия ААА № 000145 от 20.06.2017.

Приказ МОН ДНР № 135 от 01.02.2019 о включении в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР.

Контактный адрес редакции

ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,

4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.

Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11

Эл. почта: infcyb.donntu@yandex.ru

Интернет: <http://infcyb.donntu.org>

© Донецкий национальный технический университет  
Министерство образования и науки ДНР, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика и вычислительная техника

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Практическое использование метода оптимизации структуры гетерогенной сети LTE с учетом минимизации энергопотребления</b><br><i>Дзюба А. В.</i> .....                                                      | 5  |
| <b>Разработка алгоритма реализации методов повышения качества регрессионных моделей, используемых при проектировании технических систем</b><br><i>Рычка О. В.</i> .....                                      | 13 |
| <b>Разработка компьютерной имитационной модели формообразования рабочей поверхности червячного колеса зуборезным инструментом с модифицированной производящей поверхностью</b><br><i>Рязанов С. А.</i> ..... | 20 |
| <b>Самоорганизация ТСП-трафика</b><br><i>Бельков Д. В., Лазебная Л. А.</i> .....                                                                                                                             | 29 |
| <b>Сглаживание и прогнозирование на основе трендовых моделей</b><br><i>Хоменко В. В., Орлов Ю. К.</i> .....                                                                                                  | 37 |
| <b>Специализированный процессор для выполнения операций над числами с плавающей запятой</b><br><i>Авксентьева О. А., Николаев Д. А.</i> .....                                                                | 47 |

### Компьютерные науки

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Коммутативные полугруппы с ограничениями на подпрямо неразложимые полигоны</b><br><i>Кожухов И. Б.</i> ..... | 57 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Инженерное образование

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Применение технологии воркшоп для повышения уровня динамических знаний будущих специалистов</b><br><i>Приходченко Е. И.</i> ..... | 62 |
| <i>Памяти Александра Степановича Миненко</i> .....                                                                                   | 66 |
| <b>Об авторах</b> .....                                                                                                              | 72 |
| <b><u>Требования к статьям, направляемым в редакцию научного журнала «Информатика и кибернетика»</u></b> .....                       | 73 |

# **Информатика и вычислительная техника**

## Практическое использование метода оптимизации структуры гетерогенной сети LTE с учетом минимизации энергопотребления

А. В. Дзюба

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[sevitch77@mail.ru](mailto:sevitch77@mail.ru)

### Аннотация

*Предложена схема развертывания гетерогенной сети сотовой связи LTE для центральной части крупного города. Определены возможные места расположения макро базовых станций и точек потенциального скопления абонентов. В результате решения задачи оптимизации найден вариант размещения макро и микро базовых станций, обеспечивающий полное покрытие и заданное качество обслуживания абонентов при минимальных капитальных затратах. Проанализированы энергозатраты полученной сети при различных сочетаниях методов выбора сот и способов оптимизации потребления энергии.*

### Введение

В настоящее время в мире наблюдается постоянный рост количества мобильных устройств и увеличение объема передаваемой между ними информации. В частности, в крупных городах регулярно возникают места массового скопления людей. Это приводит к резкому росту нагрузки на базовые станции, находящиеся вблизи от таких точек. Наиболее часто подобное происходит в центральной части города, вблизи торговых и развлекательных центров, транспортных узлов, мест проведения массовых мероприятий. Чтобы обеспечить качественное обслуживание абонентов в таких условиях, необходимо использовать гетерогенные сети сотовой связи LTE [1, 2].

Особенность организации гетерогенной сети LTE заключается в использовании в ее структуре сот разного типа. Обладающие более крупными размерами макросоты отвечают за глобальное покрытие, а покрывающие меньшую территорию микро-, пико- и фемтосоты дают возможность временно увеличивать емкость в точках периодического массового скопления людей. Подобные сети сложно структурированы, и эффективное управление ими возможно с использованием аналитических методов системного анализа [3, 4].

При развертывании гетерогенной сети LTE часто сталкиваются с проблемой высокого потребления электроэнергии оборудованием базовых станций. Важными составляющими ее решения являются предварительное планирование расположения макро и микро базовых станций с учетом особенностей местности, правильное определение метода выбора сот в зависимости от количества активных абонентов и эффективное управление энергопотреблением базовых станций в процессе эксплуатации [5].

### Анализ публикаций по проблеме исследования

Проблема энергопотребления в сотовых сетях и пути ее решения привлекают особое внимание последние пять лет. Большинство предлагаемых решений основаны на временном отключении части оборудования в периоды с сохранением заданного качества предоставляемых услуг [6, 7]. В качестве альтернативы предлагается и частичное отключение наименее востребованных услуг [8].

Развивая данное направление, в предыдущих работах автором разработана модель снижения энергопотребления в гетерогенной сотовой сети LTE с пошаговым диммированием базовых станций макросот [9]; исследованы методы выбора сот [10]; составлен критерий минимизации общего потребления энергии путем отключения микро базовых станций при отсутствии активных пользователей, и оптимизации мощности передачи макро базовых станций в соответствии с текущим числом пользователей макро базовых станций [11]; предложена методика планирования гетерогенной сети с учетом минимизации капитальных затрат на ее развертывание и уменьшения энергопотребления в процессе ее эксплуатации в дальнейшем [12].

### Цели и задачи исследования

Целью данной статьи является практическая оценка метода оптимизации расположения базовых станций в гетерогенной сети LTE для условий крупного города с различными зонами обслуживания с учетом применения разнообразных подходов по минимизации энергопотребления всей совокупностью базовых станций сети.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить места возможного развертывания базовых станций гетерогенной сети LTE в центральной части г. Донецк на основе разделения на зоны по типу сервиса;
- провести моделирование расположения макро и микро базовых станций гетерогенной сети LTE;
- решить задачу оптимизации энергопотребления гетерогенной сетью LTE симплекс-методом, используя выбранный критерий;

- проанализировать энергозатраты гетерогенной сети LTE при различных сочетаниях методов выбора сот и способов оптимизации потребления энергии

### **Развертывание гетерогенной сети LTE в условиях г. Донецк**

Рассмотрим территорию центральной части города Донецк площадью 36 км<sup>2</sup> или 9 км на 4 км, представленную на рис. 1.

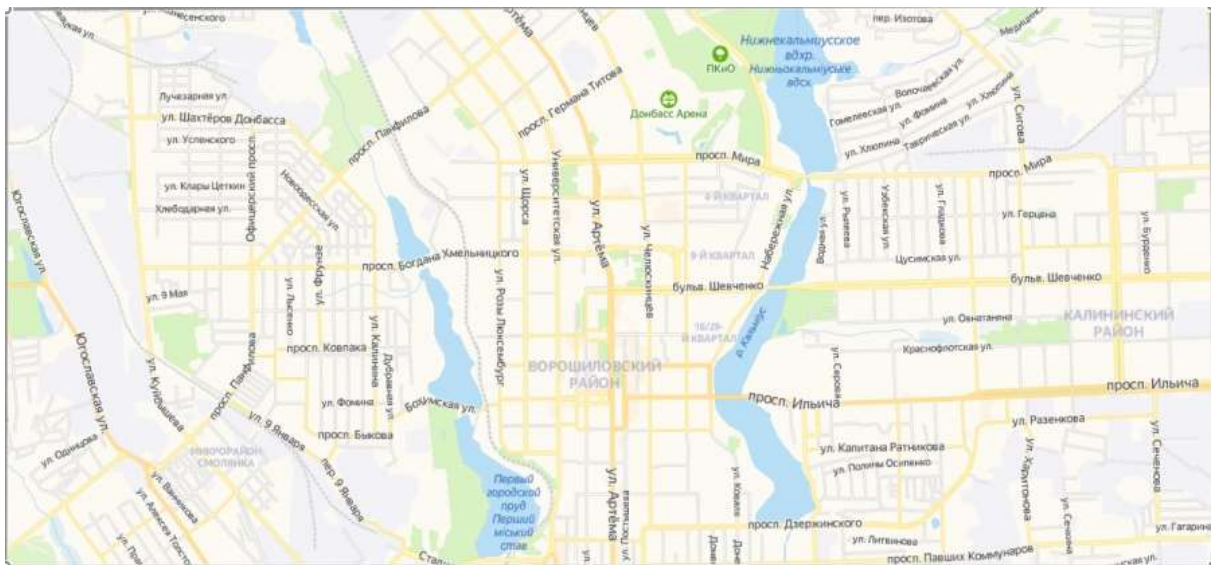


Рисунок 1 – Карта части города Донецка с предполагаемым местом развертывания гетерогенной сети

Определим пять типов зон по виду сервиса: нежилые, жилые, придорожные, развлекательные и деловые. Чтобы обеспечить полное покрытие территории разместим на ней 1 655 тестовых

точек, расположенных на расстоянии 150 м друг от друга. На рис. 2 каждый тип зоны обозначен соответствующим типом заполнения.

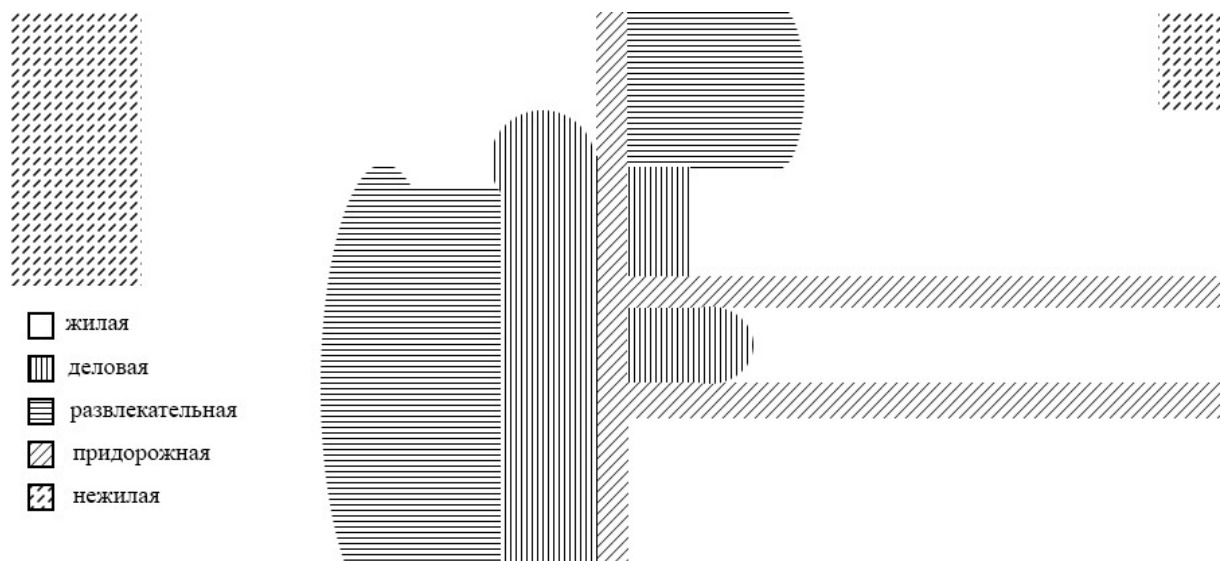


Рисунок 2 – Разделение района на зоны

На каждом квадратном километре возможны три варианта расположения макро базовой станции. Таким образом, всего возможных точек размещения макро базовых станций 108. Распределение базовых станций по

возможным местам развертывания выполнено в соответствии с особенностями рельефа и застройки местности отдельно по каждой оси координат. На рис. 3 представлено возможное расположение макро базовых станций.

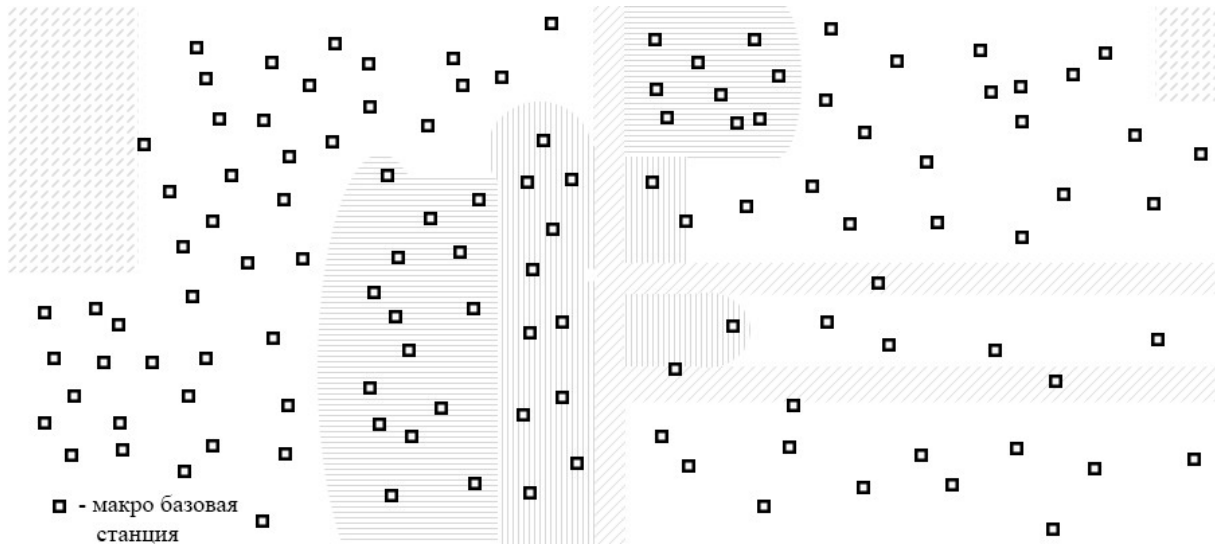


Рисунок 3 – Возможные места расположения макро базовых станций

Поскольку данные о трафике такой сотовой сети сложно получить, исходим из того, что на каждом квадратном километре будут находиться не более 200 абонентов, а каждая точка потенциального скопления абонентов генерирует дополнительно 10 % пользователей. При этом в зоне каждого типа находится различное количество таких точек из-за уникальных особенностей поведения абонентов в них. По данным IEEE плотность абонентов на квадратный километр от наиболее загруженных

зон к наименее загруженным соотносится как 4,5 : 2 : 1,5 : 1. Считаем, что наиболее загруженным будут деловые районы, а наименее — жилые, поскольку в них доступ в интернет осуществляется, через домашние беспроводные подключения. Таким образом, чтобы определить требования к трафику в районе каждого типа необходимо учитывать плотность и размер каждого из них. В табл. 1 представлена информация о всех типах зон.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика типов зон

|                                                                | Деловая | Развлекательная | Придорожная | Жилая | Нежилая |
|----------------------------------------------------------------|---------|-----------------|-------------|-------|---------|
| Количество тестовых точек                                      | 227     | 304             | 76          | 921   | 132     |
| Коэффициент дополнительных абонентов                           | 4,5     | 2               | 1,5         | 1     | 0       |
| Количество точек потенциального скопления абонентов на кв. км. | 9       | 4               | 3           | 2     | -       |
| Площадь                                                        | 5,91    | 6,54            | 1,73        | 20,45 | 1,37    |
| Общее количество точек потенциального скопления абонентов      | 42      | 22              | 5           | 42    | -       |

Используем тестовые точки в качестве возможных точек массового скопления абонентов и мест развертывания микро базовых станций. Микро базовые станции легче установить, и для них не требуется дополнительного пространства. Все тестовые точки в районе располагаются

согласно особенностям рельефа и застройки местности и характеристикам зон, приведенным в табл. 1. На рис. 4 показан вариант расположения точек массового скопления абонентов в зонах разного типа.

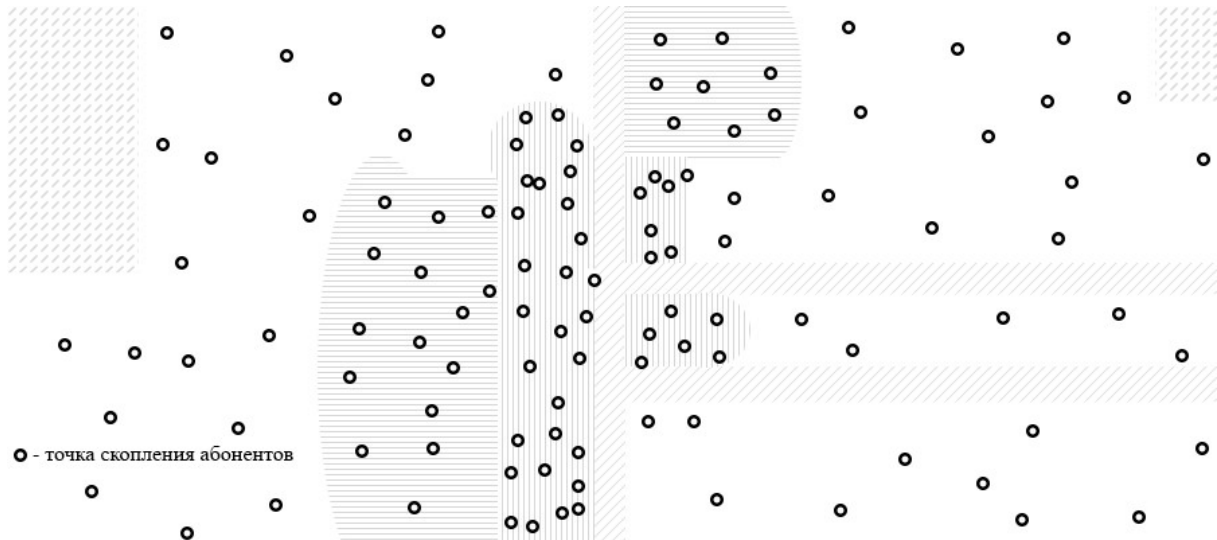


Рисунок 4 – Расположение точек массового скопления абонентов

Затем нормализуем средний уровень качества обслуживания в течение суток в процентах от максимального уровня в районе. Он представлен на рис. 5.

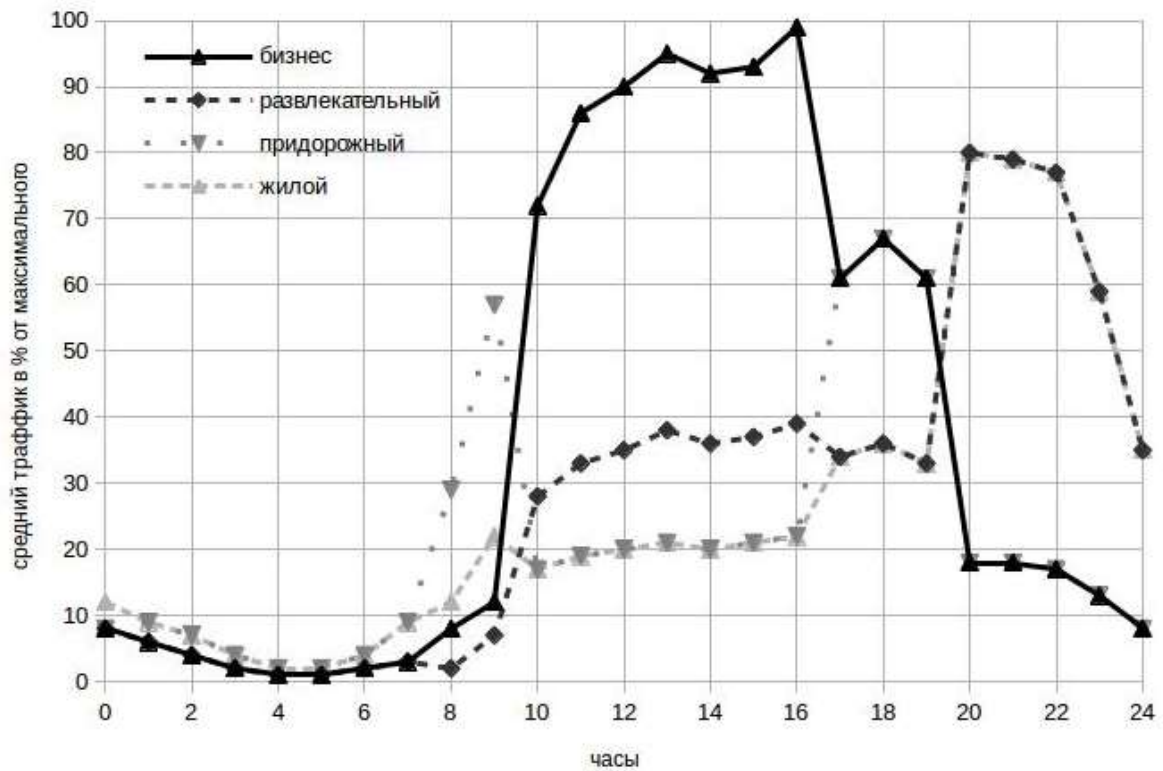


Рисунок 5 – Средний уровень качества обслуживания абонентов

Эти данные используем как исходные для моделирования количества абонентов каждый час.

### Результаты моделирования

Рассмотрим 10 вариантов расположения макро базовых станций. Считаем, что каждая из них покрывает территорию радиусом 1200 м. Решим задачу оптимизации, основанной на обеспечении полного покрытия соты, симплекс-методом:

при

$$\min \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} C_{k1}^{mac mbs},$$

$$\sum_{tb=1}^{N^{tt}} k3^{tt,mbs} k1^{mbs} \geq 1$$

$$L1^{tt,mbs} k3^{tt,mbs} k1^{mbs} \leq R^{mac}$$

$$k1^{mbs} \in \{0,1\}$$

$$k3^{tt,mbs} \in \{0,1\}$$

где  $C^{mac}$  – стоимость развертывания макро базовой станции;

$k1^{mbs} = 1$ , если макро базовая станция развернута в потенциальном месте расположения  $mbs$ ;

$k3^{tt,mbs} = 1$ , если тестовая точка  $tt$  находится в зоне покрытия макро базовой станции  $mbs$  и  $k3^{tt,mbs} = 0$  в противном случае;

$L1^{tt,mbs}$  – расстояние между потенциальным местоположением макро базовой

станции  $mbs$  и тестовой точкой  $tt$ ;

$N^{mbs}$  – количество возможных макро базовых станций;

$N^{tt}$  – количество тестовых точек;

$R^{mac}$  – радиус зоны покрытия макро базовой станции.

Получим, что 9 из 10 вариантов дают требуемый результат, покрывая всю территорию. 3 из них требуют развертывания наименьшего количества макро базовых станций – 20.

На рис. 6 представлен один из этих вариантов.

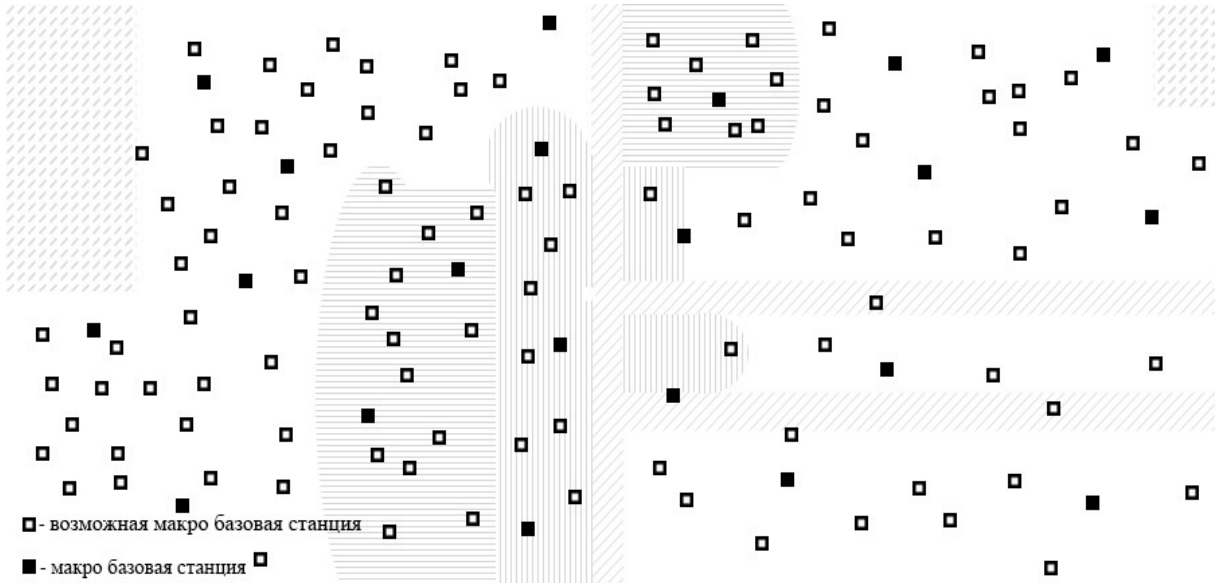


Рисунок 6 – Вариант развертывания макро базовых станций

Он является наиболее близким к реальности в заданных условиях по двум причинам. Во-первых, ни одна макро базовая станция не расположена в нежилой зоне. Во-вторых, существует несколько потенциальных мест развертывания в деловой зоне, где их найти труднее всего. Результат моделирования соответствует сценарию полного покрытия с точки зрения количества макро базовых станций.

После размещения макро базовых станций необходимо решить задачу оптимизации, основанную на качестве обслуживания, симплекс-методом:

$$\min \sum_{tt=1}^{N^{tt}} C^{mic} k2^{tt} + \sum_{mbs=1}^{N^{mbs}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c1 L1^{mbs,tt} k1^{mbs} k2^{tt} +$$

$$+ \sum_{ts=1}^{N^{ts}} \sum_{tt=1}^{N^{tt}} c2 L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt}$$

при

$$\sum_{ts=1}^{N^{ts}} k4^{ts,tt} k2^{tt} \geq 1$$

$$L2^{ts,tt} k4^{ts,tt} k2^{tt} \leq R^{mic}$$

$$k2^{tt} \in \{0,1\}$$

$$k4^{ts,tt} \in \{0,1\}$$

где  $C^{mic}$  – стоимость развертывания микро базовой станции;

$k2^{tt} = 1$ , если микро базовая станция развернута в тестовой точке  $tt$ ;

$k4^{ts,tt} = 1$ , если точка потенциального скопления абонентов  $ts$  находится в зоне покрытия микро базовой станции из тестовой точки  $tt$  и  $k4^{ts,tt} = 0$  в противном случае;

$L2^{ts,tt}$  – расстояние между местоположениями точки потенциального скопления абонентов и микро базовой станции;

$c1$  – стоимость транспортной сети между макро и микро базовыми станциями;

$c2$  – стоимость микро базовых станций, удаленных от точек скопления абонентов;

$N^{ts}$  – количество точек потенциального скопления абонентов;

$R^{mic}$  – радиус зоны покрытия микро базовой станции.

Радиус зоны покрытия микро базовой станции составляет 150 м. Сотовая сеть может обеспечивать лучшее качество обслуживания и потреблять меньше электроэнергии, если микро базовые станции расположены ближе к точкам

потенциального скопления абонентов. Т.о.,  $c1 = 1$  и  $c2 = 10$ . чтобы микро базовые станции были расположены вблизи от точек потенциального скопления абонентов, а операционные затраты и капитальные расходы стремились к минимуму. Результатом решения задачи оптимизации, основанной на качестве обслуживания являются 111 микро базовых станций.

На рис. 7 представлено расположение микро базовых станций и транспортной сети с соответствующими макро базовыми станциями.

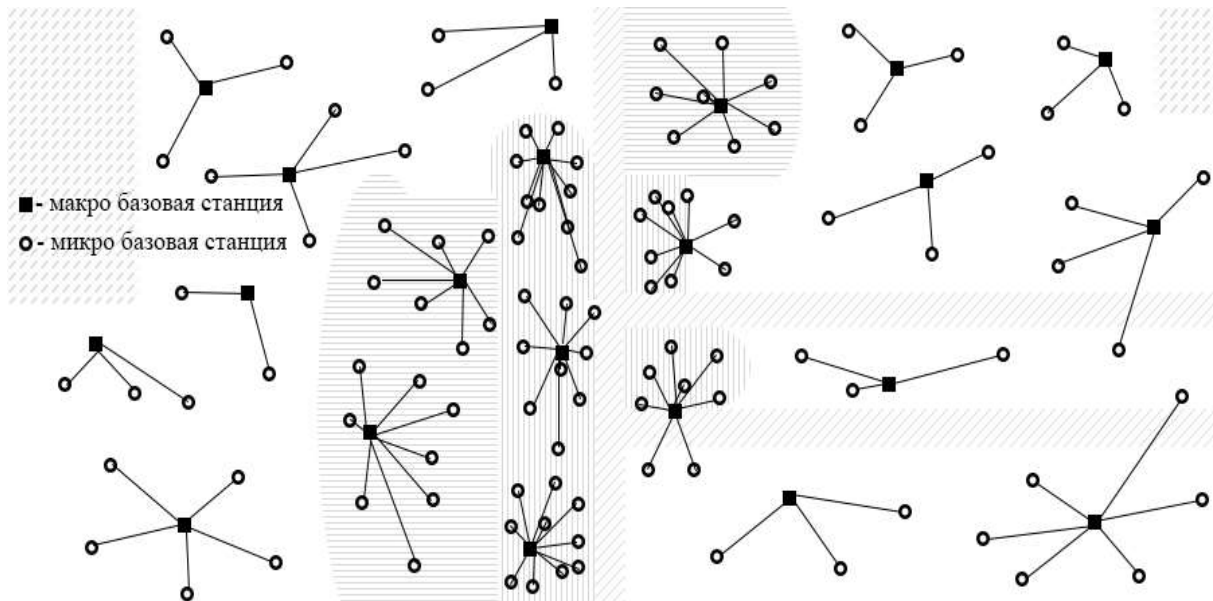


Рисунок 7 – Вариант развертывания гетерогенной сети LTE

Исходя из распределения базовых станций можно сделать вывод о том, что соты с макро и микро базовыми станциями могут давать более высокую энергоэффективность. Макро базовая станция и связанные с ней микро базовые станции ежеминутно обмениваются информацией по дополнительному протоколу. При использовании метода выбора сот по энергосбережению микро базовые станции включаются только по сигналу от соответствующей макро базовой станции.

### Анализ энергооптимизации

В предыдущих публикациях автора рассмотрены различные методы выбора сот и оптимизации энергосбережения в гетерогенных сотовых сетях LTE. Применим их сочетания к полученной сети.

Для моделирования используем расположение базовых станций на рис. 7. Сравним энергопотребление для трех различных

сочетаний. При этом количество пользователей, их расположение и запросы будут постоянными. Проанализируем общее энергосбережение для всей сети. При этом рассмотрим худший сценарий с точки зрения борьбы с помехами. Помехи будут создавать все остальные базовые станции при максимальной мощности передачи.

В табл. 2 представлены результаты оптимизации энергопотребления для трех вариантов управления сотовой сетью. Они отличаются методом выбора сот и способом оптимизации потребления энергии. В первом случае используются метод выбора сот на основе энергосбережения и оптимизация с пошаговым диммированием. Во втором случае метод выбора сот на основе SNR и оптимизация с пошаговым диммированием. В третьем случае метод выбора сот на основе SNR в сочетании с выключением базовых станций, в зоне обслуживания которых нет абонентов.

Таблица 2 – Сравнительные результаты оптимизации энергопотребления

| Вариант               | Энергосбережение и<br>пошаговое диммирование | SNR и<br>пошаговое диммирование | SNR и<br>выключение базовых<br>станций |
|-----------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|
| Всего                 | 74,38 %                                      | 89,75 %                         | 97,27 %                                |
| Макро базовые станции | 72,06 %                                      | 93,46 %                         | 100 %                                  |
| Микро базовые станции | 90,19 %                                      | 56,12 %                         | 88,09 %                                |

Согласно результатам моделирования использование метода выбора сот по энергосбережению в сочетании с пошаговым диммированием позволяет снизить энергозатраты в наибольшей мере до 74,38 % от общего потребления. Пошаговое диммирование снижает энергопотребление даже без использования метода выбора сот по энергосбережению. Это подтверждает эффективность модели оптимизации на основе пошагового диммирования. Наибольший расход энергии вызывает управление методом только включения и выключения базовых станций.

Существует два основных преимущества использования сочетания метода выбора сот по энергосбережению с пошаговым диммированием. Во-первых, выбор сот по энергосбережению приводит к тому, что больше абонентов обслуживаются микро базовыми станциями по сравнению с выбором сот по SNR. В результате снижаются энергозатраты макро базовой станции. Таким образом, первый вариант снижает в большей степени энергопотребление макро базовых станций, а второй – микро базовых станций. Это единственный случай, когда микро базовые станции потребляют больше энергии в относительном выражении, чем макро базовые станции. А поскольку энергозатраты макро базовых станций больше, то это ведет к уменьшению потребления энергии сотовой в целом. Во-вторых, этот вариант позволяет оптимизировать спектральные ресурсы базовых станций и мощность передачи сигнала ими в зависимости от запросов абонентов. Таким образом, удастся избежать потерь энергии при обслуживании абонентов.

## Выводы

В статье предложен вариант развертывания гетерогенной сети сотовой связи LTE в центральной части г. Донецка. Из возможных вариантов расположения макро базовых станций выбран тот, при котором их количество является минимальным для обеспечения полного покрытия территории. Для определения возможных мест расположения микро базовых станций выделены места потенциального массового скопления людей. В результате моделирования получен вариант расположения микро базовых станций, при котором они

находятся наиболее близко к точкам массового скопления людей. Решение задачи оптимизации энергопотребления полученной гетерогенной сетью LTE симплекс-методом с использованием выбранного критерия для различных вариантов сочетаний показало, что наилучшие результаты дает метод выбора сот на основе энергосбережения и оптимизация с пошаговым диммированием.

## Литература

1. Степутин, А. Н. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 томах. Том1 / А. Н. Степутин, А. Д. Николаев. –2-е изд. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 384 с. : ил.
2. Степутин, А. Н. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 томах. Том2 / А. Н. Степутин, А. Д. Николаев. –2-е изд. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 420 с. : ил.
3. Соколов, Н. Оценка параметров зоны обслуживания сети LTE. Часть 2 (Исправленная) / Н. Соколов [Электронный ресурс]. URL <http://omoled.ru/publications/view/737> (дата обращения: 04.12.2019).
4. Рыжков, А. Е. Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMax. [Текст] / А. Е. Рыжков, М. А. Сиверс, В. О. Воробьев, А. С. Слышков, Р. В. Шуньков - Санкт-Петербург: Линк, 2012. – 226 с.
5. Тихвинский, В. О. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура [Текст] / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук – Москва: Эко-Трендз, 2010.– 284 с.
6. Deruyck, M. Modelling and Optimization of Power Consumption in Wireless Access Networks / M. Deruyck, E. Tanghe, J. Wout, L. Martens. [Электронный ресурс]. URL <https://biblio.ugent.be/publication/2040174/file/2040183> (дата обращения: 04.12.2018).
7. Ambrosy, A. Dynamic Bandwidth Management for Energy Savings in Wireless Base Stations [Электронный ресурс] / A. Ambrosy, Wilhelm M., Wajda W., Blume O. // Globecom 2012, SessionSAC-GNCS8, Anaheim, Dec. 6th 2012. URL <https://pdfs.semanticscholar.org/698e/a8a8e4e3825c449a537be4fead1bf4703fc5.pdf> (дата обращения: 03.12.2019).

8. Boiardi, S. Radio planning and management of energy-efficient wireless access networks / S. Boiardi [Электронный ресурс]. URL [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/99707/1/2014\\_07\\_PhD\\_Boiardi.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/99707/1/2014_07_PhD_Boiardi.pdf) (дата обращения: 04.12.2019)

9. Дзюба, А. В. Задача оптимизации энергопотребления гетерогенной сетью LTE в условиях крупного города. / А. В. Дзюба, В. В. Червинский // Информатика и кибернетика, 2019 - №4 (18). – С. 57 -64.

10. Червинский, В. В. Исследование методов выбора сот для условия перспективной гетерогенной сети LTE г. Донецка / В. В. Червинский, А. В. Дзюба // Сборник

научных трудов ДонИЖТ. – Донецк: ДониЖТ, 2020. – Вып. 56. – С. 31-42.

11. Дзюба, А. В. Минимизация энергопотребления в гетерогенной сети LTE для условий крупного города / А. В. Дзюба // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. –Донецк : ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР. – 2020. –Вып. 1 (21). – С. 132-139.

12. Дзюба, А. В. Оптимизация расположения базовых станций в гетерогенных сетях сотовой связи LTE / А. В. Дзюба // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 55-59.

**Дзюба А. В. Практическое использование метода оптимизации структуры гетерогенной сети LTE с учетом минимизации энергопотребления.** Предложена схема развертывания гетерогенной сети сотовой связи LTE для центральной части крупного города. Определены возможные места расположения макро базовых станций и точек потенциального скопления абонентов. В результате решения задачи оптимизации найден вариант размещения макро и микро базовых станций, обеспечивающий полное покрытие и заданное качество обслуживания абонентов при минимальных капитальных затратах. Проанализированы энергозатраты полученной сети при различных сочетаниях методов выбора сот и способов оптимизации потребления энергии.

**Ключевые слова:** оптимизация, потребление энергии, гетерогенная сеть, базовая станция, покрытие

**Dziuba A. Practical application of the method for optimizing the structure of a heterogeneous LTE network, based on the minimization of energy consumption.** A scheme for the deployment of a heterogeneous cellular network LTE for the central part of a large city is proposed. Possible locations of macro base stations and points of potential congestion of subscribers have been determined. As a result of solving the optimization problem, an option of the placement of macro and micro base stations was found. This option provides full coverage and a given quality of service for subscribers with minimal capital expenditures. The energy consumption of the resulting network was analyzed for various combinations of methods for selecting cells and methods for optimizing energy consumption.

**Keywords:** optimization, energy consumption, criteria, heterogeneous network, base station, coverage

Статья поступила в редакцию 12.08.2020  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Разработка алгоритма реализации методов повышения качества регрессионных моделей, используемых при проектировании технических систем

О. В. Рычка

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[olga\\_rychka@mail.ru](mailto:olga_rychka@mail.ru)

### Аннотация

*В статье рассматриваются основные достоинства математического моделирования при проектировании технических систем. Описано построение регрессионных моделей, как одного из инструментов решения задач оптимизации на начальных этапах проектирования. Представлен алгоритм новых методов повышения качества регрессионных моделей, достигающегося за счет обнаружения и устранения грубых ошибок в исходных экспериментальных данных.*

### Введение

Математические методы широко используются в научных исследованиях, планировании, управлении и проектировании производства. Большую роль при разработке эффективной технологии автоматизированного проектирования играет математическое моделирование технических объектов. Использование математического моделирования для проектирования позволяет существенно уменьшить число испытаний, способствует созданию технических объектов высокого качества. Для решения задач оптимизации на начальных этапах проектирования часто используются регрессионные модели [1].

Правильный выбор модели и умение выбрать верное решение при создании систем автоматизированного проектирования (САПР) позволит сократить затраты материальных и временных ресурсов на проектирование. Поскольку при моделировании используется большое количество экспериментальных данных, среди них могут присутствовать ненадёжные измерения, вызванные человеческими ошибками или влиянием на систему различных внешних факторов. В этом случае, требуется предварительная обработка данных с целью выявления таких измерений.

На сегодняшний день в литературных источниках [2-6] описаны различные критерии для обнаружения грубых ошибок. Их основными достоинствами являются наглядность и простота понимания. Однако, данные критерии обладают рядом недостатков:

- поиск грубых ошибок осуществляется методом перебора, из-за чего при больших объемах исходных статистических данных возрастает трудоёмкость;
- возможность пропустить аномальные значения при исследовании выборки;

– отсутствие программной реализации существующих методов.

Частным, но важным случаем регрессионных моделей, имеющим большую область применения, являются линейные регрессионные модели, что делает актуальным задачу разработки моделей такого класса, лишенных названных недостатков. Выбор таких моделей был обусловлен тем, что они являются наиболее распространенными уравнениями зависимости между переменными, а найденное линейное уравнение может быть начальной точкой дальнейшего построения более сложных аналитических моделей. Помимо этого, на основе линейных моделей построено множество сложных методов машинного обучения, в том числе, и нейронные сети. Также, использование парных линейных регрессионных моделей встречается в различных областях науки.

Ранее автором в [7] и [8] были предложены новые методы для повышения качества линейных регрессионных моделей, за счет обнаружения и устранения грубых ошибок.

### Цель статьи

Целью данной работы является описание разработки, структурирования и наглядного представления алгоритмов предлагаемых методов повышения качества линейных регрессионных моделей для дальнейшей реализации в виде программного приложения, что позволит сократить время выполнения производимых расчётов.

### Виды экспериментов

В связи с тем, что изучение всего механизма технологического процесса является сложной, а иногда и невозможной задачей, появляется необходимость разработки моделей с использованием статистических методов, с

помощью которых исследуется зависимость отклика системы на изменения входных параметров. Построение таких зависимостей, основывается на формализованном описании экспериментальных данных [9]. Поэтому эксперимент является важной частью исследования.

Существует четыре типа экспериментов:

- пассивный;
- активный;
- натурный;
- модальный.

Пассивный эксперимент – эксперимент при котором значения факторов принимают случайные значения, сбор данных осуществляется при эксплуатации объекта, а последующее установление связей между факторами происходит методами корреляционного и регрессионного анализа.

Преимущества пассивных экспериментов:

- исследования проводятся на существующих объектах;
- финансовые затраты минимальны, поскольку не требуется создание экспериментальной установки.

Недостатки:

- проводится большое количество опытов;
- сложная математическая обработка;
- плохие статистические свойства;
- вид уравнения регрессии определяется по характеру изменения переменных на графике линии регрессии.

Активный эксперимент – эксперимент, который проводится согласно заранее составленному плану, а значения факторов, задаётся исследователем.

Преимущества таких экспериментов, по сравнению с пассивными:

- сокращение числа опытов;
- отсутствие проблем выбора вида экспериментальных статистических методов;
- возможность определения оптимальных параметров;
- более простая математическая обработка результатов;
- более лучшие статистические свойства математических моделей.

Натурный эксперимент проводится без использования модели непосредственно на техническом объекте.

Модельный эксперимент проводится на модели, описывающей сам объект.

Преимущества модельных экспериментов, по сравнению с натурными:

- меньше затраты материальных и временных ресурсов;
- возможность воспроизведения условий эксперимента;

– возможность быстрого прерывания эксперимента, для промежуточного анализа результатов и корректировки исходных данных, в случае необходимости;

– возможность восстановления и продолжения эксперимента, после его прерывания.

### Используемая модель

Для функционального проектирования технических систем часто применяются экспериментальные факторные математические модели, которые также называют регрессионными моделями. Такие модели отражают зависимости выходных параметров от внешних и внутренних параметров объекта проектирования.

При построении экспериментальной факторной модели объект моделирования представляет собой «чёрный ящик» входами которого являются контролируемые и управляемые переменные  $\vec{X}$  и контролируемые, но неуправляемые  $\vec{Z}$ , а выходом –  $\vec{Y}$ . Помимо описанных, на объект влияют и неконтролируемые переменные  $\vec{E}$  (рис. 1) [1].



Рисунок 1 – Экспериментальная факторная модель

При регрессионном анализе факторы  $\vec{X}$  и  $\vec{Z}$  не различаются, поэтому обозначаются одной буквой  $\vec{X}$ .

Особенности регрессионных моделей:

- представляют собой достаточно простые функциональные зависимости между факторами;
- единообразие анализа и проектирования;
- описывают поведение объекта, характеризуя его неслучайные свойства.

### Системы CAE

Одним из современных инструментов в рамках современных САПР, предназначенных для осуществления вычислительных экспериментов при решении разнообразных проектных и исследовательских задач в различных технических областях являются системы CAE (Computer-Aided Engineering). Назначение CAE – инженерные расчёты, анализ,

моделирование и оптимизация различных процессов в системе.

Компьютерные инструменты САЕ могут быть использованы не только в прикладных исследованиях, но и в научных, например, для выявления новых закономерностей и дальнейшего прогнозирования поведения (например, при разработке новых материалов или нанотехнологий).

Для того, чтобы полученные результаты максимально соответствовали реальному поведению проектируемого изделия, необходимо чтобы экспериментальные данные были надёжными. С этой целью, данные, которые используются для построения математической (в частности, регрессионной) модели необходимо предварительно проанализировать для выявления грубых ошибок.

### Типы погрешностей

Поскольку при проведении экспериментов могут возникать различные ошибки в данных, можно выделить следующие виды погрешностей:

- систематические погрешности;
- случайные погрешности;
- субъективные погрешности [10].

Систематические погрешности могут возникать в результате неисправности средств измерения или воздействий внешней среды.

Случайные погрешности представляют собой грубые ошибки или промахи, которые могут быть вызваны ошибками исследователя.

Субъективные погрешности вызываются психофизическими или психологическими причинами.

В связи с возникновением различных погрешностей при проведении экспериментов, данные следует проверять на наличие грубых отклонений.

### Краткое описание методов для нахождения и корректировки исходных экспериментальных данных

Для того, чтобы определить данные, которые представляют собой грубые ошибки, необходимо определить область надёжности, в которую не попадают такие значения. Для регрессионных моделей вида [11]:

$$\hat{Y} = aX_i + b, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты модели.

Данная область представляет собой прямоугольник со сторонами  $2k \cdot \sigma_e$  и  $2k \cdot \sigma'_e$ , в котором значение  $k$  можно определить из формулы:

$$P_0 = 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^k e^{-t^2/2} dt, \quad (2)$$

используя таблицу значений Лапласа.

Среднеквадратические отклонения невязок  $\sigma_e$  и  $\sigma'_e$  определяются по формулам:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - (a \cdot X_i + b))^2}{n-2}}; \quad (3)$$

$$\sigma'_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - (a' \cdot X_i + b'))^2}{n-2}}; \quad (4)$$

где  $a'$  и  $b'$  – коэффициенты перпендикуляра, построенного к исходному уравнению.

Графически данный метод можно представить в виде рис. 2.

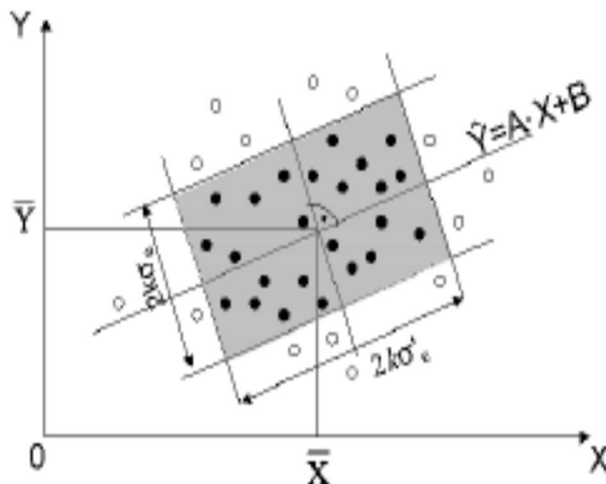


Рисунок 2 – График метода повышения качества модели

Разница между двумя методами заключается в том, что в первом методе данные,

которые не попали в область надёжности, исключаются из дальнейшего анализа и новая

регрессионная модель строится без них, а во втором – значения этих данных изменяются так, чтобы они попали в заданную область.

Для оценки эффективности рассматриваемых методов используются следующие критерии.

Коэффициент детерминации  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (5)$$

где  $\bar{Y}$  – математическое ожидание случайной величины  $Y_i$ .

Модуль величины смещения результата прогноза:

$$\Delta_{\text{прогн}} = |(a \cdot X_{\text{прогн}} + b) - (a_n \cdot X_{\text{прогн}} + b_n)|, \quad (6)$$

где  $(a \cdot X_{\text{прогн}} + b)$  – линейное регрессионное уравнение, построенное по исходным данным;

$(a_n \cdot X_{\text{прогн}} + b_n)$  – линейное регрессионное уравнение после отбрасывания части исходных данных.

Доверительный интервал прогнозных значений  $Y_{\text{прогн}}$ .

Точность, которая рассчитывается по формуле:

$$T = R^2 \cdot \frac{m}{n}, \quad (7)$$

где  $n$  – количество исходных данных;

$m$  – количество данных оставшихся после отбрасывания.

При этом наилучшим вариантом, считается вариант, при котором величина коэффициента детерминации  $R^2$  является максимальной, при обязательном условии, что  $T \geq 0,5$ .

### Алгоритм реализации методов

Программное приложение разрабатывается с целью сокращения трудоёмкости вычислений и для удобства и скорости применения предлагаемых методов.

При разработке приложения были учтены следующие требования:

- максимальная доступность и понятность для пользователя;
- небольшой размер;

- полная реализация математического аппарата, используемого для работы предложенных методов;

- возможность ввода произвольного количества исходных статистических данных;

- возможность графического представления данных и найденных областей надёжности;

- результаты работы программного приложения, должны быть наглядны и способствовать принятию верного решения при выборе конечной регрессионной модели, на основании которой, будут строиться дальнейшие прогнозы;

- должна иметься возможность просмотра промежуточных результатов расчетов, для проведения, при необходимости, дополнительного анализа.

Т. о., разрабатываемое приложение должно позволять человеку без дополнительной подготовки, использовать его для анализа и выдавать результаты, которые позволят максимально быстро и верно принять решение.

В результате учёта всех требований был получен комплекс программ, который представляет собой набор программных модулей, представленных макросами, написанными с использованием языка программирования Visual Basic for Applications for Microsoft Excel, поскольку при необходимости автоматизировать обработку данных в MS Excel, данный язык является наиболее удобным.

Комплекс программ состоит из следующих модулей:

- программный модуль для обнаружения и удаления аномальных данных;

- программный модуль для обнаружения и корректировки выбросов;

- программный модуль для графического отображения обнаруженных аномальных данных;

- модули для реализации модификаций методов.

Модули содержат 8 логических блоков:

- управление;
- ввод исходных данных;
- контроль введенных данных;
- сортировка данных;
- расчет всех необходимых показателей;
- вывод результатов;
- графическое отображение;
- очищение или сохранение данных.

Взаимосвязь данных блоков можно представить в виде рис. 3.



Рисунок 3 – Связь логических блоков приложения

В блоке «Управление» пользователем производится работа с приложением: запуск других блоков на выполнение, редактирование введенных данных, в случае ошибок в формате ввода.

Второй блок – «Ввод исходных данных» отвечает за ввод данных в программу. Это можно сделать вручную или скопировав и вставив из стороннего файла. Этот блок связан непосредственно с блоком «Управление» и «Контроль введенных данных». После того, как данные введены в блоке «Управление» вызывается работа приложения (по нажатию на кнопку), где первым делом осуществляется автоматическая проверка корректности введенных данных. Если в введенных данных обнаружена ошибка, например, точка вместо запятой в качестве десятичного разделителя, или буква вместо цифры, на экран выдается соответствующее сообщение об ошибке и предлагается повторить ввод. После исправления ошибок пользователь может вновь запустить работу приложения.

Работа блока «Сортировка исходных данных» заключается в сортировке исходных

экспериментальных данных по возрастанию, по независимой переменной  $X$ . Далее производится вычисление всех требуемых показателей и вывод полученных результатов.

После получения всех результатов, пользователь, для наглядности, может просмотреть области надёжности и данные, которые не попали в эти области на соответствующих графиках, путём нажатия соответствующей кнопки.

По окончании работы приложения, пользователь может сохранить полученные результаты и/или очистить все заполненные поля. За это отвечает соответствующий блок.

Алгоритм работы описанного приложения можно наглядно представить на UML диаграмме активности (рис. 4). На диаграмме отображается взаимодействие между двумя объектами – пользователем и приложением, а также последовательность выполнения всех необходимых действий.

Основываясь на алгоритме, описанном в данной диаграмме было разработано программное приложение.



Все описанные выше достоинства позволяют сократить трудоёмкость проводимых испытаний, что в свою очередь приводит к существенному сокращению временных и материальных затрат на проектирование.

Также в статье описано построение регрессионных моделей, как одного из инструментов решения задач оптимизации на начальных этапах проектирования.

Поскольку математические модели строятся на основе экспериментальных данных очень важно, чтобы такие данные были надёжными. Поэтому в статье представлен алгоритм новых методов повышения качества регрессионных моделей, достигающегося за счет обнаружения и устранения грубых ошибок в исходных экспериментальных данных. Основные достоинства, рассматриваемых методов, по сравнению с уже существующими являются: простота понимания; возможность обнаружить несколько выбросов одновременно; обнаруживать выбросы, как по независимой переменной  $X$ , так и по зависимой  $Y$ ; повышение качества модели; хорошая формализуемость.

### Литература

1. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем. — Минск: Новое знание, 2013. — 584 с.
2. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 813 с.
3. Дрейпер, Н. Р., Смит, Г. Прикладной регрессионный анализ. 4-е изд.: Пер. с англ. — М.: Диалектика, 2017. — 911 с.
4. Величко, Е. Н. Экспериментальные методы исследования: основы теории эксперимента: [учебное пособие] — СПб.: Издательство Политехнического университета, 2015. - 116 с.
5. Моргунов, А. П., Ревина, И. В. Планирование и анализ результатов эксперимента: [учебное пособие] - Минобрнауки России, Омский гос. техн. ун-т. - Омск: Издательство ОмГТУ, 2014. - 347 с.
6. Кириченко, А. В. (и др.) Математические модели и методы анализа и прогнозирования: предварительная обработка результатов эксперимента, проверка статистических гипотез, корреляционный анализ, парный регрессионный анализ: учебное пособие - Саратов: КУБиК, 2019. - 259 с.
7. Рычка, О. В. Улучшение прогнозных значений с использованием метода отбрасывания данных // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2018): сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, Том. 1. 14-18 ноября 2018 г. — Донецк, ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2018. — 308 с.
8. Рычка, О. Новые методы повышения точности прогнозных регрессионных моделей. — Монография, LAP Lambert Academic Publishing — 61 с., 2014.
9. Евдокимов, А. Н., Курзин, А. В. Моделирование химико-технологических процессов (экспериментально-статистические модели): учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. — СПб. 2018. — 106 с.
10. Федоткин, И. М. Математическое моделирование технологических процессов- М.: Ленанд, 2015. - 416 с.
11. Круценюк, К. Ю. Корреляционно-регрессионный анализ в эконометрических моделях: учебное пособие - Норильск: НГИИ, 2018. - 108 с.

**Рычка О. В.** Разработка алгоритма реализации методов повышения качества регрессионных моделей, используемых при проектировании технических систем. В статье рассматриваются основные достоинства математического моделирования при проектировании технических систем. Описано построение регрессионных моделей, как одного из инструментов решения задач оптимизации на начальных этапах проектирования. Представлен алгоритм новых методов повышения качества регрессионных моделей, достигающегося за счет обнаружения и устранения грубых ошибок в исходных экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, регрессионная модель, система автоматизированного проектирования, CAE, грубые ошибки, алгоритм.

**Rychka O.** Development of algorithm for implementation of methods to improve the quality of regression models used in design of technical systems. The article discusses the main advantages of mathematical modeling in the design of technical systems. The article describes the construction of regression models as one of the tools for solving optimization problems at the initial stages of design. An algorithm of new methods for improving the quality of regression models, achieved by detecting and eliminating gross errors in the initial experimental data, is presented.

**Keywords:** mathematical modeling, regression model, computer-aided design system, CAE, gross errors, algorithm.

Статья поступила в редакцию 23.05.2020  
Рекомендована к публикации профессором Зори С. А.

УДК 621.9.04:004.94

## **Разработка компьютерной имитационной модели формообразования рабочей поверхности червячного колеса зуборезным инструментом с модифицированной производящей поверхностью**

С. А. Рязанов

Саратовский государственный технический университет, г. Саратов

[despro@mail.ru](mailto:despro@mail.ru)

### **Аннотация**

*В статье приведен анализ существующих методов получения рабочей поверхности зуборезного инструмента и описано создание геометрической модели процесса формообразования рабочих поверхностей элементов червячного зацепления. Применение описанного алгоритма формообразования дает возможность, не изготавливая передачу в материале для выполнения ее промежуточного контроля, получать достоверную информацию обо всех особенностях ее работы. Описано применение методов геометрического моделирования для виртуализации процесса формообразования и контроля рабочих поверхностей червяков и червячных колес, что в современных условиях зубообрабатывающего производства с широкой номенклатурой выпускаемой продукции позволяет выполнять постоянное ее обновление и модификацию: от изготовления единичных экземпляров зубчатых передач до их серийного или массового производства.*

### **Введение**

Винтовые пространственные зубчатые передачи, червячные с цилиндрическим червяком, глобоидные и спироидные передачи, широко применяются в большинстве современных машиностроительных изделиях [1–3]. Цилиндрические червячные передачи активно используются при создании металлообрабатывающего оборудования (нажимные механизмы прокатных станов, прессы и т. д.), в подъемно-транспортных машинах, в приводах и кинематических цепях различного станочного оборудования там, где требуется высокая кинематическая точность (делительные устройства станков, механизмы наладки) и т. д.

### **Цель статьи**

В настоящее время в связи с внедрением в производство ЭВМ появилась возможность пересмотреть существующие методы расчета параметров зубчатых передач и наладок зубообрабатывающих станков, а именно, заменить приближенные, графические и графоаналитические методы расчета контактирующих поверхностей элементов червячной передачи более точными методами трехмерного компьютерного прототипирования [4–6]; создать алгоритмы и методы сокращения трудоемкости расчетов, увеличить их точность и минимизировать наладочные работы при проектировании, и изготовления цилиндрических червячных передач.

### **Основная часть**

Технические сложные поверхности, применяемые в машиностроении, в такой области как зубообработка, получаются путем относительного пространственного взаимного движения и взаимодействия между инструментом и заготовкой. При этом инструмент является производящим элементом, который при пространственном движении и взаимодействии с заготовкой, формообразует на ней необходимую поверхность. При компьютерном моделировании технологического процесса формообразования в качестве результирующей модели получаемой поверхности может выступать огибающая поверхность (червячная, гипоидная и т. д. передачи), которая проходит через все линии касания. Т. к. на компьютере отсутствует механизм, позволяющий реализовать точную кинематическую связь оборудования станка, пространственное перемещение происходит дискретно, но с необходимой точностью. Достаточной для точного воспроизведения технологического процесса формообразования элементов червячного зацепления. Это приводит к получению поверхности формообразованной дискретным перемещением производящей поверхности [7–10]. Применительно к червячным парам можно говорить о формировании поверхности червяка (или червячной фрезы) путем взаимодействия его заготовки и дисковой фрезы, а для червячного цилиндрического колеса – взаимодействие его заготовки и червячной фрезы [11–13].

Применение методов геометрического моделирования для имитации процесса

формообразования рабочей поверхности основан на относительном движении взаимопересекающихся объектов в виде системы «заготовка – инструмент». Это позволяет получать необходимую геометрическую модель, точно воспроизводящую геометрическую конфигурацию поверхностей зубьев пространственных зубчатых передач. Сочетание инструмента – дисковая фреза и цилиндрической заготовки фрезы – позволяет получить модель червячной фрезы; инструмента – червячная фреза и заготовки цилиндрического колеса дает возможность получить модель колеса передачи. Рабочая поверхность червячного колеса должна быть образована производящей поверхностью, которая должна быть идентична рабочей поверхности витков червяка. Такое утверждение позволяет использовать модель червячной фрезы,

как модель сопряженного цилиндрического червяка [14–18].

Производящие поверхности ( $\Pi_{ик}$ ) этих инструментов представляют собой поверхности вращения или винтовые поверхности, образованные соответствующим движением заданного профиля осевого сечения ( $\Pi_o$ ) вдоль и/или вокруг соответствующих им осей инструмента (рис. 1). На этом рисунке показан обобщенный алгоритм образования производящей поверхности инструмента, основанный на использовании исходного прямолинейного или модифицированного осевого сечения этой поверхности, индекс «i» соответствует текущему положению координатных осей [19–21].

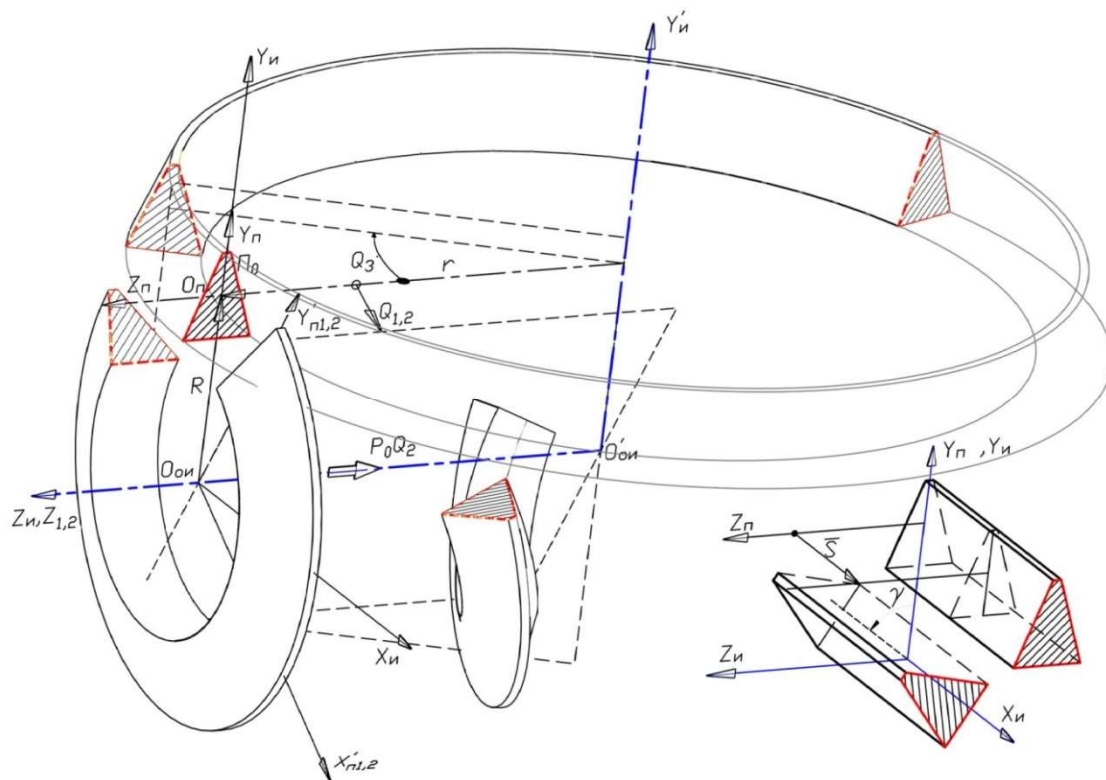


Рисунок 1 – Геометрическая модель образования обобщенной производящей поверхности

Данная схема позволяет получить различные виды зуборезных инструментов, используя сечение производящей поверхности [22–23]. Координаты точек принадлежащих производящей поверхности инструмента  $\bar{R}_m^{(Su)}$  удобно описывать в векторно-матричной форме:

$$\bar{R}_m^{(Su)} = H_{S_{ou}S_{o\Pi}} \times \bar{R}_m^{(So\Pi)}, \quad (1)$$

где  $\bar{R}_m^{(So\Pi)}$  – радиус-вектор осевого профиля производящей поверхности в подвижной системе координат  $S_{o\Pi} (O_{\Pi} x_{\Pi} y_{\Pi} z_{\Pi})$ .

Для осевого профиля  $\Pi_o$  (рис. 1) радиус-вектор  $\bar{R}_m^{(So\Pi)}$  удобно описывать в векторно-матричной форме:

$$\bar{R}_m^{(So\Pi)} = [x_m \ y_m \ z_m \ 1]^T,$$

где  $x_m, y_m, z_m$  – координаты точки, принадлежащей сечению производящей поверхности инструмента;

$H_{S_{ou}S_{oII}}$  – блочная матрица, выражающая взаимное движение системы  $S_{oII}$ , связанной с осевым профилем производящей поверхности (инструмента), относительно системы  $S_{ou}$  задающей ось инструмента.

Блочная матрица  $H_{S_{ou}S_{oII}}$  является матрицей преобразования координат, при этом задает поворот подвижной системы координат  $S_{oII} (O_{II}x_{II}y_{II}z_{II})$  осевого профиля  $\Pi_O$  и имеет размерность  $4 \times 4$ . Для обобщения записи этой матрицы преобразования поворота для различных видов зуборезного инструмента ее удобно представить в виде матричного выражения:

$$H_{S_{ou}S_{oII}} = \begin{vmatrix} A_{S_{ou}S_{oII}} & r_{oII}^{(s_{ou})} \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где  $r_{oII}^{(s_{ou})}$  – радиус-вектор сформированной производящей поверхности в системе координат  $S_{ou} (O_{ou}x_uy_uz_u)$ ;

$A_{S_{ou}S_{oII}}$  – матрица поворота размерностью  $3 \times 3$ .

Наполнение матрицы  $H_{S_{ou}S_{oII}}$  соответствует выбранному типу зуборезного инструмента. Для аналитического описания сечения производящей поверхности инструмента необходимо определить координаты вершин ее исходного прямолинейного профиля.

Для описания координат точек, принадлежащих производящей поверхности инструмента «червячная фреза» [24–25], в матричном выражении (2) необходимо задать следующие параметры:

$$A_{S_{ou}S_{oII}} = \begin{vmatrix} \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & 0 \\ -\sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

$$r_{oII}^{(s_{ou})} = \begin{bmatrix} R \cdot \sin(\theta_2) \\ R \cdot \cos(\theta_2) \\ -p_0 \cdot \theta_2 \end{bmatrix}^T = \quad (4)$$

где  $R$  – радиус делительной окружности инструмента «червячная фреза»;

$p_0$  – параметр движения осевого профиля вдоль оси вращения  $Z_2$ .

Подставляя значения блочной матрицы  $A_{S_{ou}S_{oII}}$  (3) и вектора  $r_{oII}^{(s_{ou})}$  (4) в формулу (2), получим окончательный вид матрицы, описывающей поворот радиус-вектора формообразующей поверхности профиля инструмента, в системе координат инструмента:

$$\bar{R}_m^{(Su)} = \begin{vmatrix} \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & 0 & R \cdot \sin(\theta_2) \\ -\sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & R \cdot \cos(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & -p_0 \cdot \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \bar{R}_m^{(SoII)},$$

где  $\bar{R}_m^{(SoII)}$  – радиус-вектор осевого профиля производящей поверхности в подвижной системе координат  $S_{oII} (O_{II}x_{II}y_{II}z_{II})$ ;

$\theta_2$  – угол поворота радиус-вектора  $\bar{R}_m^{(SoII)}$ .

Выполнив умножение матриц [26–28], получаем систему уравнений, которая описывает преобразование координат осевого профиля производящей поверхности из системы координат  $S_{oII} (O_{II}x_{II}y_{II}z_{II})$  в систему координат инструмента «червячная фреза» ( $X_2Y_2Z_2$ ) в координатной форме:

$$\begin{cases} R_{mX}^{(Su)} = x_m \cdot \cos(\theta_2) + \\ \quad + y_m \cdot \sin(\theta_2) + R \cdot \sin(\theta_2) \\ R_{mY}^{(Su)} = -x_m \cdot \sin(\theta_2) + \\ \quad + y_m \cdot \cos(\theta_2) + R \cdot \cos(\theta_2) \\ R_{mZ}^{(Su)} = z_m - p_0 \cdot \theta_2 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $R_{mX}^{(Su)}, R_{mY}^{(Su)}, R_{mZ}^{(Su)}$  – координаты точки принадлежащей производящей поверхности, заданную радиус-вектором  $\bar{R}_m^{(SoII)}$  в системе координат инструмента;

$x_m, y_m, z_m$  – координаты точек осевого профиля производящей поверхности заданные в системе координат  $S_{oII} (O_{II}x_{II}y_{II}z_{II})$ .

Система уравнений (5) позволяет рассчитать и получить положение точек принадлежащих производящей поверхности, являющейся эквивалентной производящей поверхности зуборезного инструмента «червячная фреза» в соответствии с алгоритмом представленным на рис. 2, в виде модели зуборезного инструмента «червячная фреза» [29–31] (рис. 3).

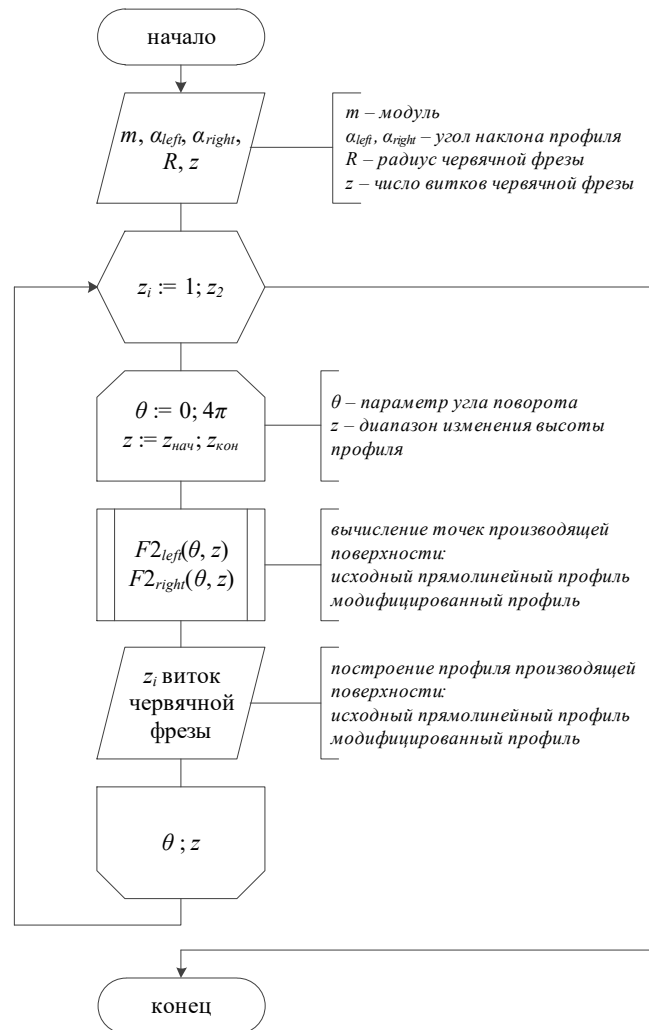


Рисунок 2 – Алгоритм получения рабочей поверхности червячной фрезы

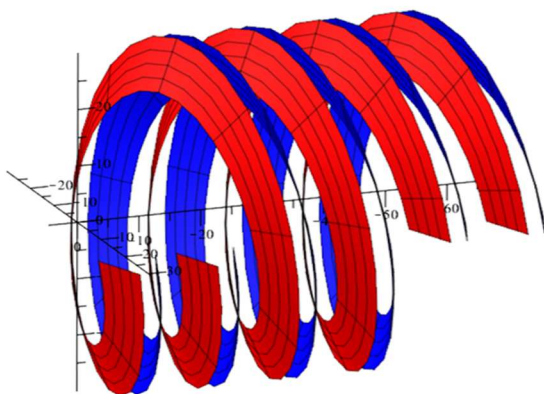


Рисунок 3 – Модель производящей поверхности зуборезного инструмента «червячная фреза»

Для получения модифицированной производящей поверхности необходимо выполнить изменение исходного (линейного) профиля сечения производящей поверхности, т. е. получить модифицированный осевой профиль производящей поверхности  $P_o$ :

$$\begin{cases} R_{mX}^{(Su)} = 0 \\ R_{mY}^{(Su)} = \mu \cdot z^2 \cdot \cos(\theta_x) - z \cdot \sin(\theta_x) \\ R_{mY}^{(Su)} = \mu \cdot z^2 \cdot \sin(\theta_x) + z \cos(\theta_x) + \Delta z \end{cases} \quad (6)$$

Выполняя расчеты координат точек модифицированного профиля по формулам (6) на заданном интервале, происходит формирование набора точек для левого и правого профилей модифицированной производящей поверхности:

для левого профиля:

[1,270448002; 0,813086721; 0,457361281;  
0,2032716808; 0,0508179208; 0; 0,0460253325;  
0,1841013326; 0,4142279992; 0,736405334;  
1,150633335];

для правого профиля:

[1,270448002; 0,813086721; 0,457361281;  
0,2032716808; 0,0508179208; 0; 0,0460253325;  
0,1841013326; 0,4142279992; 0,736405334;  
1,150633335].

В соответствии с этими данными можно получить графическое изображение левого и правого профилей производящей поверхности соответственно, что дает возможность получения

осевого сечения модифицированной производящей поверхности (рис. 4).

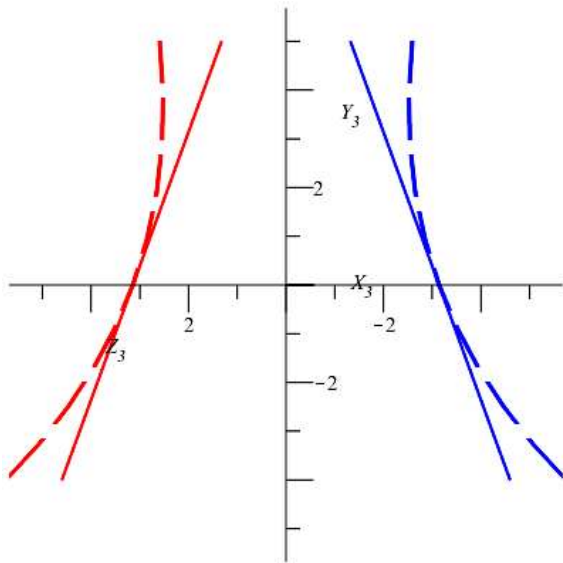


Рисунок 4 – Модифицированный осевой профиль обобщенной производящей поверхности

Подставив в систему уравнений (5) уравнение (6), которое задает модификацию профиля, получаем параметрическую форму уравнений модифицированной левой производящей поверхности:

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = \sin(\theta_2) \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \cos(\theta_x) \mp z \cdot \sin(\theta_x)) + \\ + R \cdot \sin(\theta_2) \\ R_{MY}^{(Su)} = \cos(\theta_2) \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \cos(\theta_x) \mp z \cdot \sin(\theta_x)) + \\ + R \cdot \sin(\theta_2) \\ R_{MZ}^{(Su)} = -p_0 \cdot \theta_2 + \mu \cdot z^2 \cdot \sin(\theta_x) \pm \\ \pm z \cdot \cos(\theta_x) \pm \Delta z \end{cases}$$

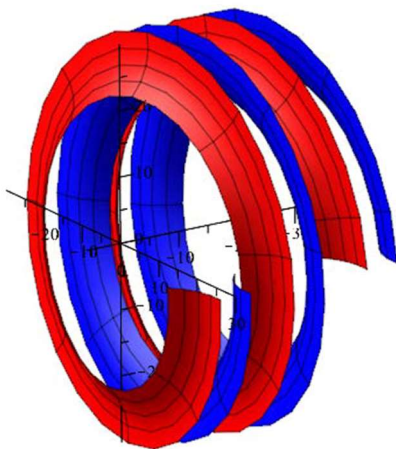


Рисунок 5 – Модель модифицированной производящей поверхности зуборезного инструмента «червячная фреза»

Получение поверхностей зубьев методом твердотельного моделирования основано на виртуальном кинематическом представлении процесса формообразования в виде взаимоогибания поверхностей одного объекта (инструмента) и второго объекта (заготовки) [32–35]. Для этой цели применены методы алгебраической логики в виде геометрического вычитания для удаления части объема заготовки, отсеченной при помощи инструмента.

Основным принципом твердотельного моделирования является применение возможностей алгебры множеств, когда рассматриваемая заготовка и инструмент представляются множеством геометрических элементов. В основе алгоритма лежит типовая операция разности множеств:

$$M = \frac{M_{заг}}{M_{инстр}},$$

где  $M$  – результирующее множество геометрических элементов;

$M_{заг}$ ,  $M_{инстр}$  – множества элементов, принадлежащих соответственно нарезаемой заготовке и инструменту.

Результирующее множество элементов  $M$ , после каждой операции вычитания, становится новым значением для множества  $M_{заг}$ . Цикл повторяется над уже модифицированным набором элементов  $M_{заг}$ , что моделирует процесс образования огибающих поверхностей на зуборезных станках.

Алгоритм геометрического компьютерного формообразования элементов червячной передачи представлен на рис. 6.

Рассмотрим процесс формообразования зубьев червяка  $j = 1$  и червячного колеса ( $j = 2$ ) с углом скрещивания, который задан в наладочных параметрах алгоритма формообразования.

В блоке 1 на рис. 6 осуществляется формирование твердотельных моделей заготовок и инструмента на основе применения процедур геометрического моделирования. Для этого, исходя из данных чертежа и предварительных расчетов, определяются геометрические характеристики осевых сечений заготовок (блок 1.1) и инструмента (блок 1.2), которым сообщается формообразующее вращательное движение.

Сформированные твердотельные модели дисковой фрезы и заготовки червяка или червячной фрезы и заготовки червячного колеса, рассматриваемые далее как числовые множества, устанавливаются в номинальное исходное положение, определяемое радиальной установкой инструмента, технологическими смещениями, угловой и осевой установками заготовки (блок 2).

В блоке 3 на рис. 6 вводятся кинематические зависимости, выражающие

относительное движение объектов в станочном зацеплении. При моделировании традиционной схемы нарезания методом обкатки процесс формообразования задается функциональной взаимосвязью углового вращения заготовки.

В блоках 4 и 5 выполняется виртуальное имитационное «нарезание» зубьев,

представляющее собой последовательное удаление частей объема заготовки, отсекаемых инструментом, на основе применения булевых операций вычитания тел (в виде геометрического вычитания трехмерных числовых множеств).

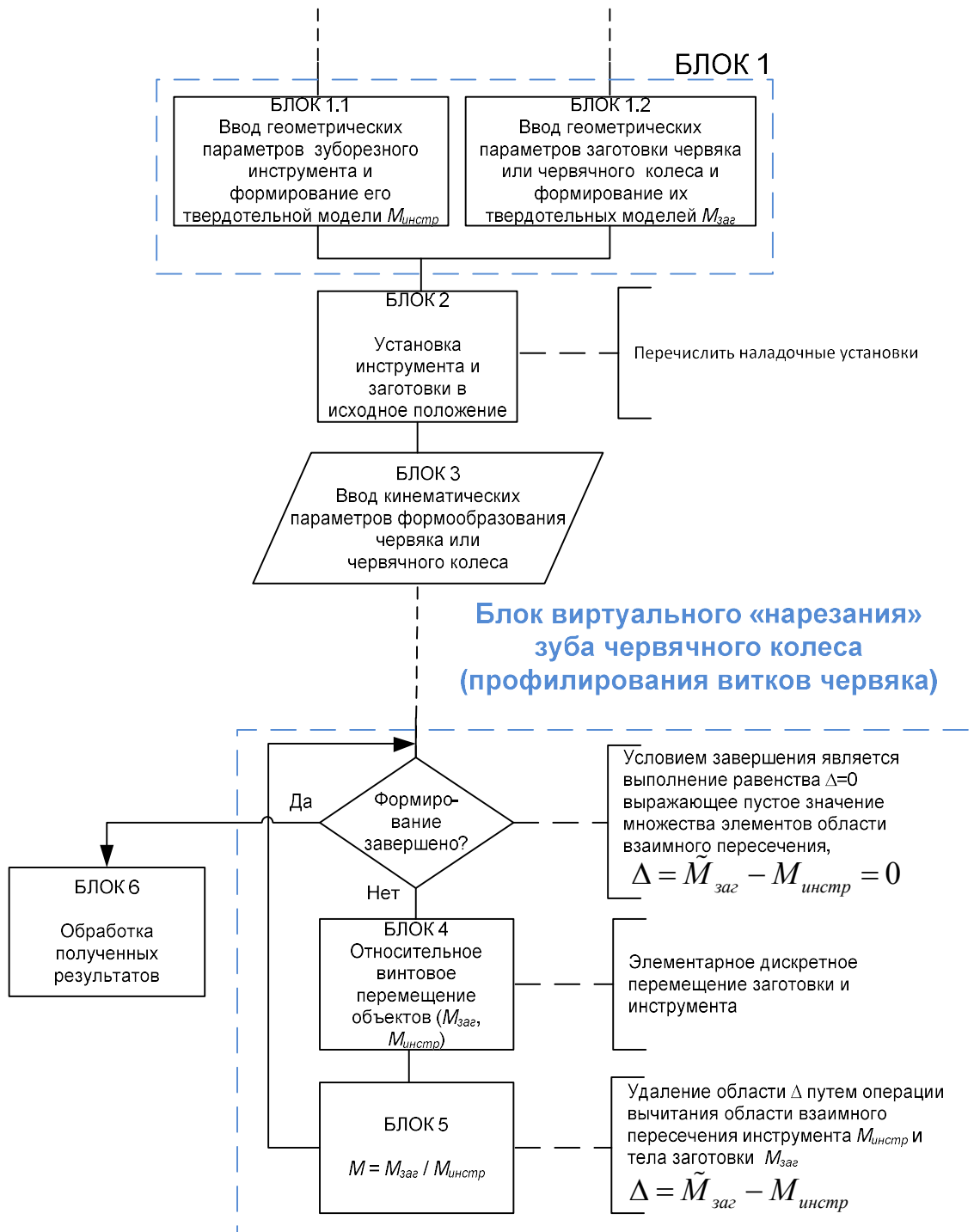


Рисунок 6 – Алгоритм компьютерного моделирования процесса формообразования рабочих поверхностей элементов червячного зацепления

После выполнения операции, телам сообщаются малые угловые перемещения [36–38], изменяющие их относительное

положение в соответствии с математическими зависимостями, которые связывают взаимные угловые перемещения геометрических объектов

участвующих в виртуальном формообразовании элементов червячной передачи (рис. 7).

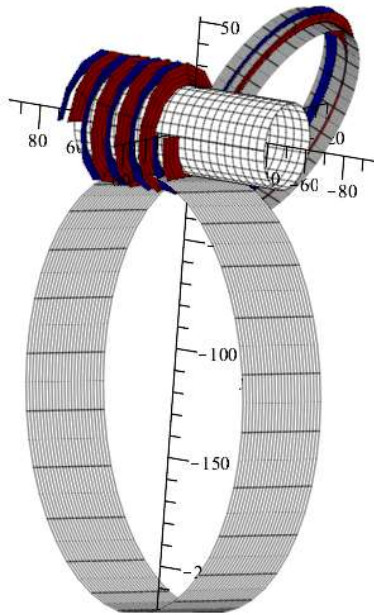


Рисунок 7 – Геометрическая имитационная модель формообразования элементов червячного зацепления

Описанный алгоритм компьютерного моделирования позволяет сформировать рабочие поверхности цилиндрического червяка (рис. 8) и червячного колеса (рис. 9), с различными параметрами модификации производящей поверхности червячной фрезы.



Рисунок 7 – Рабочая поверхность цилиндрического червяка

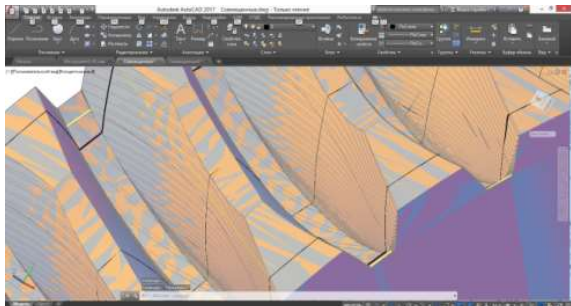


Рисунок 8 – Рабочая поверхность цилиндрического червячного колеса

## Выводы

Полученные зависимости для описания виртуального цифрового прототипа производящей поверхности зуборезного инструмента с возможностью внесения профильной модификации для улучшения контакта рабочих поверхностей цилиндрического червяка и червячного колеса, что приводит к улучшению характеристик зоны контакта зубчатой передачи. Применение цифрового прототипа модифицированной производящей поверхности позволяет выполнять получение виртуального изделия используемого в зубчатой передаче для его дальнейшего анализа и позволяет сократить временные, а соответственно и финансовые затраты.

## Литература

1. Андожский, В. Д. Расчет зубчатых передач [Текст] / В. Д. Андожский. — М.: Ленинград, 1955. — 269 с.
2. Вейц, В. Л. Геометрия зацепления зубчатых передач [Текст] / В. Л. Вейц, А. М. Волженская, Н. И. Колчин. — Л.: Машиностроение. 1978. — 136 с.
3. Передачи спироидные с цилиндрическими червяками. Расчет геометрии: методические указания; под ред. И.Н. Френкеля. — М.: Ротапринт ВНИИНАШ, 1977. — 66 с.
4. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — 13-е изд., испр. — М.: Наука, 1986. — 544 с.
5. Волков, А. Э. Компьютерное моделирование процессов формообразования поверхностей резанием / А. Э. Волков // IV Международный конгресс: Конструкторско-технологическая информатика 2000: в 2 т. — М.: СТАНКИН, 2000. — Т. 1. — С. 122–126.
6. Голованов, Н. Н. Геометрическое моделирование : учебник [Текст] / Н. Н. Голованов. — М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2002. — 472 с.
7. ГОСТ 18498-89. Передачи червячные. Термины, определения и обозначения [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 86 с.
8. ГОСТ 19036-81 Передачи червячные цилиндрические. Исходный червяк и исходный производящий червяк [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 4 с.
9. ГОСТ 19650-97 Передачи червячные цилиндрические. Расчет геометрических параметров [Текст]. — М.: Стандартиформ, 2005. — 10 с.
10. ГОСТ 20184-81 Передачи червячные цилиндрические мелко модульные. Исходный червяк и исходный производящий червяк [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 5 с.

11. Литвин, Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений [Текст] / Ф. Л. Литвин. — М.: Наука, 1968. — 584 с.
12. Лопато, Г. А. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. Справочное пособие [Текст] / Г. А. Лопато, Н. Ф. Кабатов, М. Г. Сегаль. — М.: Машиностроение, 1977. — 423 с.
13. Лоскутов, В. В. Зубообрабатывающие станки [Текст] / В. В. Лоскутов, А. Г. Ничков. — М.: Машиностроение, 1978. — 192 с.
14. Гохман, Х. И. Теория зацеплений, обобщенная и развитая путем анализа [Текст] / Х. И. Гохман. — Одесса, 1886. — 315 с.
15. Диментберг, Ф. М. Пространственные механизмы. Обзор современных исследований [Текст] / Ф. М. Диментберг, Ю. Л. Саркисян, М. К. Усков. — М.: Наука, 1983. — 96 с.
16. Лашнев, С. И. Формообразование зубчатых деталей реечными и червячными инструментами [Текст] / С. И. Лашнев. — М.: Машиностроение, 1971. — 216 с.
17. Сандлер, А. И. Производство червячных передач [Текст] / А. И. Сандлер, С. А. Лагутин, А. В. Верховский; под общ. ред. С. А. Лагутина. Москва: Машиностроение, 2008. — 272 с.
18. Wildhaber, E. A new look at wormgear hobbing. American Machinist, 1954, June 21, p. 149–152.
19. Карачаровский, В. Ю. Визуализационная оценка геометрических характеристик контактирующей поверхности в червячных передачах на основе применения методов 3D компьютерной графики [Текст] / В. Ю. Карачаровский, М. К. Решетников, С. А. Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2010. — № 4. — Вып. 1. — С. 55–60.
20. Карачаровский, В. Ю. Визуальная оценка параметров локализованного контакта в червячных передачах на основе применения методов 3D компьютерной графики [Текст] / В. Ю. Карачаровский, С. А. Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2011. — № 2. — Вып. 2. — С. 73–77.
21. Карачаровский, В. Ю. Геометрическое моделирование и визуальная оценка винтовой поверхности зуба [Текст] / В. Ю. Карачаровский, М. К. Решетников, С. А. Рязанов // Проблемы графической подготовки студентов технических вузов в условиях современного компетентного подхода к процессу обучения: сб. тр. междунар. науч.-метод. конф. — Дивноморское: ДГТУ, 2015. — С. 59–66.
22. Карачаровский, В. Ю. Геометрическое моделирование формообразования пространственных поверхностей при винтовом относительном движении [Текст] / В. Ю. Карачаровский, С. А. Рязанов // Проблемы геометрического моделирования в автоматизированном проектировании и производстве: 1-я Междунар. науч. конф. — М.: Изд-во МГИУ, 2008. — С. 143–146.
23. Карачаровский, В. Ю. Обобщенная модель твердотельного зуборезного инструмента с изменяемой кривизной производящей поверхности [Текст] / В. Ю. Карачаровский, С. А. Рязанов // Совершенствование подготовки учащихся и студентов в области графики, конструирования и стандартизации: междууз. науч.-метод. сб. — Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. — С. 152–156.
24. Карачаровский, В. Ю. Применение методов компьютерной 3D графики и твердотельного моделирования при разработке технологических процессов зубонарезания [Текст] / В. Ю. Карачаровский, С. А. Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2010. — № 4. — Вып. 1. — С. 55–60.
25. Карачаровский, В. Ю. Разработка цифровых технологий твердотельного моделирования процессов формообразования пространственных зубчатых передач для реализации на многокоординатных станках [Текст] / В. Ю. Карачаровский, С. А. Рязанов // Пятый Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций: в 2 ч. — Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. Ч. 1. — С. 150–151.
26. Ильин, В. А. Аналитическая геометрия: учебник для вузов [Текст] / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. — М.: Наука, 1999. — 224 с.
27. Калашников, С. Н. Зубчатые колеса и их изготовление [Текст] / С. Н. Калашников, А. С. Калашников. — М.: Машиностроение, 1983. — 264 с.
28. Калашников, С. Н. Производство зубчатых колес: справочник / С. Н. Калашников [и др.]; под общ. ред. Б. А. Тайца. — 3-е изд., перераб. и дополн. — М.: Машиностроение, 1990. — 464 с.
29. Колчин, Н. И. Аналитический расчет плоских и пространственных зацеплений [Текст] / Н. И. Колчин. — М.: Машгиз, 1949. — 210 с.
30. Лашнев, С. И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ [Текст] / С. И. Лашнев. — М.: Машиностроение, 1975. — 392 с.
31. Лебедев, П. А. Кинематика пространственных механизмов: учебник [Текст] / П. А. Лебедев. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
32. Ляшков, А. А. Аналитическое исследование сопряженных винтовых поверхностей с применением ЭВМ / А. А. Ляшков, А. Н. Подкорытов // Материалы межзональной науч.-метод. конф. вузов Сибири, Урала и Дальнего Востока по прикладной

геометрии и инженерной графике. – Новосибирск, 1976. – С. 45-54.

33. Ляшков, А. А. Геометрическое и компьютерное моделирование формообразования поверхностей деталей [Текст]: монография / А. А. Ляшков. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. — 89 с.

34. Ляшков, А. А. Компьютерное моделирование процесса формообразования дисковой фрезой деталей с винтовой поверхностью / А. А. Ляшков // СТИН. – 2012. – № 1. – С. 26-29.

35. Ляшков, А. А. Моделирование формообразования сложных поверхностей деталей [Текст] / А. А. Ляшков [и др.] // Металлообработка. — 2010. — № 4. — С. 36–42.

36. Решетников, М. К. Оценка параметров червячных передач на основе методов 3D компьютерной графики / М. К. Решетников, С. А. Рязанов // Геометрия и графика. – М.: ИНФРА-М, 2018. – Т. 6, № 1. – С. 34-38. DOI: 10.12737/article\_5ad0971a86af78.65167837.

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015616756 Российская Федерация, Геометрическое твердотельное моделирование зубчатых передач со скрещивающимися осями вращения / Карачаровский В. Ю. (RU), Решетников М. К. (RU), Рязанов С. А. (RU); заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А. (RU)». – № 2015613296; заявл. 23.04.2015; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2015.

38. Карачаровский, В. Ю. Определение координат точек эвольвентной винтовой поверхности червячной передачи [Текст] / В. Ю. Карачаровский, М. К. Решетников, С. А. Рязанов // Проблемы графической подготовки студентов технических вузов в условиях современного компетентного подхода к процессу обучения: сб. тр. междунар. науч.-метод. конф. – Дивноморское: ДГТУ, 2015. – С. 66-73.

**Рязанов С. А. Разработка компьютерной имитационной модели формообразования рабочей поверхности червячного колеса зуборезным инструментом с модифицированной производящей поверхностью.** В статье приведен анализ существующих методов получения рабочей поверхности зуборезного инструмента и описано создание геометрической модели процесса формообразования рабочих поверхностей элементов червячного зацепления. Применение описанного алгоритма формообразования дает возможность, не изготавливая передачу в материале для выполнения ее промежуточного контроля, получать достоверную информацию обо всех особенностях ее работы. Описано применение методов геометрического моделирования для виртуализации процесса формообразования и контроля рабочих поверхностей червяков и червячных колес, что в современных условиях зубообрабатывающего производства с широкой номенклатурой выпускаемой продукции позволяет выполнять постоянное ее обновление и модификацию: от изготовления единичных экземпляров зубчатых передач до их серийного или массового производства.

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, твердотельное моделирование, зубчатые колеса, червячное зацепление, зуборезный инструмент, модифицированная производящая поверхность.

**Ryazanov S. Development of a computer simulation model for shaping the working surface of a worm wheel by a gear-cutting tool with a modified generating surface.** The article provides an analysis of existing methods for obtaining the working surface of a gear cutting tool and describes the creation of a geometric model of the process of shaping the working surfaces of worm gear elements. The application of the described shaping algorithm makes it possible, without manufacturing the transmission in the metal to control it, to obtain reliable information about all the features of its work. The application of geometric modeling methods for virtualizing the processing and control of the working surfaces of worms and worm wheels is described, which in the conditions of a gear processing industry with a wide range of products allows its constant updating and modification: from the manufacture of single gear sets to their serial or mass production.

**Keywords:** 3D modeling, solid-state modeling, gears, worm gearing, gear cutting tools, modified producing surface.

Статья поступила в редакцию 20.05.2020  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Самоорганизация ТСП-трафика

Д. В. Бельков, Л. А. Лазебная  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[belkovdv@list.ru](mailto:belkovdv@list.ru)

### Аннотация

*В работе показано, что современный трафик является фрактальным. Рассмотрена модель формирования фрактального эволюционного ландшафта с использованием понятия самоорганизованной критичности. На основе этой модели построена модель фрактального трафика. Приведены результаты вычислительного эксперимента при моделировании реального ТСП-трафика. Исследования выполнены в среде Octave.*

### Введение

В условиях развития телекоммуникаций до уровня сетей следующего поколения NGN (Next Generation Networks), обеспечивающих набор услуг с заданными характеристиками качества обслуживания QoS (Quality of Service), актуальными являются задачи повышения качества обслуживания. Количественная сторона процессов обслуживания потоков сообщений (трафика) является предметом теории трафика. На основе этой теории разрабатываются методы оценки характеристик качества обслуживания.

Многообразие видов сетей и способов выделения сетевого ресурса для обслуживания трафика требует разработки моделей, которые учитывают реальный характер потоков сообщений и детали обслуживания мультисервисного трафика.

В современных сетях потоки пакетов формируются множеством источников требований на предоставление сетью услуги и сетевых приложений, обеспечивающих услуги передачи информации. Пользователи, создающие потоки пакетов, существенно отличаются между собой значениями удельной интенсивности нагрузки, и поэтому трафик является неоднородным. Он имеет определенные требования к QoS и долгосрочные зависимости в интенсивности, например, из-за повторной передачи неверно принятых пакетов.

Передачу потоков различных служб обеспечивает единая сеть. Поскольку источники каждой службы могут иметь разные скорости передачи информации или изменять ее в процессе сеанса связи, то потокам пакетов свойственна пачечность (burstness). В реализации трафика присутствует значительное количество больших пульсаций при относительно малом среднем уровне трафика. Пакеты поступают на узел не по отдельности, а пачкой. Это явление ухудшает характеристики (увеличивает потери, задержки, джиттер пакетов) при прохождении трафика через узлы сети. Известно [1–4], что пачечный трафик имеет фрактальную структуру.

Фрактальный трафик обладает свойством масштабной инвариантности. В отличие от однородного трафика, он сохраняет внешние признаки при рассмотрении в разном масштабе. Поэтому методы моделирования и расчета сетевых систем, основанные на использовании Пуассоновских потоков, не дают точной картины процессов, происходящих в сети. Учет фрактальности трафика позволит более точно описать мультисервисный трафик. Это обеспечит возможность получения заданных показателей качества обслуживания.

Известно [5, 6], что фрактальная структура системы является результатом самоорганизации системы в критическое состояние. Моделью такого процесса может быть формирование фрактального эволюционного ландшафта на основе самоорганизованной критичности (Self-Organized Criticality, SOC).

В настоящее время опубликовано много работ о структуре современного трафика, однако очень небольшое число из них посвящено анализу причин фрактальности трафика. Существенный вклад в исследование фрактального трафика внесли W. Leland, M. Taqqu, W. Wilinger, D. Wilson, V. Paxson, K. Park, Feldmann, P. M. Robinson, A. C. Gilbert, A. Erramilli. Среди российских исследователей необходимо отметить работы О. И. Шелухина, Б. С. Цыбакова, В. В. Петрова, А. В. Осина, А. Г. Ложковского, Е. В. Заборовского, О. Я. Городецкого.

Целью данной статьи является моделирование фрактального ТСП-трафика. В работе решается задача построения модели трафика на основе SOC. Показаны результаты вычислительного эксперимента, выполненного в среде Octave.

В первом разделе статьи показано, что современный трафик является фрактальным. Второй раздел посвящен понятию самоорганизованной критичности. В третьем разделе показано, что на основе SOC может быть построена модель фрактального эволюционного ландшафта. В четвертом разделе на основе модели фрактального эволюционного ландшафта строится модель фрактального трафика.

### Фрактальность трафика

Понятие «фрактал» было впервые введено Бенуа Мандельбротом в 1975 году. С математической точки зрения фрактальные объекты обладают дробной размерностью. Примерами таких объектов являются Канторово множество и кривая Коха. Фракталы обладают свойством самоподобия (масштабной инвариантности). Фрактал можно разбить на сколь угодно малые части, но каждая часть окажется уменьшенной копией целого. Среди фракталов выделяют стохастические фрактальные процессы, обладающие масштабной инвариантностью (самоподобием) статистических характеристик второго порядка. Такие фракталы встречаются при изучении трафика. В этой связи в литературе понятия фрактального и самоподобного трафика используются как синонимы.

Долгое время теоретическую базу для проектирования систем распределения информации составляла теория телетрафика на основе теории массового обслуживания. Она адекватно описывает процессы, происходящие в сетях коммутации каналов. Моделью потока вызовов (данных) в этой теории является простейший поток (стационарный ординарный поток без последствия).

Развитие высоких технологий привело к широкому распространению сетей с пакетной передачей данных, которые постепенно стали вытеснять системы с коммутацией каналов, но, по-прежнему, они проектировались на основе общих положений теории телетрафика.

Однако, в 1993 году группа американских исследователей: W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger и D. Wilson опубликовали результаты работы, которая в корне изменила представления о сетевых процессах. Оказалось, что потоки в современных сетях нельзя аппроксимировать простейшими, поскольку они имеют иную структуру, чем принято в классической теории телетрафика. Было установлено, что трафик сети обладает свойством самоподобия (масштабной инвариантности), имеет память (последствие), а также обладает высокой пульсацией. По этой причине расчет параметров системы распределения информации, предназначенной для обработки сетевого трафика, по классическим формулам дает некорректные, неоправданно оптимистические результаты. На рис. 1 показаны отличия временного ряда реального сетевого (фрактального) трафика (слева) и традиционной Пуассоновской модели трафика (справа) при различных масштабах. Сверху вниз масштаб временной оси укрупняется.

Алгоритмы обработки трафика, созданные для работы с простейшим потоком неэффективны для фрактальных потоков. Статистические характеристики фрактального трафика сильно отличаются от характеристик простейшего потока. Поэтому требуют корректировки исходные предпосылки, которые делались ранее при разработке многих сетевых устройств.

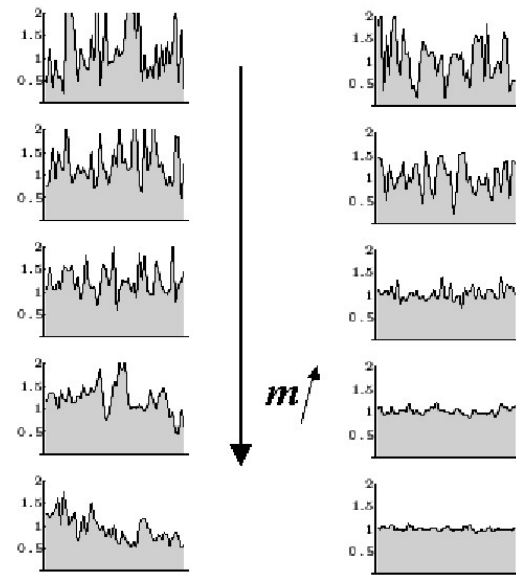


Рисунок 1 – Фрактальный и простейший потоки

Несмотря на продолжительный период изучения трафика остается ряд актуальных задач:

- фактически отсутствует строгая теоретическая база, которая пришла бы на смену классической теории массового обслуживания при проектировании современных систем распределения информации с фрактальным трафиком;
- нет единой общепризнанной модели фрактального трафика;
- не существует достоверной и признанной методики расчета параметров и показателей качества систем распределения информации при влиянии эффекта самоподобия;
- отсутствуют алгоритмы и механизмы, обеспечивающие качество обслуживания в условиях фрактального трафика [7].

Решение указанных задач имеет не только теоретическое, но и практическое значение. При использовании асинхронных приложений не было настоящей необходимости в детальном анализе и устранении причин, вызывающих перегрузки и задержки в сети. Однако большинство современных приложений являются синхронными и предъявляет высокие требования к качеству соединения. Для них задержка не должна превышать определенной величины или скорость передачи не должна падать ниже допустимого значения. В сетевом трафике до сих пор преобладает передача файлов с гарантированной доставкой, но доля данных, относящихся к новым классам приложений, постоянно растет.

Сократить задержку передачи данных по сравнению с протоколом TCP, позволяет протокол без гарантированной доставки UDP. Он не требует дополнительного времени на повторную передачу потерянных пакетов, тем более что большинство современных протоколов передачи аудио и видео данных малочувствительно к небольшому

проценту потерь информации. Однако, обеспечить повышенные требования к качеству соединения только с помощью транспортного протокола (UDP или TCP) затруднительно, поскольку большинство причин, приводящих к значительным задержкам, находятся на сетевом уровне [8].

Ситуация, сложившаяся в современных компьютерных сетях, наличие большого количества сетевых маршрутов на которых периодически возникают резкие колебания задержки в передаче данных и большой процент потерь пакетов, появление новых свойств сетевого трафика, необходимость обеспечения высокого качества обслуживания различных категорий приложений, делают актуальной задачу моделирования фрактального трафика.

### Самоорганизованная критичность

Наукой о самоорганизующихся системах является синергетика. Она имеет три парадигмы. В рамках первой было показано, что во многих открытых нелинейных системах вдали от равновесия происходит самоорганизация. При этом возникают пространственно-неоднородные стационарные структуры, которые И. Р. Пригожин предложил называть диссипативными структурами. Во второй парадигме основное внимание было уделено динамическому хаосу – сложному непериодическому поведению в детерминированных системах, где нет случайных факторов. Основным результатом исследований стало установление факта границ прогнозирования, т. е. существования конечного времени, через которое предсказание поведения системы становится невозможным. В основе этих парадигм лежат представления о самоорганизации и выделении из большого числа переменных, описывающих систему, небольшого числа величин, которые называются параметрами порядка. К ним на больших интервалах времени подстраиваются остальные степени свободы системы.

Третья парадигма связана с теорией самоорганизованной критичности. Эта теория призвана объяснить такие закономерности, как масштабная инвариантность и прерывистое равновесие [9]. Нужно отметить, что именно такие закономерности экспериментально найдены при исследованиях современного трафика.

Согласно теории SOC естественная динамика сложных систем приводит их к критическим состояниям, т. е. системы самоорганизуют себя таким образом, чтобы оказаться в критическом состоянии. Для многих сложных систем «нормальным состоянием» является не стационарное, а критическое состояние.

Система находится в критическом состоянии, если ее структура приобретает свойство масштабной инвариантности,

становится фрактальной. Степень близости системы к критическому состоянию определяется степенью фрактальности системы. Увеличение степени фрактальности является универсальным сигналом приближения к критическому состоянию.

Базовой моделью теории SOC является куча песка. Рассмотрим кучу песка, изображенную на рис. 2.

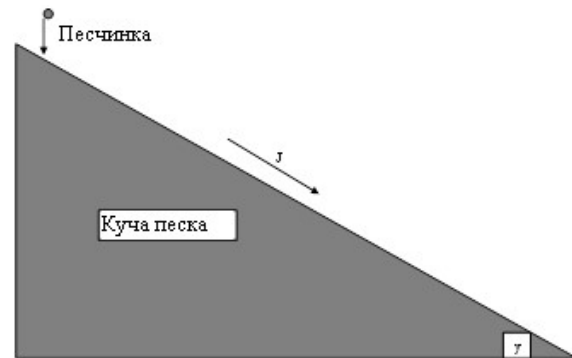


Рисунок 2 – Куча песка

Будем предполагать сцепление между песчинками достаточно большим. При этом возможно лишь поверхностное перемещение песка, причем инерцией его движения можно пренебречь. В таком случае состояние системы полностью определяется наклоном поверхности. В тех местах, где локальный наклон оказывается больше порога устойчивости, происходит осыпание песчинок вниз по склону на соседние участки поверхности (лавины). Состояние песка определяется углом наклона поверхности  $\gamma$ . При его изменении происходит фазовый переход от неподвижного состояния к состоянию непрерывного тока песка. При токе, соответствующем добавлению одной песчинки за один шаг, система самоорганизуется в состояние с критическим наклоном  $\gamma = \gamma_c$ . Если средний наклон поверхности  $\gamma$  меньше чем  $\gamma_c$ , то песок неподвижен. Если наклон превышает значение  $\gamma_c$ , возникает спонтанный ток песка  $J$  по поверхности. Возникает фазовый переход, в котором управляющим параметром является наклон  $\gamma$ , а параметром порядка – ток песка  $J$ . Критическое значение наклона  $\gamma_c$  разделяет хаотическую ( $\gamma < \gamma_c$ ) и упорядоченную ( $\gamma > \gamma_c$ ) фазы. Обе эти фазы соответствуют состоянию системы устойчивому к малым возмущениям. В хаотической фазе они еще быстро затухают во времени и пространстве, а в упорядоченной – уже не могут существенно влиять на величину тока. И только в критической точке, одна добавленная песчинка может вызывать лавину. В песчаной куче существует много областей неустойчивости, но критическое состояние является устойчивым. Такие характеристики тесно связаны с фракталами.

Самым простым вариантом модели кучи песка является одномерная модель Бака – Танга – Вайзенфельда (BTW-1D). В ней рост уровня слоев управляется правилами:

$$\begin{aligned} z_{i+1} &= z_{i+1} + 1, \\ z_i - z_{i+1} &> z_c, \\ z_i &= z_i + 1, \\ z_i - z_{i+1} &\leq z_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $z_i$  – количество песчинок, содержащихся в слое  $i$ .

Модель кучи песка основана на динамическом равновесии двух противоположных процессов. Первый – это естественный путь развития элементов системы (увеличение локального наклона кучи), второй направлен на отбраковку элементов, продвинувшихся слишком далеко (осыпание песка). Равновесие процессов развития и отбраковки достигается в критической точке, где события едва происходят и система приобретает целостные свойства.

Важным свойством системы, обладающей масштабной инвариантностью, является степенная зависимость между частотой и масштабом событий, происходящих в ней. Если  $E$  – масштаб лавин и  $f$  – их частота, то  $f \sim E^{-b}$ , где  $b$  – масштабный коэффициент [9, 10].

### Модель эволюции видов

Одной из областей, где теория самоорганизованной критичности позволила добиться успеха при моделировании процесса, является биологическая эволюция. Объектом эволюции является вид, представляющий собой группу особей, упорядоченных по возрастанию приспособленности к условиям окружающей среды. Приспособленность видов изменяется в результате двух различных процессов. Во-первых, переход от одной особи к соседней особи увеличивает приспособленность вида,

и он поднимается выше по эволюционному ландшафту. Этот процесс можно назвать мутацией особей. Во-вторых, переход от одного вида к другому обеспечивает связь между видами. В результате такой мутации видов изменяется эволюционный ландшафт. Течение эволюции существенно зависит от соотношения скоростей этих процессов.

Если виды не связаны между собой, то изменение приспособленности происходит за счет мутаций особей. При этом каждый вид быстро достигает локального максимума эволюционного ландшафта, где останавливается, не имея возможности достичь более высоких состояний. Т.о., на неизменном ландшафте быстро достигается состояние, в котором эволюция не идет. Если виды связаны сильно, то раньше, чем вид достигнет локального максимума ландшафта, этот максимум успевает исчезнуть, поскольку ландшафт быстро изменяется. Экосистема оказывается в состоянии, где приспособленность забывается и мутация особей, направленная на адаптацию к постоянно меняющемуся окружению, оказывается тщетной. По этой причине эволюция невозможна. Чтобы избежать остановки эволюции экосистема должна самоорганизоваться в критическое состояние, которое разделяет эти две крайности, т.е. в точку фазового перехода между ними. Здесь виды могут эволюционировать к большей приспособленности, используя как мутации особей, так и мутации видов.

В критическом состоянии экосистема демонстрирует прерывистое равновесие (перемежаемость). Она совмещает в себе черты упорядоченных систем и хаотических, неупорядоченных систем. Интервалы активного межвидового взаимодействия при мутациях видов перемежаются с интервалами активного роста приспособленности за счет мутаций особей. Пример [11] прерывистого равновесия в модели эволюции показан на рис. 3.

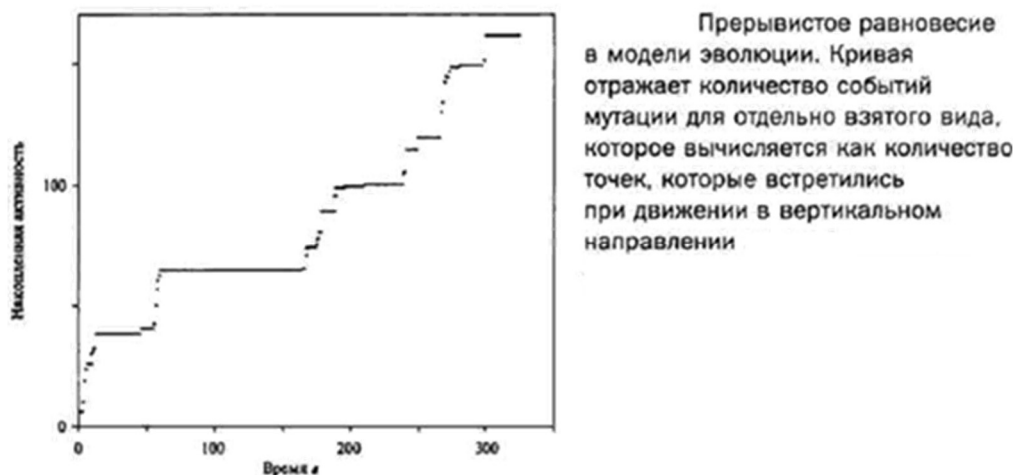


Рисунок 3 – Пример прерывистого равновесия

Аналогия модели эволюции видов с моделью BTW-1D показана в табл. 1.

Таблица 1 – Аналогия с моделью BTW-1D

| Модель BTW-1D     | Модель эволюции видов               |
|-------------------|-------------------------------------|
| Песчинка          | Особь                               |
| Слой песка        | Вид                                 |
| Накопление песка  | Мутация особей                      |
| Лавина песка      | Мутация видов                       |
| Высота кучи песка | Общая накопленная приспособленность |
| Песчаный ландшафт | Эволюционный ландшафт               |

### Модель фрактального трафика

Модель фрактального трафика, предлагаемая в данной статье, построена по

аналогии с моделью эволюции видов. Система управления трафиком принимает пакеты и определяет их конформность. Конформные пакеты передаются по сети в порядке очереди. Каждый такой пакет перемещается с определенной задержкой. Поэтому при передаче конформных пакетов общая накопленная задержка увеличивается. Неконформные пакеты системой управления трафиком по сети не передаются. В случае поступления неконформного пакета или паузы общая накопленная задержка не возрастает.

Т. о., система управления трафиком создает процесс, обладающий прерывистым равновесием. Интервалы накопления общей задержки при поступлении конформных пакетов перемежаются с временными паузами.

Аналогия предлагаемой модели с моделью эволюции видов показана в табл. 2.

Таблица 2 – Аналогия моделей

| Модель эволюции видов               | Модель фрактального трафика                |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| Особь                               | Конформный пакет                           |
| Вид                                 | Пачка конформных пакетов                   |
| Мутация особей                      | Передача конформных пакетов                |
| Мутация видов                       | Пауза или поступление неконформных пакетов |
| Общая накопленная приспособленность | Общая накопленная задержка                 |
| Эволюционный ландшафт               | Ландшафт накопленной задержки              |

В работе выполнен вычислительный эксперимент, показывающий самоорганизацию реального трафика в соответствии с предлагаемой моделью. Для изучения выбраны две реализации сетевого трафика, полученные в университете города Наполи (Италия). Согласно лицензии данные свободно доступны для анализа [12]. Изучаемые временные ряды представляют собой измерения задержки TCP-пакетов. В первом случае (ряд TCP\_d64) – передача TCP-пакетов объема 64 байт, во втором случае (ряд TCP\_d1024) – передача TCP-пакетов объема 1024 байт. Измерения проводились каждые 10 миллисекунд, получено свыше 3000 отсчетов. Отправитель имел ADSL-доступ (640 Kbps), на стороне получателя – UMTS-доступ, скорость передачи 100 rps, операционная система Windows32, на каждой из сторон.

Временные ряды TCP\_d64, TCP\_d1024 показаны на рис. 4–5. Они являются фрактальными [13]. Каждый ряд представляет собой ON-OFF процесс, т. е. передача пакетов происходит с нерегулярными остановками.

На рис. 6, 7 показаны ландшафты накопленной задержки изучаемых рядов. Это процессы с прерывистым равновесием. Рост задержки происходит с остановками.

Рис. 8, 9 показывают масштабную инвариантность трафика. Зависимость между частотой остановок и масштабом этих событий

(уровнем накопленной задержки) является степенной. В логарифмических координатах линейная аппроксимация степенной зависимости показана штриховой линией. Тангенс ее наклона равен значению масштабного коэффициента  $b$ . Для изучаемых рядов он близок к единице. Для ряда TCP\_d64  $b = 1,02$ . Для ряда TCP\_d1024  $b = 1,13$ . Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,91$  и  $R^2 = 0,88$  соответственно.

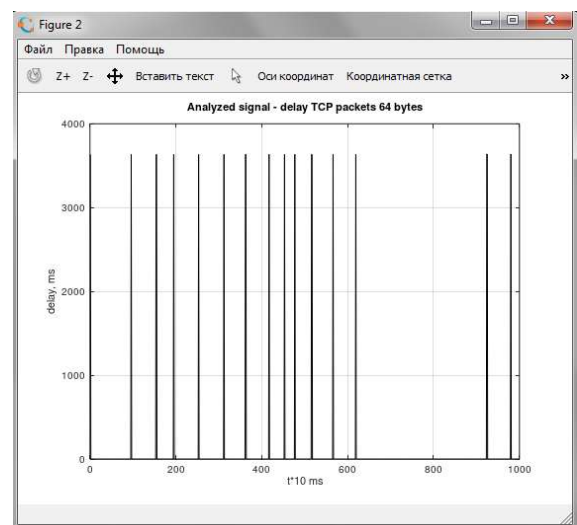


Рисунок 4 – Фрагмент ряда TCP\_d64

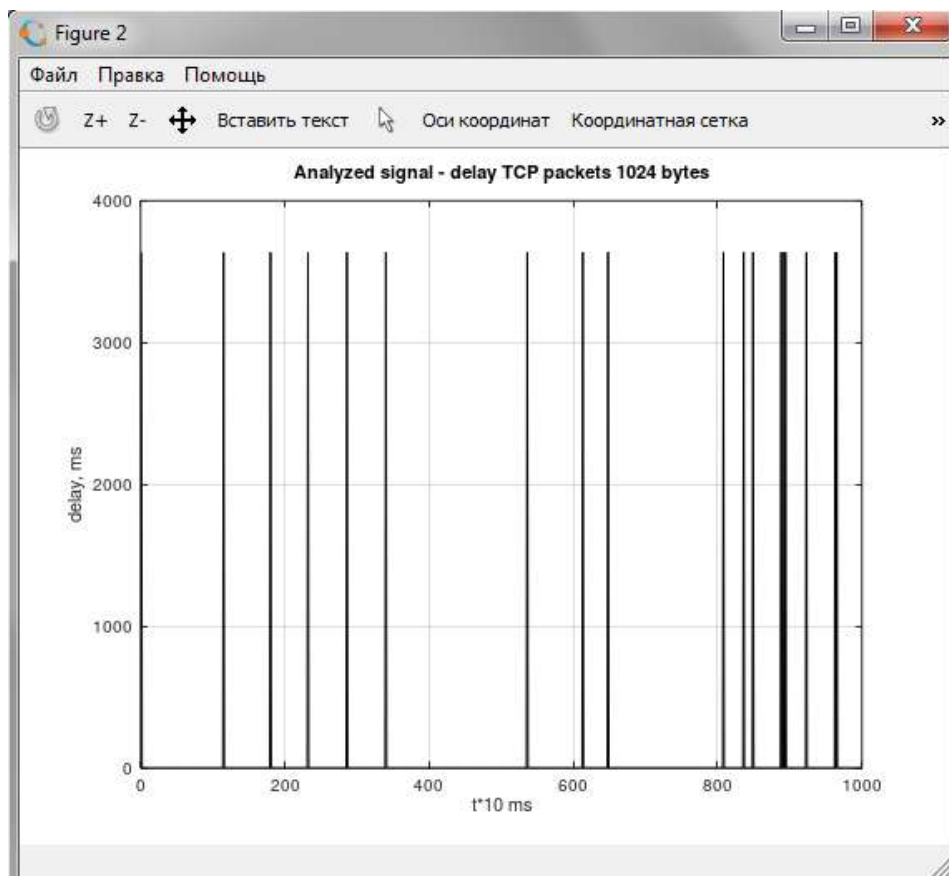


Рисунок 5 – Фрагмент ряда TCP\_d1024

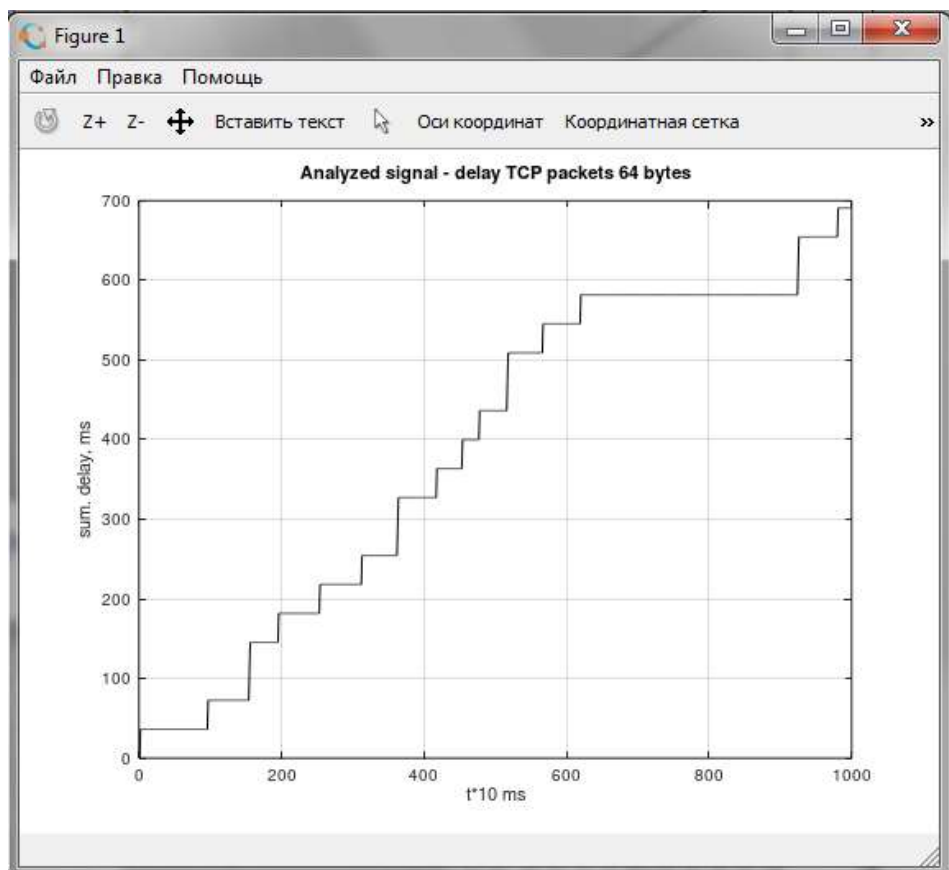


Рисунок 6 – Ландшафт задержки ряда TCP\_d64

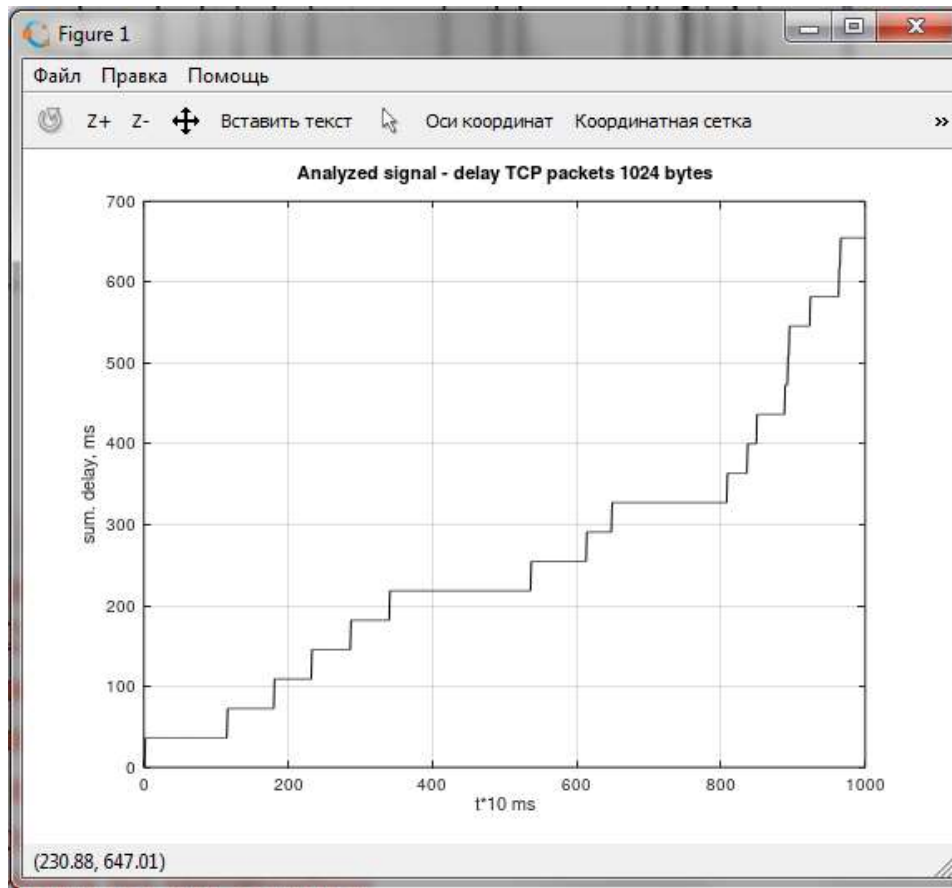


Рисунок 7 – Ландшафт задержки ряда TCP\_d1024

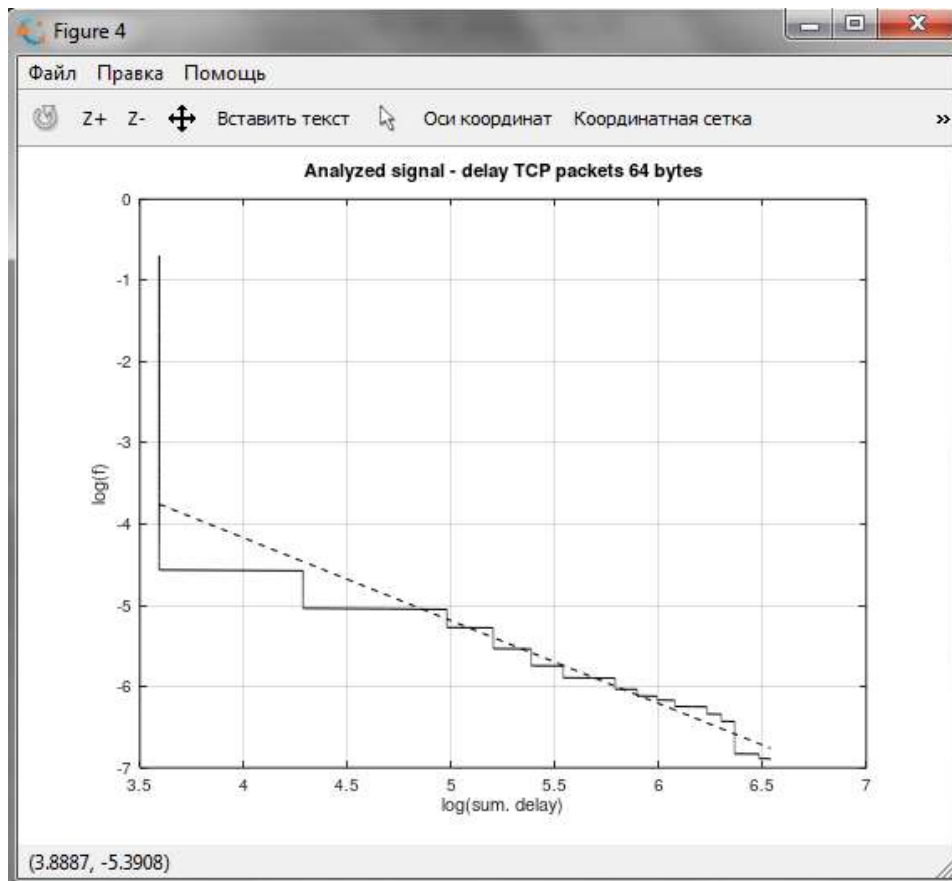


Рисунок 8 – масштабная инвариантность ряда TCP\_d64

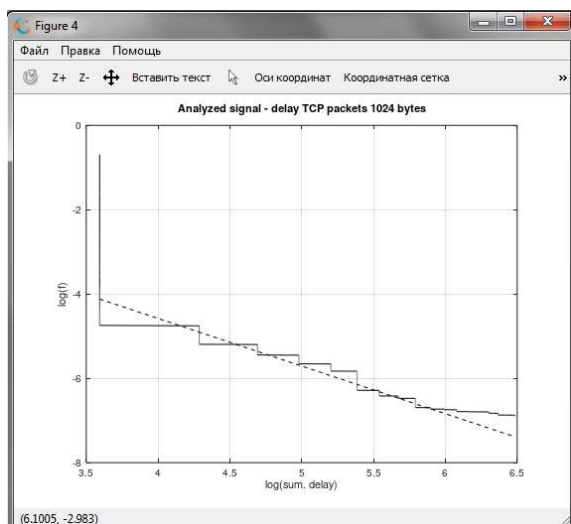


Рисунок 9 – масштабная инвариантность ряда TCP\_d1024

## Выводы

В работе получены следующие результаты. Разработана модель трафика на основе самоорганизованной критичности. Показана аналогия предлагаемой модели с моделью эволюции видов на основе самоорганизованной критичности. Показано, что процессы накопления задержки при реализациях трафика TCP\_d64 и TCP\_d1024 обладают масштабной инвариантностью. Масштабные коэффициенты этих процессов близки к единице.

## Литература

1. Newton N. J. Self similar model for bursty traffic – a deterministic approach. [Электронный ресурс], 2013. – Режим доступа: <http://www.andonis.eu/documents/MScProject.pdf>
2. Ложковський, А. Г. Аналіз і синтез систем розподілу інформації в умовах мультисервісного трафіка. Автореферат дисертації. Одеса. - 2010. – 38 с.
3. Бельков Д. В., Едемская Е. Н., Незамова Л. В. Статистический анализ сетевого трафика. 36. Научных работ ДонНТУ. Серия «Информатика, кибернетика, вычислительная техника». Вып. 13 (185): - Донецк: ДонНТУ.- 2011.- С. 66 -75.
4. Бельков Д. В., Едемская Е. Н. Статистический анализ трафика сети с беспроводным доступом. 36. Научных работ ДонНТУ. Серия «Информатика, кибернетика, вычислительная техника». Вып. 14 (188): - Донецк: ДонНТУ.- 2011.- С. 113-122.
5. Тарасов Д. В. Исследование характеристик системы мониторинга сетей связи следующего поколения. Автореферат диссертации. Санкт-Петербург. – 2012. – 22 с.
6. Aschwanden M. Self-organized criticality in astrophysics. Berlin. – 2011. – 416 p.
7. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия. Автореферат диссертации. Москва. – 2004. – 20 с.
8. Иванов А. В. Разработка и исследование алгоритмов прогнозирования и управления очередями в компьютерных сетях. Автореферат диссертации. Санкт-Петербург. – 2001. – 18 с.
9. Подлазов А. В. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности. [Электронный ресурс], 2008. – Режим доступа: <http://www.nonlin.ru/articles/podlazov/soc>
10. Бак П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. Москва. – 2013. – 276 с.
11. Network tools and traffic traces. [Электронный ресурс], 2007. – Режим доступа: <http://www.grid.unina.it/Traffic/Traces/traces.php>
12. Едемская Е. Н., Бельков, Д. В. Исследование сетевого трафика с помощью функции Херста. Информатика и кибернетика, № 2, 2015, С. 39-46.

**Бельков Д. В., Лазебная Л. А. Самоорганизация TCP-трафика.** В работе показано, что современный трафик является фрактальным. Рассмотрена модель формирования фрактального эволюционного ландшафта с использованием понятия самоорганизованной критичности. На основе этой модели построена модель фрактального трафика. Приведены результаты вычислительного эксперимента при моделировании реального TCP-трафика. Исследования выполнены в среде Octave.

**Ключевые слова:** фрактальный трафик, масштабная инвариантность, самоорганизованная критичность, масштабный коэффициент.

**Belkov D., Lazebnaya L. Self-organization TCP-traffic.** The paper shows that modern traffic is fractal. The model of the formation of the fractal evolutionary landscape using the concept of self-organized criticality is considered. On the basis of this model, a model of fractal traffic is built. The results of the computational experiment in the simulation of real TCP traffic are presented. The research was done in the Octave runtime.

**Keywords:** fractal traffic, large-scale invariance, self-organized criticality, large-scale coefficient.

Статья поступила в редакцию 05.08.2020  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Сглаживание и прогнозирование на основе трендовых моделей

В. В. Хоменко, Ю. К. Орлов

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[V\\_VKhomenko@mail.ru](mailto:V_VKhomenko@mail.ru)

### Аннотация

Был проведен анализ основных видов сглаживания и прогнозирования на основе трендовых моделей. В ходе анализа наглядно показано, что любое прогнозирование можно проводить с их помощью. Используя общедоступные методы, а не сложные вычислительные программы, можно делать точное прогнозирование в различных областях. Каждый из методов прогнозирования является достаточным. Но не каждый из них учитывает всё необходимое в ходе прогнозирования. Поэтому, чтобы точнее прогнозировать на основе трендовых моделей, следует подходить к выбору метода в частном порядке. Но даже предложенные варианты прогнозирования полностью покрывают потребность, давая комплексную оценку на основе предыдущих периодов.

### Введение

На сегодняшний день наука достаточно далеко продвинулась в разработке технологий прогнозирования. Специалистам хорошо известны методы нейросетевого прогнозирования, нечёткой логики и т. п. Разработаны соответствующие программные пакеты, но на практике они, к сожалению, не всегда доступны рядовому пользователю, а в то же время многие из этих задач можно достаточно успешно решать, используя методы исследования операций, в частности имитационное моделирование, теорию игр, регрессионный и трендовый анализ [1, 2].

В данной статье представлены сглаживание и прогнозирование временных рядов на основе трендовых моделей, что является неотъемлемой частью точного прогнозирования.

### Исследование

Ниже рассмотрены методы сглаживания.

#### Простые средние.

Целью сглаживания является построение модели прогнозирования для последующих периодов, исходя из прошлых наблюдений. В методе простых средних за начальные данные принимаются значения переменной  $Y$  в моменты времени  $t$ , а прогнозное значение определяется как простое среднее на следующий временной период. Расчетная формула имеет вид:

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

где  $n$  – число наблюдений.

В случае, когда становится доступным новое наблюдение, для прогнозирования на следующий период следует учесть и вновь полученный прогноз. При использовании этого метода прогноз осуществляется путем

усреднения всех предыдущих данных, однако недостатком такого прогнозирования является трудность его использования в трендовых моделях.

#### Метод скользящих средних.

Данный метод основан на представлении ряда в виде суммы достаточно гладкого тренда и случайного компонента. В основе метода лежит идея расчета теоретического значения на основе локального приближения. Для построения оценки тренда в точке  $t$  по значениям ряда из временного интервала  $[t - m, t + m]$  рассчитывают теоретическое значение ряда. Наибольшее распространение в практике сглаживания рядов получил случай, когда все веса для элементов интервала  $[t - m, t + m]$  равны между собой [3]. По этой причине этот метод называют *методом скользящих средних*, так как при выполнении процедуры происходит скольжение окном шириной  $(2m + 1)$  по всему ряду. Ширину окна обычно берут нечетной, так как теоретическое значение рассчитывается для центрального значения: количество слагаемых  $k = 2m + 1$  с одинаковым числом уровней слева и справа от момента  $t$ .

Формула для расчета скользящей средней в этом случае принимает вид:

$$\hat{y}_t = \frac{1}{2m+1} \sum_{i=t-m}^{t+m} y_i.$$

Дисперсия скользящей средней определяется как:

$$\frac{\sigma^2}{k},$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия исходных членов ряда;  
 $k$  – интервал сглаживания.

Поэтому чем больше интервал сглаживания, тем сильнее усреднение данных и менее изменчива выделяемая тенденция. Чаще всего сглаживание производят по трем, пяти и семи членам исходного ряда. При этом следует учитывать следующие особенности скользящей средней: если рассмотреть ряд с периодическими колебаниями постоянной длины, то при сглаживании на основе скользящей средней с интервалом сглаживания, равным или кратным периоду, колебания полностью устроятся. Нередко сглаживание на основе скользящей средней столь сильно преобразует ряд, что выделенная тенденция развития проявляется лишь в самых общих чертах, а более мелкие, но важные для анализа детали (волны, изгибы и т. д.) исчезают; после сглаживания мелкие волны могут иногда поменять направление на противоположное – на месте «пиков» появляются «ямы», и наоборот [4]. Все это требует осторожности в применении простой скользящей средней и заставляет искать более тонкие методы описания.

Метод скользящих средних не дает значений тренда для первых и последних  $m$  членов ряда. Этот недостаток особенно заметно сказывается в случае, когда длина ряда невелика.

#### Экспоненциальное сглаживание.

Экспоненциальная средняя  $y_t$  является примером асимметричной взвешенной скользящей средней, в которой учитывается степень старения данных: более «старая» информация с меньшим весом входит в формулу для расчета сглаженного значения уровня ряда:

$$\hat{y}_t = \alpha y_t + (1 - \alpha) \hat{y}_{t-1}. \quad (1)$$

Здесь  $\hat{y}_t$  – экспоненциальная средняя, заменяющая наблюдаемое значение ряда  $y_t$  (в сглаживании участвуют все данные, полученные к текущему моменту  $t$ ),  $\alpha$  – параметр сглаживания, характеризующий вес текущего (самого нового) наблюдения;  $0 < \alpha < 1$ .

Метод применяется для прогнозирования нестационарных временных рядов, имеющих случайные изменения уровня и угла наклона. По мере удаления от текущего момента времени в прошлое вес соответствующего члена ряда быстро (экспоненциально) уменьшается и практически перестает оказывать какое-либо влияние на значение  $\hat{y}_t$ .

Легко получить, что  $\hat{y}_t = \hat{y}_{t-1} + \alpha(y_t - \hat{y}_{t-1})$ . Последнее соотношение позволяет дать следующую интерпретацию экспоненциальной средней: если  $\hat{y}_{t-1}$  – прогноз значения ряда  $y_t$ , то разность  $y_t - \hat{y}_{t-1}$  есть погрешность прогноза.

Таким образом, прогноз  $\hat{y}_{t+1}$  для следующего момента времени  $t + 1$  учитывает ставшую известной в момент  $t$  ошибку прогноза.

Параметр сглаживания  $\alpha$  является взвешивающим фактором. В случае, если  $\alpha$  близко к единице, то в прогнозе существенно учитывается величина ошибки последнего прогнозирования. При малых значениях  $\alpha$  прогнозируемая величина близка к предыдущему прогнозу. Выбор параметра сглаживания представляет собой достаточно сложную проблему. Общие соображения таковы: метод хорош для прогнозирования достаточно гладких рядов [5]. В этом случае можно выбрать сглаживающую константу путем минимизации ошибки прогноза на один шаг вперед, оцененной по последней трети ряда. Некоторые специалисты не рекомендуют использовать большие значения параметра сглаживания. На рис. 1 показан пример сглаженного ряда методом экспоненциального сглаживания при  $\alpha = 0,1$ .

#### Экспоненциальное сглаживание с учетом тренда (метод Хольта).

В этом методе учитывается локальный линейный тренд, имеющийся во временных рядах. Если во временных рядах есть тенденция к росту, то вместе с оценкой текущего уровня необходима и оценка наклона. В методике Хольта значения уровня и наклона сглаживаются непосредственно путем использования различных постоянных для каждого из параметров. Постоянные сглаживания позволяют оценить текущий уровень и наклон, уточняя их всякий раз при появлении новых наблюдений.

В методе Хольта используются три расчетных формулы.

Экспоненциально сглаженный ряд (оценка текущего уровня):

$$L_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} - T_{t-1}). \quad (2)$$

Оценка тренда:

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 + \beta)T_{t-1} \quad (3)$$

Прогноз на  $p$  периодов вперед:

$$\hat{y}_t = L_t + pT_t, \quad (4)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – постоянные сглаживания из интервала  $[0, 1]$ .

Уравнение (2) похоже на уравнение (1) для простого экспоненциального сглаживания за исключением члена, учитывающего тренд. Постоянная  $\beta$  нужна для сглаживания оценки тренда.

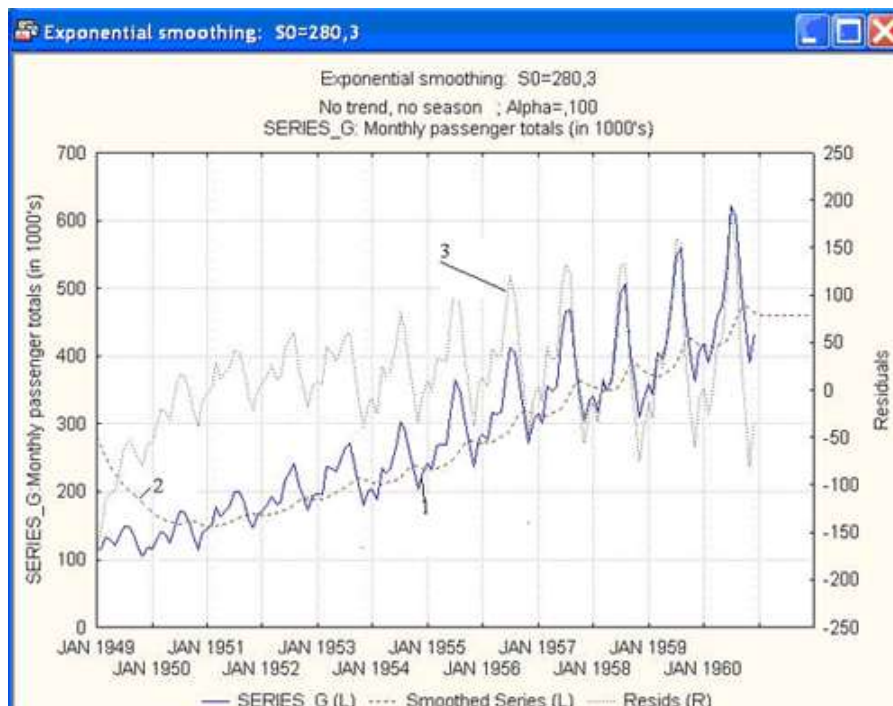


Рисунок 1 – Результат экспоненциального сглаживания при  $\alpha = 0,1$   
(1 – исходный ряд; 2 – сглаженный ряд; 3 – остатки)

В уравнении прогноза (3) оценка тренда умножается на число периодов  $p$ , на которое строится прогноз, а затем это произведение складывается с текущим уровнем сглаженных данных.

Постоянные  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются субъективно или путем минимизации ошибки прогнозирования. Чем большие значения весов

будут взяты, тем более быстрый отклик на происходящие изменения будет иметь место и большему сглаживанию подвергаются данные. Меньшие веса делают структуру сглаженных значений менее ровной.

На рис. 2 приведен пример сглаживания ряда по методу Хольта при значениях  $\alpha$  и  $\beta$ , равных 0,1.

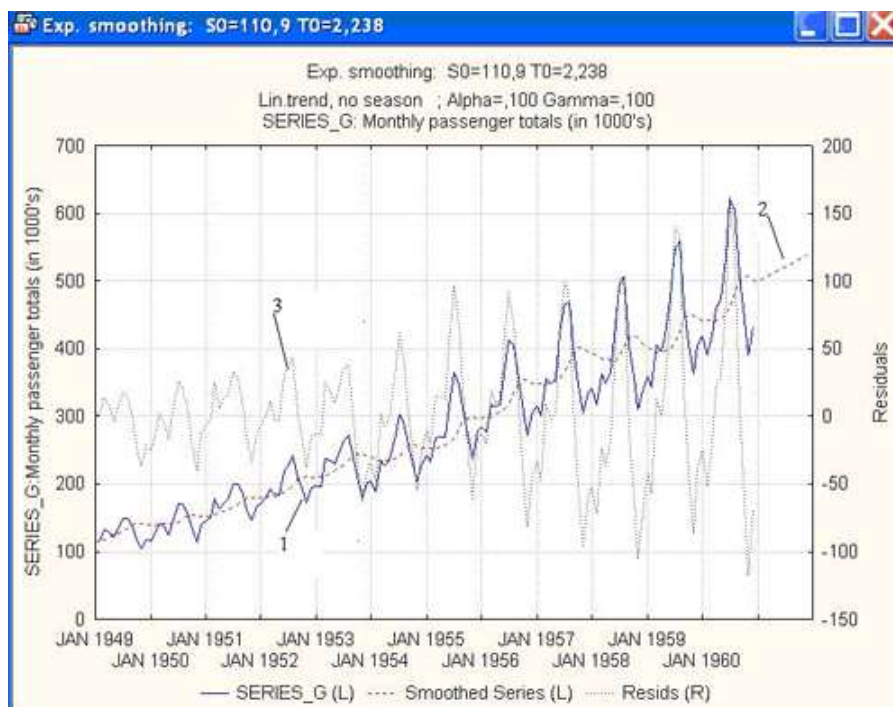


Рисунок 2 – Результат сглаживания по методу Хольта  
при  $\alpha = 0,1$  и  $\beta = 0,1$  (1 – исходный ряд; 2 – сглаженный ряд; 3 – остатки)

Экспоненциальное сглаживание с учетом тренда и сезонных вариаций (метод Винтерса).

При наличии в структуре данных сезонных колебаний для уменьшения ошибок прогнозирования используется трехпараметрическая модель экспоненциального сглаживания, предложенная Винтерсом. Этот подход является расширением предыдущей модели Хольта. Для учета сезонных вариаций здесь применяется дополнительное уравнение, и полностью этот метод описывается четырьмя уравнениями.

Экспоненциально сглаженный ряд:

$$L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1-\alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}). \quad (5)$$

Оценка тренда:

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1-\beta)T_{t-1}. \quad (6)$$

Оценка сезонности:

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1-\gamma)S_{t-s}. \quad (7)$$

Прогноз на  $p$  периодов вперед:

$$\hat{y}_{t+p} = (L_t + pT_t)S_{t-s+p}, \quad (8)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – постоянные сглаживания для уровня, тренда и сезонности соответственно;  
 $s$  – длительность периода сезонного колебания.

Уравнение (5) корректирует сглаженные ряды. В этом уравнении член  $\frac{Y_t}{S_{t-s}}$  учитывает

сезонность в исходных данных. После учета сезонности и тренда в уравнениях (6), (7) оценки сглаживаются, а в уравнении (8) делается прогноз. Как и в предыдущем способе, веса  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  могут выбираться субъективно или путем минимизации ошибки прогнозирования. Перед применением уравнения (5) необходимо определить начальные значения для сглаженного ряда  $L_t$ , тренда  $T_t$ , коэффициентов сезонности  $S_t$ . Обычно начальное значение сглаженного ряда принимается равным первому наблюдению, тогда тренд равен нулю, а коэффициенты сезонности устанавливаются равными единице.

На рис. 3 показан пример сглаживания ряда по методу Винтерса.

Прогнозирование на основе трендовых моделей.

Довольно часто временные ряды имеют линейную тенденцию (тренд). При предположении линейной тенденции нужно построить прямую линию, которая наиболее точно отображала бы изменение динамики за рассматриваемый период. Есть несколько методов построения прямой линии, но наиболее объективным с формальной точки зрения будет построение, основанное на минимизации суммы отрицательных и положительных отклонений исходных значений ряда от прямой линии.

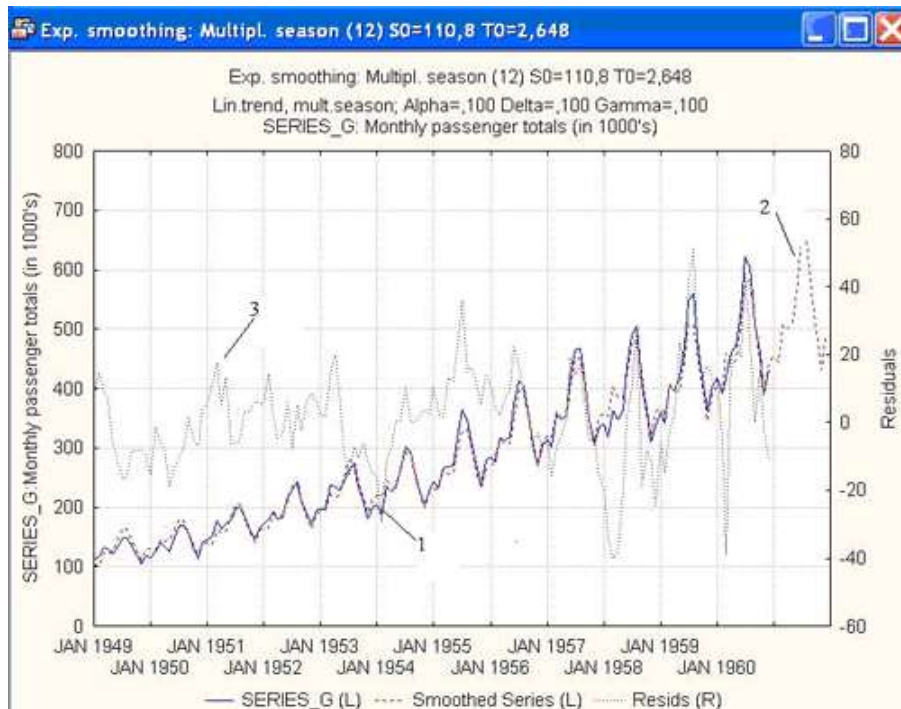


Рисунок 3 – Результат сглаживания по методу Винтерса при  $\alpha = 0,1$ ;  $\beta = 0,1$ ;  $\gamma = 0,1$  (1 – исходный ряд; 2 – сглаженный ряд; 3 – остатки)

Прямую линию в системе двух координат  $(x, y)$  можно определить точкой пересечения одной из координат  $y$  и углом наклона к оси  $x$ . Уравнение такой прямой будет выглядеть как:

$$y = ax + b,$$

где  $a$  – точка пересечения;  
 $b$  – угол наклона.

Для того чтобы прямая отображала ход динамики, необходимо минимизировать сумму вертикальных отклонений. При использовании в качестве критерия оценки минимизации простой суммы отклонений получится не очень хороший результат, т. к. отрицательные и положительные отклонения взаимно компенсируют друг друга [6]. Минимизация суммы абсолютных значений также не приводит к удовлетворительным результатам, поскольку оценки параметров в этом случае неустойчивы, имеются также вычислительные трудности при реализации такой процедуры оценивания. Поэтому наиболее часто используемой процедурой является минимизация суммы квадратов отклонений или *метод наименьших квадратов* (МНК).

Поскольку ряд исходных значений имеет колебания, то модель ряда будет содержать ошибки, квадраты которых надо минимизировать:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2,$$

где  $y_i$  – наблюдаемое значение;  
 $y_i^*$  – теоретические значения модели;  
 $i$  – номер наблюдения,  $i = \overline{1, n}$ .

При моделировании тенденции исходного временного ряда с помощью линейного тренда примем, что:

$$y = ax + b + e, \quad (9)$$

где  $e$  – отклонение между теоретическими и фактическими значениями.

Оценивание параметров  $a^*$  и  $b^*$  дает возможность найти отклонения теоретических значений  $y_i^*$  от фактических  $y_i$ :

$$\varepsilon_i = y_i - y_i^* = y_i - a^* - b^* x_i.$$

Введем

$$e = \sum_i \varepsilon_i^2 = \sum_i (y_i - a^* - b^* x_i)^2.$$

Для оценки параметров определим частные производные по  $a$  и  $b$  и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial e}{\partial a} = -2 \sum_i (y_i - a^* - b^* x_i) = 0;$$

$$\frac{\partial e}{\partial b} = -2 \sum_i (y_i - a^* - b^* x_i) x_i = 0.$$

После преобразований получим:

$$\begin{aligned} \sum_i y_i - b^* \sum_i x_i &= na^*; \\ \sum_i y_i x_i - a^* \sum_i x_i - b^* \sum_i x_i^2 &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Поделив первое уравнение на  $n$ , приходим к следующему:

$$a^* = \bar{y} - b^* \bar{x}.$$

Подставив полученное выражение во второе уравнение системы (10), для коэффициента  $b^*$  получим:

$$b^* = \frac{\sum_i x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_i x_i^2 - n \bar{x}^2}$$

#### Проверка соответствия модели.

В качестве примера на рис. 4 приведен график линейной регрессии между мощностью автомобиля  $x$  и его стоимостью  $y$ .

Уравнение для этого случая имеет вид:  $y = 1455,3 + 13,4x$ . Визуальный анализ этого рисунка показывает, что для ряда наблюдений имеются значительные отклонения от теоретической кривой. График остатков показан на рис. 5.

Анализ остатков линии регрессии может представлять полезную меру того, насколько оцененная регрессия отражает реальные данные. Хорошая регрессия та, которая объясняет значительную долю дисперсии и, наоборот, плохая регрессия не отслеживает большую величину колебаний исходных данных [8]. Интуитивно ясно, что всякая дополнительная информация позволит улучшить модель, т. е. уменьшить необъясненную долю вариации переменной  $y$ . Для анализа регрессионной проведем разложение дисперсии на составляющие. Очевидно, что

$$y_i - \bar{y} = (y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}).$$

Далее нужно обе части уравнения возвести в квадрат и просуммировать, в результате чего получим:

$$\begin{aligned} \sum_i (y_i - \bar{y})^2 &= \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \\ &+ 2 \sum_i (y_i - \hat{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{y}). \end{aligned}$$

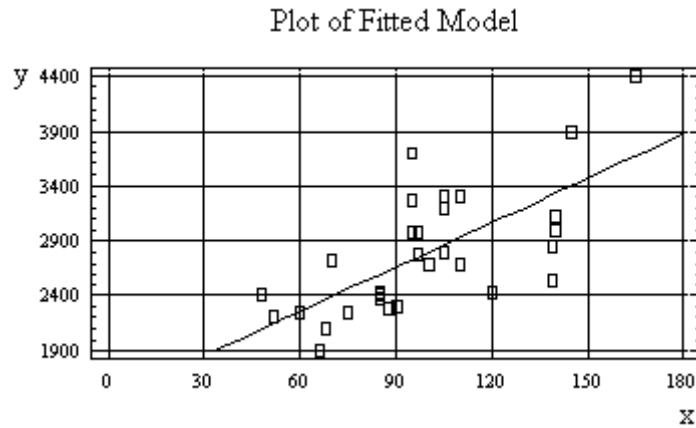


Рисунок 4 – График линейной регрессии

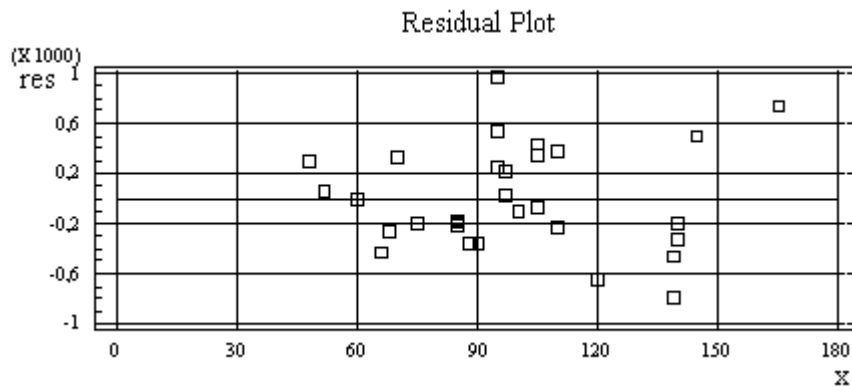


Рисунок 5 – График остатков

Последнее слагаемое будет равно нулю, т. к. представляет собой сумму остатков, поэтому приходим к следующему результату:

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2. \quad (11)$$

Выражение (11) можно переписать в следующем виде:

$$SS_0 = SS_1 + SS_2, \quad (12)$$

где  $SS_0$ ,  $SS_1$ ,  $SS_2$  определяют, соответственно, общую, регрессионную и остаточную суммы квадратов.

Регрессионная сумма квадратов измеряет часть дисперсии, объясняемую линейной зависимостью; остаточная – часть дисперсии, не объясняемую линейной зависимостью.

Каждая из этих сумм характеризуется соответствующим числом степеней свободы (ЧСС), которое определяет число единиц данных, независимых друг от друга. Иначе говоря, ЧСС связано с числом наблюдений  $n$  и числом вычисляемых по совокупности данных параметров. В рассматриваемом случае для расчета  $SS_0$  определяется только одна постоянная (среднее значение), следовательно, ЧСС для  $SS_0$  составит  $(n - 1)$ , ЧСС для  $SS_2$  –  $(n - 2)$  и ЧСС для

$SS_1$  составит  $n - (n - 1) = 1$ , т. к. в уравнении регрессии имеется  $n - 1$  постоянных точек. Также, как и суммы квадратов, ЧСС связаны соотношением:

$$n - 1 = 1 + (n - 2).$$

Суммы квадратов, связанные с разложением дисперсии, вместе с соответствующими ЧСС могут быть размещены в так называемой таблице анализа дисперсий (таблица ANOVA – ANalysisOfVAriance) – табл. 1.

Таблица 1 – Таблица ANOVA

| Источник  | Сумма квадратов | ЧСС     | Средний квадрат  |
|-----------|-----------------|---------|------------------|
| Регрессия | $SS_1$          | 1       | $SS_1 / 1$       |
| Ошибки    | $SS_2$          | $n - 2$ | $SS_2 / (n - 2)$ |
| Общая     | $SS_0$          | $n - 1$ |                  |

С помощью введенной аббревиатуры для сумм квадратов определим коэффициент детерминации как отношение суммы квадратов регрессии к общей сумме квадратов в виде:

$$R^2 = \frac{SS_1}{SS_0}. \quad (12)$$

Коэффициент детерминации измеряет долю изменчивости переменной  $Y$ , которую можно объяснить с помощью информации об изменчивости независимой переменной  $X$ . Коэффициент детерминации изменяется от нуля, когда  $X$  не влияет на  $Y$ , до единицы, когда изменение  $Y$  полностью объясняется изменением  $X$ .

#### Регрессионная модель прогноза.

Лучшим прогнозом считается прогноз, имеющий минимальную дисперсию. В нашем случае обычный МНК производит наилучший прогноз из всех методов, дающих несмещенные оценки на основе линейных уравнений. Ошибка прогноза, связанная с процедурой прогнозирования, может исходить от четырех источников.

Во-первых, случайная природа аддитивных ошибок, обрабатываемых линейной регрессией, гарантирует, что прогноз будет отклоняться от истинных величин, даже если модель правильно специфицирована и ее параметры точно известны.

Во-вторых, сам процесс оценки вносит ошибку в оценку параметров – они редко могут быть равны истинным значениям, хотя равны им в среднем.

В-третьих, в случае условного прогноза (в случае неизвестных точно значений независимых переменных) ошибка вносится с прогнозом объясняющих переменных.

В-четвертых, ошибка может появиться из-за того, что спецификация модели неточна.

В итоге, источники ошибки можно классифицировать следующим образом:

- природа переменной
- природа модели;
- ошибка, вносимая прогнозом независимых случайных величин;
- ошибка спецификации.

Для начала рассмотрим безусловный прогноз, когда независимые переменные легко и точно прогнозируются. Рассмотрение проблемы качества прогноза с уравнения парной регрессии.

$$y_t = a + bx_t + \varepsilon_t, \quad t = \overline{1, T};$$

$$\varepsilon_t \approx N(0, \sigma^2).$$

Постановку задачи в этом случае можно сформулировать следующим образом: каким будет наилучший прогноз  $y_{T+1}$  при условии, что в модели  $y = a + bx$  параметры  $a$  и  $b$  оценены точно, а значение  $x_{T+1}$  – известно.

Тогда прогнозное значение можно определить как:

$$\hat{y}_{T+1} = M(y_{T+1}) = a + bx_{T+1}.$$

Ошибка прогноза при этом составит:

$$\hat{e}_{T+1} = \hat{y}_{T+1} - y_{T+1}.$$

Ошибка прогноза обладает двумя свойствами:

–  $M(\hat{e}_{T+1}) = M(\hat{y}_{T+1} - y_{T+1}) = M(-\varepsilon_{T+1}) = 0$ , что свидетельствует о несмещенности оценки  $\hat{y}_{T+1}$ ;

– дисперсия ошибки прогноза  $D(\hat{e}_{T+1}) = M[(\hat{e}_{T+1})^2] = M[(\varepsilon_{T+1})^2] = \sigma^2$ .

Полученная дисперсия минимальна среди всех возможных оценок, основанных на линейных уравнениях.

Хотя  $a$  и  $b$  известны, ошибка прогноза появляется за счет того, что  $y_{T+1}$  может не лежать на линии регрессии из-за ошибки  $\varepsilon_{T+1}$ , подчиняющейся нормальному распределению с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ . Для проверки качества прогноза введем нормализованную величину:

$$\beta = \frac{\hat{y}_{T+1} - y_{T+1}}{\sigma} \approx N(0, 1).$$

Тогда можно определить 95 %-ый доверительный интервал в следующем виде:

$$P\left\{-\beta_{0,05} \leq \frac{\hat{y}_{T+1} - y_{T+1}}{\sigma} \leq \beta_{0,05}\right\} = 0,95,$$

где  $\beta_{0,05}$  – квантили нормального распределения.

Границы 95 %-го интервала можно определить как:

$$\hat{y}_{T+1} - \beta_{0,05}\sigma \leq y_{T+1} \leq \hat{y}_{T+1} + \beta_{0,05}\sigma.$$

В этом случае ширина доверительного интервала не зависит от величины  $x$  и границы интервала представляют собой прямые линии, параллельные линии регрессии.

Чаще при построении линии регрессии и проверке качества прогноза надо оценивать не только параметры регрессии, но и дисперсию ошибки прогноза. Можно показать [7], что в этом случае дисперсия ошибки зависит от величины

$$(x_{T+1} - \bar{x}),$$

где  $\bar{x}$  – среднее значение независимой переменной.

Кроме того, чем больше длина ряда, тем точнее прогноз. Ошибка прогноза уменьшается, если значение  $X_{T+1}$  близко к средней величине независимой переменной, и, наоборот, при удалении от среднего значения прогноз становится менее точным. На рис. 6 показаны результаты прогноза с помощью уравнения линейной регрессии на 6 интервалов времени вперед вместе с доверительными интервалами.

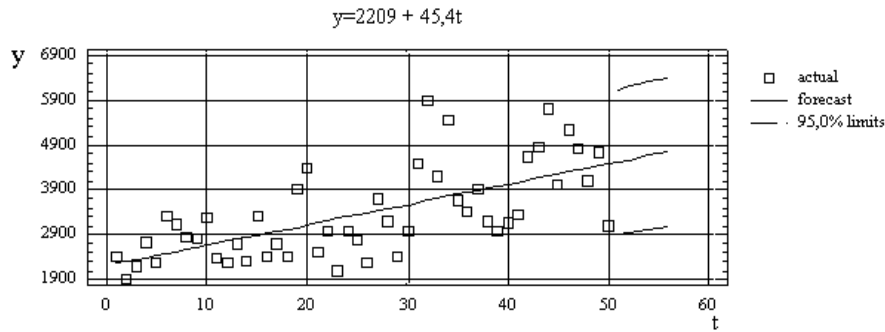


Рисунок 6 – Прогноз по уравнению линейной регрессии

Как видно из рис. 6, эта линия регрессии недостаточно хорошо описывает исходные данные: наблюдается большая вариация относительно подгоночной прямой. О качестве модели можно судить также по остаткам, которые

при удовлетворительной модели должны быть распределены примерно по нормальному закону. На рис. 7 приведен график остатков, построенный с помощью вероятностной шкалы.

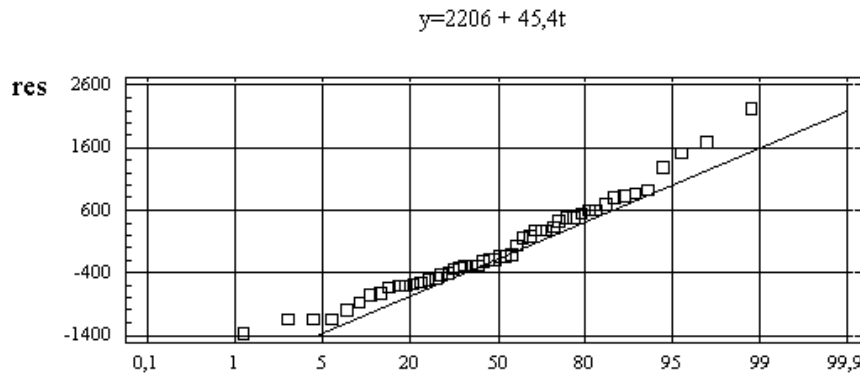


Рисунок 7 – График остатков

При использовании такой шкалы данные, подчиняющиеся нормальному закону, должны лежать на прямой линии [10]. Как следует из приведенного рисунка, точки в начале и конце периода наблюдений несколько отклоняются от прямой линии, что свидетельствует о

недостаточно высоком качестве выбранной модели в виде уравнения линейной регрессии.

На рис. 8 приведены результаты прогноза (вторая колонка) вместе с доверительными 95 % интервалами (нижним – третья и верхним – четвертая колонки, соответственно).

| Period | Forecast | Lower 95,0% Limit | Upper 95,0% Limit |
|--------|----------|-------------------|-------------------|
| 51,0   | 4527,39  | 2898,98           | 6155,79           |
| 52,0   | 4572,83  | 2940,68           | 6204,99           |
| 53,0   | 4618,28  | 2982,24           | 6254,32           |
| 54,0   | 4663,73  | 3023,66           | 6303,79           |
| 55,0   | 4709,17  | 3064,96           | 6353,39           |
| 56,0   | 4754,62  | 3106,11           | 6403,13           |

Рисунок 8 – Результаты прогноза

#### Многомерная регрессионная модель.

При многомерной регрессии данные для каждого случая включают значения зависимой переменной и каждой независимой переменной. Зависимая переменная  $y$  – это случайная величина, связанная с независимыми переменными следующим соотношением:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon,$$

где  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  – коэффициенты регрессии, подлежащие определению;

$\varepsilon$  – компонент ошибки, соответствующий отклонению значений зависимой переменной от истинного соотношения (предполагается, что ошибки независимы и имеют нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и неизвестной дисперсией  $\sigma$ ).

Для заданного набора данных оценки коэффициентов регрессии можно найти с помощью МНК. Если оценки МНК обозначить

через  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ , то соответствующая функция регрессии будет иметь вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k.$$

Остатки  $e = y - \hat{y}$  являются оценками компонента ошибки и подобны остаткам в случае простой линейной регрессии.

Статистический анализ модели многомерной регрессии проводится аналогично анализу простой линейной регрессии. Стандартные пакеты статистических программ позволяют получить оценки по МНК для параметров модели, оценки их стандартных ошибок [9]. Кроме того, можно получить значение  $t$ -статистики для проверки значимости отдельных слагаемых регрессионной модели и величину  $F$ -статистики для проверки значимости регрессионной зависимости.

Форма разбиения сумм квадратов в случае многомерной регрессии аналогична выражению (12), но соотношение для ЧСС будет следующим:

$$n - 1 = k + (n - k - 1).$$

Здесь  $n$  представляет собой объем наблюдений, а  $k$  – число переменных в модели. Общая вариация зависимой переменной состоит из двух составляющих: вариации, объясненной независимыми переменными через функцию регрессии, и необъясненной вариации.

Таблица ANOVA для случая многомерной регрессии будет иметь вид, показанный в табл. 2.

Таблица 2 – Таблица ANOVA

| Источник  | Сумма квадратов | ЧСС         | Средний квадрат      |
|-----------|-----------------|-------------|----------------------|
| Регрессия | $SS_1$          | $k$         | $SS_1 / k$           |
| Ошибки    | $SS_2$          | $n - k - 1$ | $SS_2 / (n - k - 1)$ |
| Общая     | $SS_0$          | $n - 1$     |                      |

В качестве примера многомерной регрессии воспользуемся данными из пакета Statistica (файл данных *Poverty.sta*). Приведенные данные основаны на сравнении результатов переписи 1960 и 1970 гг. для случайной выборки из 30 стран. Названия стран были введены как названия строк, а названия всех переменных этого файла приведены ниже.

POP\_CHNG – Изменение населения за 1960–1970 гг.  
N\_EMPLD – Количество людей, занятых в сельском хозяйстве.

PT\_POOR – Процент семей, живущих ниже уровня бедности.

TAX\_RATE – Ставка налога.

PT\_PHONE – Процент квартир с телефоном.

PT\_RURAL – Процент сельского населения.

AGE – Средний возраст.

В качестве зависимой переменной выбирается признак *Pt\_Poor*, а в качестве независимых – все остальные. Рассчитанные коэффициенты регрессии между выделенными переменными приведены на рис. 9.

| Effect    | Param.   | Std. Err. | t        | p        | -95.00% Cnf. Lmt | +95.00% Cnf. Lmt | Beta (?)  | St. Err. ? | -95.00% Cnf. Lmt | +95.00% Cnf. Lmt |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|------------------|------------------|-----------|------------|------------------|------------------|
| Intercept | 31.26604 | 13.26511  | 2.35701  | 0.027309 | 3.82508          | 58.70701         |           |            |                  |                  |
| POP_CHNG  | -0.39234 | 0.08049   | -4.87421 | 0.000064 | -0.55886         | -0.22583         | -0.630788 | 0.129413   | -0.898501        | -0.363076        |
| N_EMPLD   | 0.00075  | 0.00044   | 1.69033  | 0.104476 | -0.00017         | 0.00167          | 0.238314  | 0.140987   | -0.053340        | 0.529969         |
| TAX_RATE  | 1.23012  | 3.18985   | 0.38563  | 0.703311 | -5.36860         | 7.82884          | 0.038799  | 0.100611   | -0.169331        | 0.246930         |
| PT_PHONE  | -0.08325 | 0.13056   | -0.63763 | 0.530012 | -0.35332         | 0.18683          | -0.129627 | 0.203294   | -0.550173        | 0.290920         |
| PT_RURAL  | 0.16554  | 0.06185   | 2.67655  | 0.013476 | 0.03760          | 0.29347          | 0.618746  | 0.231173   | 0.140529         | 1.096963         |
| AGE       | -0.41926 | 0.25541   | -1.64153 | 0.114292 | -0.94762         | 0.10909          | -0.188205 | 0.114652   | -0.425380        | 0.048971         |

Рисунок 9 – Регрессионные коэффициенты

Эта таблица показывает регрессионные коэффициенты ( $B$ ) и стандартизованные регрессионные коэффициенты ( $Beta$ ). С помощью коэффициентов  $B$  устанавливается вид уравнения регрессии, которое в данном случае имеет вид:

$$PT\_Poor = 31,27 - 0,39Pop\_Chng + 0,16Pt\_Pural.$$

Включение в правую часть только этих переменных обусловлено тем, что лишь эти признаки имеют значение вероятности  $p$  меньше, чем 0,05 (см. четвертый столбец рис. 9).

## Выводы

Для обеспечения полного и своевременного прогнозирования достаточно простым методом выявления тенденции развития является сглаживание временного ряда, т. е. замена фактических уровней расчетными, имеющими меньшие вариации, чем исходные данные. В статье были кратко рассмотрены основные способы прогнозирования на основе трендовых моделей. Данные подходы можно использовать в широком спектре прогнозирования любой хозяйственной, экономической, финансовой и аналитической деятельности. Также следует отметить, что

модели экспоненциального сглаживания в определенных случаях в состоянии давать прогнозы, не уступающие по точности прогнозам, полученным при использовании более сложных моделей, при этом лишняя раз подтверждая тот факт, что самая сложная модель далеко не всегда является самой лучшей.

### Литература

1. Афанасьев, В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование: Учебник / В. Н. Афанасьев. - М.: Финансы и статистика, 2012. - 320 с.
2. Басовский, Л. Е. Прогнозирование и планирование в условиях рынка: Учебное пособие / Л. Е. Басовский и др. - М.: Инфра-М, 2018. - 352 с.
3. Бутакова, М. М. Экономическое прогнозирование: методы и приемы практических расчетов: Учебное пособие / М. М. Бутакова. - М.: КноРус, 2017. - 128 с.
4. Тихомиров, Н. П. Методы эконометрики и многомерного статистического анализа / Н. П. Тихомиров, Т. М. Тихомирова, О. С. Урмаев. - М.: Экономика, 2011. - 640 с.
5. Лукасевич, И. Я. Прогнозирование финансовых кризисов: методы, модели, индикаторы: Монография / И. Я. Лукасевич, Е. А. Федорова. - М.: Вузовский учебник, 2016. - 176 с.
6. Невская, Н. А. Макроэкономическое планирование и прогнозирование: Учебник и практикум для академического бакалавриата / Н. А. Невская. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 542 с.
7. Цыгичко, В. Н. Прогнозирование социально-экономических процессов / В. Н. Цыгичко. - М.: КД Либроком, 2017. - 240 с.
8. Шориков, А. Ф. Прогнозирование и оптимизация результата управления инвестиционным проектированием / А. Ф. Шориков, Е. В. Буценко. - М.: Ленанд, 2018. - 272 с.
9. Антилл, Н. Оценка компаний. Анализ и прогнозирование с использованием отчетности по МСФО / Н. Антилл. - М.: Альпина Паблишер, 2017. - 449 с.
10. Акаев, А. А. От эпохи великой дивергенции к эпохе великой конвергенции: Математическое моделирование и прогнозирование долгосроч. технологич. и экономич. развития / А. А. Акаев. - М.: Ленанд, 2015. - 352 с.

**Хоменко В. В., Орлов Ю. К. Сглаживание и прогнозирование на основе трендовых моделей.** Был проведен анализ основных видов сглаживания и прогнозирования на основе трендовых моделей. В ходе анализа наглядно показано, что любое прогнозирование можно проводить с их помощью. Используя общедоступные методы, а не сложные вычислительные программы, можно делать точное прогнозирование в различных областях. Каждый из методов прогнозирования является достаточным. Но не каждый из них учитывает всё необходимое в ходе прогнозирования. Поэтому, чтобы точнее прогнозировать на основе трендовых моделей, следует подходить к выбору метода в частном порядке. Но даже предложенные варианты прогнозирования полностью покрывают потребность, давая комплексную оценку на основе предыдущих периодов.

**Ключевые слова:** сглаживание, анализ, прогнозирование, тренды, модели, методы.

**Khomenko V., Orlov Yu. Smoothing and forecasting based on trend models.** The main types of smoothing and forecasting based on trend models were analyzed. In the course of the analysis, it was clearly shown that any forecasting can be carried out with their help. This, in turn, makes it possible to make accurate predictions in various fields using publicly available methods, rather than complex computing programs. The article proved the fact that each of the forecasting methods is sufficient. But not every one of them takes into account everything necessary in the course of forecasting. This, in turn, makes it clear that in order to make a more accurate forecast based on trend models that you should approach the method selection in a private way. But even in general, the proposed forecasting options fully cover the need, giving a comprehensive assessment based on previous periods.

**Keywords:** smoothing, analysis, forecasting, trends, models, methods.

Статья поступила в редакцию 15.05.2020  
Рекомендована к публикации профессором Федяевым О. И.

## Специализированный процессор для выполнения операций над числами с плавающей запятой

О. А. Авксентьева, Д. А. Николаев  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
[avksentievaolga@gmail.com](mailto:avksentievaolga@gmail.com), [dima.nikol.99@gmail.com](mailto:dima.nikol.99@gmail.com)

### Аннотация

*В статье предложен вариант модифицированного алгоритма сложения и вычитания чисел с плавающей запятой, ориентированного на реализацию высокотехнологичными аппаратными средствами. Представлена структура встроеного специализированного процессора и операционного блока, реализующего данный алгоритм. Архитектура разработанного процессора была адаптирована под технологию FPGA. Работоспособность устройства подтверждена тестированием и моделированием с помощью языка описания аппаратуры VHDL.*

### Введение

Одним из эффективных направлений повышения продуктивности компьютерных систем является переход к параллельным вычислениям, однако не все задачи могут решаться полностью или хотя бы частично параллельно [1]. С другой стороны, современный уровень развития микроэлектроники позволяет значительным образом повысить быстродействие вычислений за счёт использования эффективной элементной базы. Так, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) являются сегодня достойной альтернативой интегральным схемам специального назначения (ASIC – application-specific integrated circuit), с достойным быстродействием и меньшей стоимостью [2].

Большую долю современных вычислений составляют вычисления над числами с плавающей запятой (ПЗ). Также известно, что в большинстве устройств операции с плавающей запятой выполняются на программном уровне и занимают значительное процессорное время [3]. Т. о., ускорение выполнения этих операций значительным образом увеличит быстродействие широкого круга устройств, вплоть до систем реального времени среднего быстродействия.

Методика сложения и вычитания чисел с плавающей запятой заключается в выравнивании порядков и выполнения действия над мантиссами [4]. Выравнивание порядков выполняется как нахождение наибольшего из порядков исходных чисел посредством вычитания, а также циклическое наращивание порядка меньшего числа со сдвигом мантиссы этого числа вправо. Формат представленных чисел с ПЗ во многих моделях процессоров и сопроцессоров соответствует стандарту IEEE 754, при котором порядки чисел представляются со смещением, а мантиссы чисел – в прямом коде (ПК).

Представление мантисс чисел в ПК значительно облегчает алгоритмы умножения и

деления, однако усложняет алгоритмы сложения и вычитания, поскольку действия выполняются над модулями чисел. По этой причине знак результата вычисляется отдельно, а действие, выполняемое над мантиссами, зависит от исходного действия и знаков чисел. Так, при сложении двух чисел  $A$  и  $B$ , одно из которых – отрицательное, в действительности будет выполняться вычитание.

Модификация алгоритма сложения и вычитания чисел в формате с плавающей запятой сводится к выполнению операций над модулями (мантиссами и порядками одновременно) на двоичном сумматоре. Это становится возможным, когда порядок и мантиссу можно трактовать единым двоичным числом, представленным в каком-либо коде. Именно так можно трактовать числа, порядки которых представлены в смещённых кодах – положительном или отрицательном нуле, а мантисса – в ПК.

### Анализ исходного алгоритма

Операции сложения и вычитания чисел, представленных в формате с ПЗ записываются как:

$$C = A \ D \ B,$$

где  $D \in [0; 1]$  – код операции, ноль и единица которого соответствуют операциям сложения или вычитания;

$A, B, C$  – переменные в формате с ПЗ.

Переменные записываются в виде:

$$\begin{aligned} A &= Na' MA \cdot 2^{PA}; \\ B &= Nb' MB \cdot 2^{PB}; \\ C &= Nc' MC \cdot 2^{PC}, \end{aligned}$$

где  $Na, Nb, Nc$  – знаковые разряды чисел  $A, B, C$  соответственно;

$PA, PB, PC$  – порядки модулей  $A, B, C$ ;

$MA, MB, MC$  – нормализованные коды мантисс чисел  $A, B$  и  $C$ .

Нормализованные коды мантисс представлены в ПК как:

$$\begin{aligned} MA &= Na' |mA|; \\ MB &= Nb' |mB|; \\ MC &= Nc' |mC|. \end{aligned}$$

Сложение и вычитание чисел с ПЗ сводится к сложению / вычитанию мантисс чисел с равным порядком.

Стандартный алгоритм таких операций включает в себя следующие шаги: проверка мантисс на ноль, выравнивание порядков, выполнение действия над мантиссами и приведение результата к нормализованному виду.

Рассмотрим каждый из этапов подробнее.

На первом этапе мантиссы проверяются на ноль. Если  $MB = 0$ , то результат  $C = A$ , если  $MA = 0$ , то  $C = +B$  или  $C = -B$ , в зависимости от действия над мантиссами  $D$ .

В противном случае выполняется выравнивание порядков. В общем виде порядок результата  $PC = \max(PA, PB)$ . Порядки сравниваются, и:

- если  $PA = PB$ , то  $PC = PA$ ;
- если  $PA > PB$ , то  $PC = PA$ , а  $PB$  наращивается до  $PA$ , при этом  $MB$  сдвигается вправо на количество разрядов, равное разности порядков;
- если  $PB > PA$ , то аналогично  $PC = PB$ ,  $PA$  наращивается до  $PB$ , а  $MA$  сдвигается вправо [5].

На этом этапе возможно фиксирование потери мантиссы одного из исходных чисел.

После выравнивания порядков выполняется действие над модулями мантисс ( $Dm$ ) и определяется знак результата  $Nc$  [6]. Результирующее действие  $Dm$  зависит не только от действия  $D$ , но и от знаков чисел  $Na$  и  $Nb$ . Очевидно, что при выполнении операции  $A + (-B)$  необходимо выполнять вычитание модулей чисел. Результирующее действие совпадает с исходным действием, когда знаки мантисс одинаковые, и не совпадает при разных знаках мантисс, тогда  $Dm = D$  когда  $Na = Nb$  и  $Dm = \bar{D}$  когда  $Na \neq Nb$ .

Можно показать, что:

$$\begin{aligned} Dm &= D \cdot Na \cdot Nb + D \cdot \bar{Na} \cdot \bar{Nb} + \\ &+ \bar{D} \cdot \bar{Na} \cdot Nb + \bar{D} \cdot Na \cdot \bar{Nb} = \\ &= D \cdot (Na \cdot Nb + \bar{Na} \cdot \bar{Nb}) + \bar{D} \cdot (\bar{Na} \cdot Nb + Na \cdot \bar{Nb}) = \\ &= D \cdot (\overline{Na \oplus Nb}) + \bar{D} \cdot (Na \oplus Nb) = D \oplus Na \oplus Nb. \end{aligned}$$

Знак результата  $Nc$  зависит от  $Dm$  и результата выполнения действия, и вычисляется по-разному в зависимости от реализации конкретного алгоритма.

После выполнения действия результат подвергается проверке на нормализованность,

и при необходимости устраняется нарушение нормализации влево или вправо, поскольку, результат, как и исходные операнды, должен быть нормализованным числом [5].

В процессе выполнения арифметических операций могут возникнуть исключительные ситуации, некоторые из которых: положительное или отрицательное переполнение порядков, получение нуля, потеря значимости мантисс при сдвиге и прочие. В этих случаях в результат записываются общепринятые коды.

В результате можно отметить, что типовой алгоритм сложения / вычитания чисел с плавающей запятой является строго последовательным, что приводит к значительному снижению быстродействия.

### Математическое обоснование модификации алгоритма

Особенностью сложения / вычитания мантисс в ПК является необходимость определения знака отдельно от арифметической операции. При представлении порядка в смещенном виде смещение ( $Q_{см}$ ) определяется как  $Q_{см} = 2^{n-1}$ , где  $n$  – количество разрядов, отведённых под порядок. Смещённый порядок числа  $P_{смещ} = P + Q_{см}$  будет представлен как положительное число.

При представлении дополнительного кода (ДК) для  $n$  разрядов  $A_{ДК} = Na.XX...XX = 2^n + A$ .

$A_{ДК} = 2^n + A = 2^{n-1} \cdot (2^{n-1} + A)$ . Получаем, что число  $A_{ДК}$  представлено в ПН при смещении  $Q = 2^{n-1}$ .

Из этого соотношения видно, что для перехода из ДК в ПН при выполнении операций на двоичном сумматоре необходимо инвертировать знак числа.

Также известно, что коды для представления положительных чисел в ПК и ДК совпадают.

Т. о., при действии  $|A| + |\bar{B}| + 1$  (вычитании в ДК) на двоичном сумматоре получим результат в формате  $S_{ДК} = PC' mC$ . Из-за особенностей арифметики в ПН,  $PC$  без последующего инвертирования знака получим в ДК, а поскольку действие над мантиссами производится над модулями, то  $mC$  тоже представлена в ДК.

На входах сумматора  $a$ ,  $b$  и  $ein$  (где  $a$  – первый  $n$ -разрядный операнд;  $b$  – второй  $n$ -разрядный операнд;  $ein$  – одноразрядный входной перенос), при наборе данных  $a = mA$ ,  $b = m\bar{B}$ ,  $ein = 1$  (где  $mA$  – модуль мантиссы  $MA$ ,  $m\bar{B}$  – поразрядная инверсия модуля мантиссы  $MB$ ) результат на выходе сумматора представляется в формате  $E_{out} \cdot S$  (где  $E_{out}$  – одноразрядный выходной перенос сумматора;  $S_m$  –  $m$ -разрядный результат действия над операндами).

Определим сумматор, на котором было выполнено это действие, –  $SM_M$ , его выходной перенос –  $E_{outm}$ , а его результат на выходе –  $S_m$ .

Причём  $E_{outm}$  и  $S_m$  будут указывать на взаимное расположение чисел  $mA$  и  $mB$  на числовой прямой.

Пусть  $ZERO_M = 1$ , когда  $S_m = 0$ , т. е.:

$$ZERO_M = S_m(n-1) + S_m(n-2) + \dots + S_m(1) + S_m(0).$$

Отметим соотношения мантисс для различных комбинаций флагов  $E_{outm}$  и  $ZERO_M$ :

$E_{outm} \cdot ZERO_M$  в случае  $mA = mB$ ;

$E_{outm} \cdot \overline{ZERO_M}$  в случае  $mA > mB$ ;

$\overline{E_{outm}} \cdot \overline{ZERO_M}$  в случае  $mA < mB$ .

Получив  $E_{outm}$  и  $ZERO_M$ , можно определить, какая из мантисс по модулю больше. Но для того чтобы говорить о числах, а не только о мантиссах, необходимо также сравнить порядки, т. е. произвести действие на сумматоре при наборе данных  $a = PA$ ,  $b = \overline{PB}$ ,  $ein = 1$ .

Определим сумматор, на котором будет выполнено это действие, –  $SM_P$ , его выходной перенос –  $E_{outp}$ , а его результат –  $S_P$ .

Тогда, аналогично выполнению действия над мантиссами:

$E_{outp} \cdot ZERO_P$  в случае  $PA = PB$ ;

$E_{outp} \cdot \overline{ZERO_P}$  в случае  $PA > PB$ ;

$\overline{E_{outp}} \cdot \overline{ZERO_P}$  в случае  $PA < PB$ .

Также можно показать, что при наборе данных  $a = PA$ ,  $b = \overline{PB}$ ,  $ein = E_{outm}$  на том же сумматоре при  $E_{outm} = 1$  ситуация будет аналогичная. При  $E_{outm} = 0$  результат действия сумматора будет равен  $PA - PB - 1$  вместо правильного  $PA - PB$ .

Известно, что  $E_{outm} = 1$  в случаях, когда  $mA \geq mB$ . Также известно, что  $|A| > |B|$  при  $PA \geq PB$  и  $mA > mB$  или  $PA > PB$  и  $mA \geq mB$ .

Т. о., корректный результат вычитания порядков будет на выходе сумматора  $SM_P$  в том случае, когда  $mA > mB$ . Поскольку из результата выполнения действия на сумматоре  $SM_M$  нельзя получить больше полезной информации, можно связать два сумматора  $SM_P$  и  $SM_M$  через входной и выходной переносы и рассматривать число как единый модуль.

Введём переменную  $ZERO_S = ZERO_M \cdot ZERO_P$ . Покажем, что на следующих наборах можно проследить закономерности для чисел:

$|A| = |B|$  при  $E_{outp} \cdot ZERO_S$ ;

$|A| > |B|$  при  $E_{outp} \cdot \overline{ZERO_S}$ ;

$|A| < |B|$  при  $\overline{E_{outp}} \cdot \overline{ZERO_S}$ .

Зная, какое из чисел больше, легко определить знак результата. В некоторых случаях он не будет зависеть от действия, и никогда – от алгоритма реализации действия, что приведёт к упрощению процессорного устройства.

Пусть  $w = 1$  если  $|A| > |B|$ . Из сказанного выше,  $w = E_{outp} \cdot \overline{ZERO_S}$ .

Знак результата для рассматриваемых наборов определяется следующим образом:

$Nc = Na$  при  $|A| > |B|$ ;

$Nc = Nb$  при  $|A| < |B|$  &  $D = 0$ ;

$Nc = \overline{Nb}$  при  $|A| < |B|$  &  $D = 1$ .

$Nc = w \cdot Na + \overline{w} \cdot (Nb \oplus D)$ .

Для проверки модифицированного алгоритма была разработана программа на языке программирования C# с использованием технологии WPF. Исходными данными выступают два 32-разрядных числа и действие над ними. После вычислений пользователь получает результат выполнения арифметического действия в нормализованном виде, а также подробный отчёт о процессе выполнения действия. С использованием программы алгоритм был протестирован на всех наборах чисел и показал стабильную работоспособность. Результат выполнения программы представлен на рис. 1; UML-диаграмма модифицированного алгоритма представлена на рис. 2.

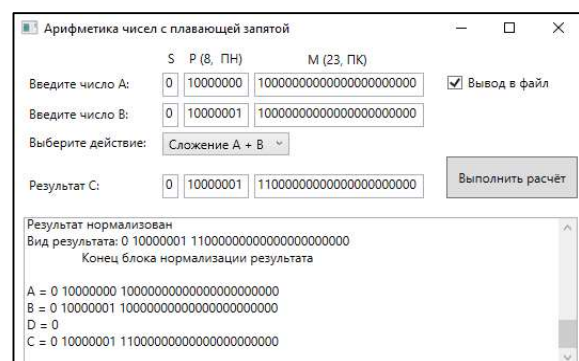


Рисунок 1 – Пример результата выполнения программы, работающей по модифицированному алгоритму



Рисунок 2 – UML-диаграмма  
модифицированного алгоритма

### **Разработка структуры специализированного процессора и операционного блока**

Структура специализированного устройства для арифметических операций над числами с ПЗ представлена на рис. 3.

Через шинный интерфейс устройство связано с вычислительной системой через шину данных (ШД), шину адреса (ША) и шину управления (ШУ). Поскольку устройство является модульным, кроме операционного и управляющего блока оно содержит также шинный интерфейс, взаимодействующий непосредственно с компьютерной системой.

В состав шинного интерфейса входит регистр состояния, характеризующий работу устройства, в том числе показывающий, что оно готово принять числа для вычислений, и последовательность регистров для хранения операндов. При получении сигнала на выполнение операции шинный интерфейс формирует команду, которая через локальную шину управления (ЛШУ) передаётся управляющему блоку устройства.

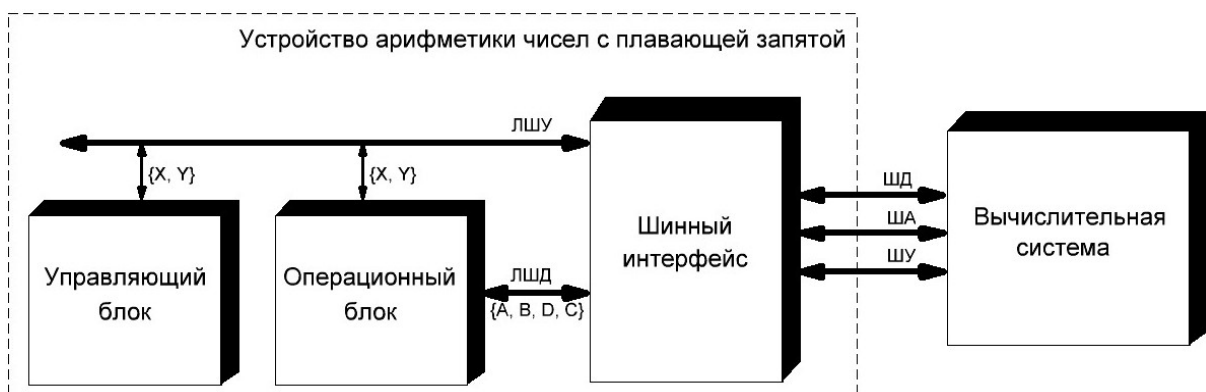


Рисунок 3 – Структура устройства арифметики чисел с плавающей запятой

Управляющий и операционный блок связываются через ЛШУ и передают друг другу последовательность осведомительных {X} и управляющих {Y} сигналов. Через локальную шину данных (ЛШД) операционный блок получает исходные данные для выполнения арифметической операции и возвращает результат.

Структура разрабатываемого операционного блока представлена на рис. 4. Согласно модифицированному алгоритму выполнение арифметического действия осуществляется следующим образом. От вычислительной системы операционный блок специализированного процессора получает два числа  $A$  и  $B$  (в формате с плавающей запятой) и действие над числами  $D$ .

Мантиссы и порядки этих чисел подаются в блок обработки мантисс и порядков соответственно; выполняется их сравнение как единых двоичных модулей. Результаты сравнения чисел подаются в схему, расположенную вне

блоков, где определяется множество флагов, среди которых – признак  $w$  и знак результата  $Nc$ .

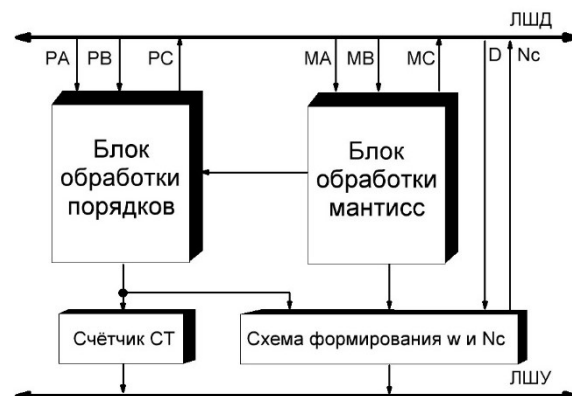


Рисунок 4 – Структура операционного блока специализированного процессора

Полученное значение разницы между порядками заносится в счётчик. Параллельно определяется значение порядка результата и, в зависимости от значения счётчика, мантисса меньшего из чисел по модулю сдвигается вправо. Поскольку порядки чисел напрямую не учувствуют в вычислениях, а лишь косвенно влияют на мантиссы, порядок меньшего числа можно не менять.

Арифметическое действие над модулями мантисс выполняется известным образом, а также реализуется нормализация результата.

Ускорение работы устройства осуществляется за счёт следующих факторов:

- знак результата определяется во время, а не после выполнения операции;

- при выравнивании порядков не нужно каждый раз инкрементировать меньший порядок;
- присваивание порядка результата и сдвиги мантисс происходят параллельно;
- проверка на равенство порядков выполняется медленнее, чем проверка на ноль счётчика.

Как было отмечено на рис. 4, операционный блок логически делится на две части – блоки обработки порядков и обработки мантисс. В каждом из этих блоков должны содержаться регистры для порядков или мантисс исходных чисел и результата, а также сумматоры для выполнения арифметических операций. Взаимодействие элементов операционного блока специализированного процессора представлено на рис. 5.

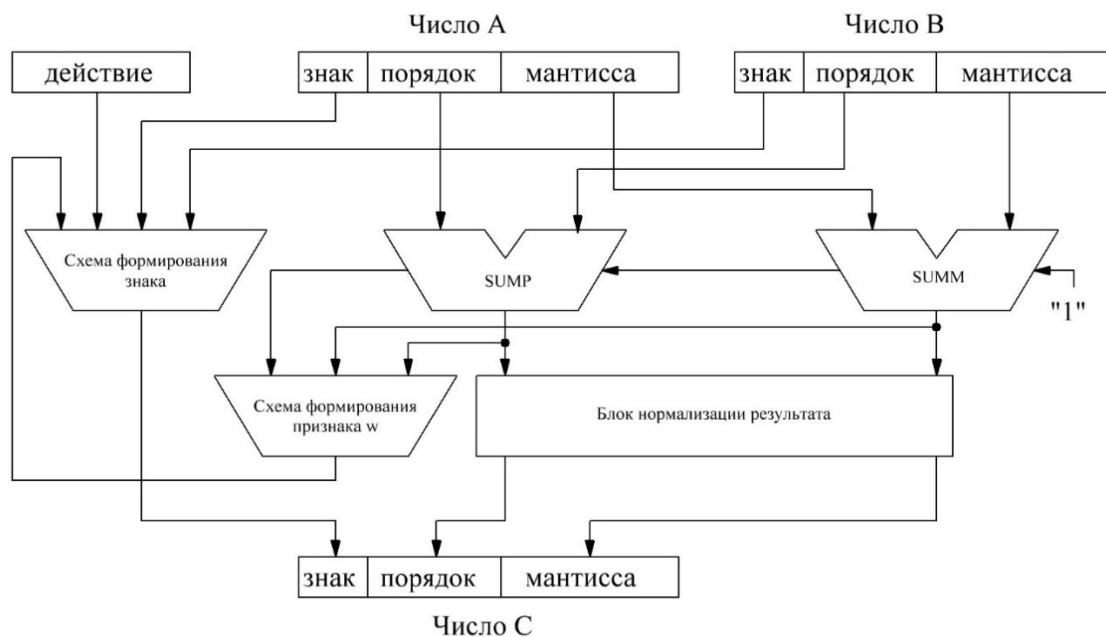


Рисунок 5 – Взаимодействие элементов операционного блока специализированного процессора

Мантиссы и порядки чисел поступают на сумматоры, после чего выполняется сравнение чисел, представленных единым двоичным модулем посредством соединения сумматора мантисс с сумматором порядков через выходной и входной перенос. Связь между блоками формирует выходной перенос сумматора мантисс. Вне блоков располагаются три основных элемента – схема формирования признака  $w$ , схема формирования знака результата и блок нормализации результата.

Кроме сравнения необходимо также выполнить арифметические действие и нормализовать результат. Арифметическое действие над мантиссами выполняется по любому из алгоритмов арифметики в ПК на соответствующем сумматоре.

Нормализация результата выполняется посредством сдвигов мантиссы результата и инкрементированием / декрементированием порядка результата. Сдвиги мантиссы могут быть

реализованы внутри регистра мантиссы результата, тогда как инкрементирование и декрементирование порядка – на сумматоре обработки порядков. Т. о., используется минимум аппаратных средств, которые позволяют выполнять необходимые операции.

Регистры порядка и мантиссы результата необходимо синтезировать, учитывая возможности записи в них кодов полного нуля и положительного / отрицательного переполнения при получении соответствующих результатов.

### Моделирование работы процессора на языке VHDL

В качестве средства моделирования была выбрана среда Active-HDL. Эта среда предназначена для разработки и анализа аппаратных средств с использованием специального языка описания аппаратуры VHDL, ставшего сегодня практически стандартом описания и моделирования

для программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и FPGA-реализаций специализированной аппаратуры [7].

Процесс моделирования сводится к разработке описания отдельных операционных

блоков и созданию в среде функциональной схемы устройства [8].

На рис. 6 приведен пример VHDL-кода с VHDL-описанием регистра RPC, который хранит порядок результата.

```
-- Description : Регистр порядка результата RPC
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
-- Описание входов и выходов
ENTITY RPC IS
    PORT(
        CLK : IN STD_LOGIC; -- Синхронизация
        LoadAB : IN STD_LOGIC; -- Сигнал загрузки порядка A или B
        LoadSM : IN STD_LOGIC; -- Сигнал загрузки значения с сумматора
        CPP : IN STD_LOGIC; -- Сигнал загрузки кода переполнения
        CZERO : IN STD_LOGIC; -- Сигнал загрузки кода полного нуля
        inA : IN STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0); -- Порядок A
        inB : IN STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0); -- Порядок B
        inSM : IN STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0); -- Значение сумматора
        outQ : OUT STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0) -- Значение регистра
    );
END RPC;
-- Описание архитектуры
ARCHITECTURE RPC OF RPC IS
BEGIN
    PROCESS(CLK, LoadAB, LoadSM, CPP, CZERO, SMP0)
    BEGIN
        -- При фронте сигнала синхронизации
        IF CLK'Event AND CLK = '1' THEN
            -- Загрузка в регистр значения PA или PB в зависимости от старшего бита сумматора
            IF LoadAB = '1' THEN
                IF inSM(7) = '1' THEN
                    outQ <= inB;
                ELSE
                    outQ <= inA;
                END IF;
            END IF;
            -- Загрузка значения с сумматора при устранении ННЛ и ННП
            IF LoadSM = '1' THEN
                outQ(6 DOWNTO 0) <= inSM(6 DOWNTO 0);
                -- Для преобразования из ДК в ПН инвертируем старший разряд
                outQ(7) <= NOT inSM(7);
            END IF;
            -- Загрузка кода переполнения
            IF CPP = '1' THEN
                outQ <= "11111111";
            END IF;
            -- Загрузка кода полного нуля
            IF CZERO = '1' THEN
                outQ <= "00000000";
            END IF;
        END IF;
    END PROCESS;
END RPC;
```

Рисунок 6 – Описание регистра порядка RPC на языке VHDL

VHDL-описание любого компонента состоит из двух логических частей: описания контактов (входов и выходов) компонента и описания его архитектуры. Для тактируемых устройств описание архитектуры сводится к описанию реакций на каждый из управляющих

сигналов, что и показано на рис. 6. Для нетактируемых устройств, таких как сумматоры, описание архитектуры сводится к описанию их поведения с помощью логических функций. Схема операционного блока устройства показана на рис. 7, результаты моделирования – на рис. 8.

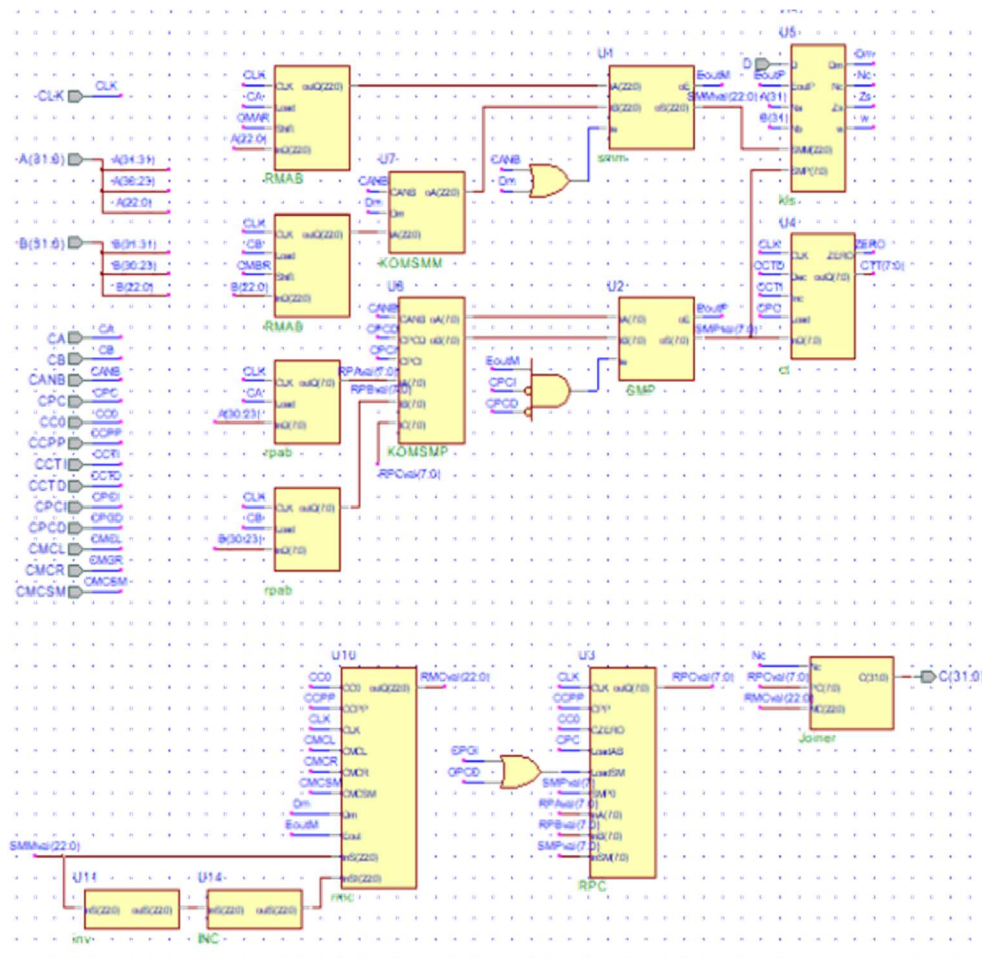


Рисунок 7 – Схема операционного блока устройства, описанная в Active-HDL

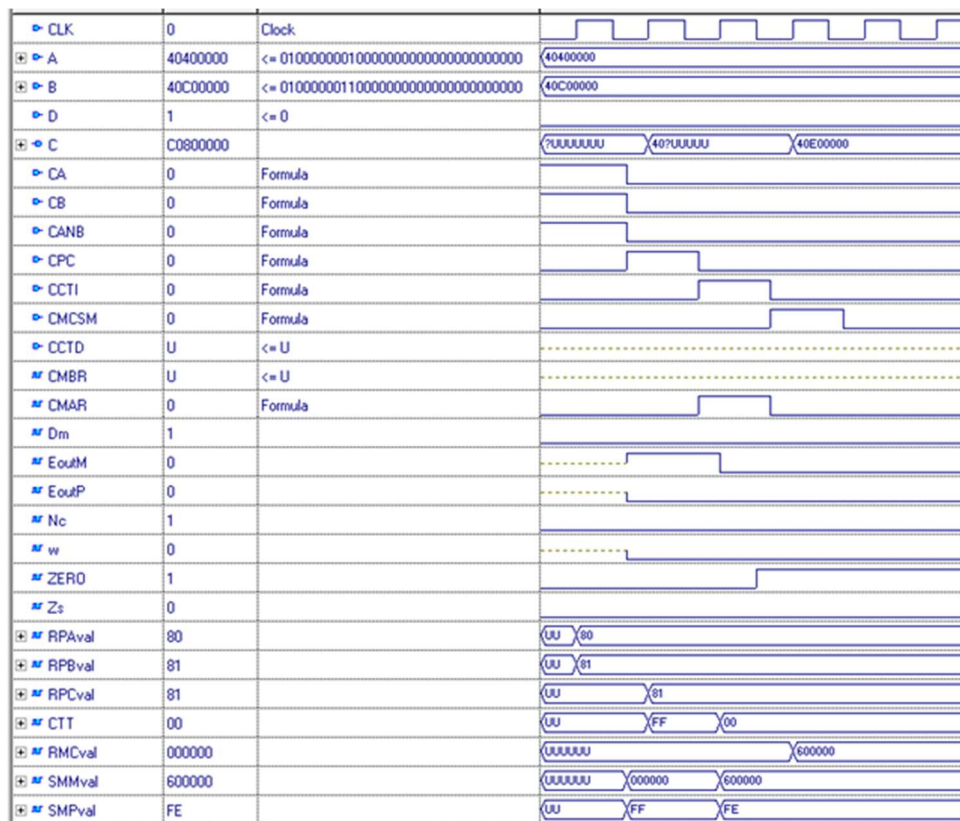


Рисунок 8 – Результат моделирования операционного блока устройства в Active-HDL

Результаты моделирования показывают процесс сложения ( $D = 0$ ) двух чисел  $A$  и  $B$ , где  $A = 40400000 = 0.10000000.10000000... = 0,5 \cdot 2^0 = 0,5$ ;  
 $B = 40C00000 = 0.10000001.10000000... = 0,5 \cdot 2^1 = 1$ ;  
результат  $C = 40E00000 = 0.10000001.11000000... = 0,75 \cdot 2^1 = 1,5$ .

Видно, что правильный результат является нормализованным числом и устанавливается на выходе устройства через три такта синхронизации.

### Использование технологии FPGA

Для построения модели устройства с помощью технологии FPGA использовалась программа Intel Quartus Prime. Данная система автоматизированного проектирования позволяет синтезировать различные устройства по их описанию, в том числе с помощью VHDL, для различных фирм и семейств FPGA [9].

Для моделирования FPGA использовался VHDL-код операционного блока, разработанный в результате тестирования устройства в среде Active-HDL.

В качестве физической оболочки устройства была выбрана плата модели 10M02DCU324A7G семейства MAX10 фирмы Altera. Эта плата была выбрана исходя из большого количества контактов операционного блока – три 32-разрядных числа, синхронизация и множество управляющих сигналов [10].

Результаты компиляции разработанного проекта показаны на рис. 9.

| Flow Summary                       |                                             |
|------------------------------------|---------------------------------------------|
| <<Filter>>                         |                                             |
| Flow Status                        | Successful - Wed Jun 10 20:29:08 2020       |
| Quartus Prime Version              | 19.1.0 Build 670 09/22/2019 SJ Lite Edition |
| Revision Name                      | FPUmax10                                    |
| Top-level Entity Name              | FPUmax10                                    |
| Family                             | MAX 10                                      |
| Device                             | 10M02DCU324A7G                              |
| Timing Models                      | Final                                       |
| Total logic elements               | 216 / 2,304 (9 %)                           |
| Total registers                    | 94                                          |
| Total pins                         | 111 / 160 (69 %)                            |
| Total virtual pins                 | 0                                           |
| Total memory bits                  | 0 / 110,592 (0 %)                           |
| Embedded Multiplier 9-bit elements | 0 / 32 (0 %)                                |
| Total PLLs                         | 0 / 2 (0 %)                                 |
| UFM blocks                         | 0 / 1 (0 %)                                 |
| ADC blocks                         | 0                                           |

Рисунок 9 – Результат компиляции проекта для FPGA в среде Intel Quartus Prime

Результаты компиляции проекта показывают, что при построении операционного блока устройства используется порядка 9 % логических элементов. Это позволяет сделать вывод о возможности построения встраиваемого устройства целиком (с управляющим блоком и шинным интерфейсом) на одной плате с возможностью расширения функционала устройства вплоть до длинных операций умножения и деления.

Максимальная частота работы FPGA модели 10M02DCU324A7G составляет 450 МГц при цене порядка 12 евро [10]. В сравнении с характеристиками сопроцессора Intel 8087 для выполнения арифметических операций с ПЗ (максимальная частота – 10 МГц, цена – порядка 20 евро) устройство показывает ускорение вычислений примерно в 45 раз при двойном снижении стоимости.

Стоит также отметить, что для наглядности разрабатываемого операционного блока был использован параллельный способ ввода-вывода, то есть любой из сигналов имел собственный физический контакт. Однако, при разработке управляющего блока устройства и шинного интерфейса целесообразно организовать шинный последовательный ввод-вывод [11]. Тогда можно выбрать плату с меньшим количеством контактов и подходящим множеством логических элементов, но с большей тактовой частотой, что позволит ещё сильнее повысить быстродействие устройства.

### Выводы

Арифметические операции над числами с плавающей запятой (обработка порядков, выполнение действия над мантиссами, нормализация и округление результата), а также длинные операции умножения и деления требуют значительного процессорного времени для их выполнения на программном уровне, что особенно актуально в системах реального времени. Реализация этих операций на аппаратном уровне значительно повышает быстродействие вычислительных систем.

Предложенный модифицированный алгоритм сложения / вычитания чисел с плавающей запятой и его аппаратная реализация в виде специализированного процессора на ПЛИС будет способствовать повышению продуктивности вычислений за счёт эффективности алгоритма, включающего элементы параллельности выполнения операций, и использования высокотехнологичной элементной базы. Предложенное решение позволяет выполнять операции сложения и вычитания с плавающей запятой на модульном специализированном процессоре, встраиваемом в компьютерную систему.

Проведённое тестирование работы операционного блока спецпроцессора наглядно показывает возможность построения устройства. Реализация устройства на ПЛИС позволяет повысить быстродействие вычислений. Результаты моделирования работы специализированного процессора показали уменьшение времени выполнения операций примерно в 45 раз.

### Литература

1. Карцев, М. А. Арифметика цифровых машин / М. А. Карцев; – Москва: Наука, 1969. – 576 с.
2. Digital Logic and Microprocessor Design with Interfacing, second edition / Enoch O. Hwang, La Sierra University, Riverside, 2016, – 512 p.
3. The Intel microprocessors 8086 / 8088, 80186 / 80188, 80286, 80386, 80486, Pentium, Pentium Pro Processor, Pentium II, Pentium III, Pentium 4, and Core 2 with 64-Bit Extensions. Architecture, Programming, and Interfacing. Eighth Edition. / Barry B. Brey, editor Vernon Anthony – Upper Saddle River, New Jersey – 2011, – 944 p.
4. Structured Computer Organisation. / Andrew S. Tanenbaum, Todd Austin – Prentice Hall – 2013, – 796 p.
5. Зыков, А. Г. Арифметические основы ЭВМ. Учебное пособие / А. Г. Зыков, В. И. Поляков; – Санкт-Петербург: Университет ИИТМО, 2016. – 141 с.
6. Харрис, Д. М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / Д. М. Харрис, С. Л. Харрис, перевод с англ. «Digital Design and Computer Architecture by David Money Harris and Sarah L Harris». – English Edition.: Morgan Kaufman, 2012. – 1662 с.
7. Орлов, С. А. Организация ЭВМ и систем. Фундаментальный курс по архитектуре и структуре современных компьютерных средств. 2-е издание / С. А. Орлов, Б. Я. Цилькер; – Санкт-Петербург, 2011. – 149 с.
8. Barkalov A. Logic Synthesis for FPGA-Based Control Units — Structural Decomposition in Logic Design / A. Barkalov, L. Titarenko, K. Mielcarek, S. Chmielewski // Lecture Notes in Electrical Engineering, V. 636 – Germany, Berlin: Springer, 2020. – 240 p
9. FPGA for Dummies 2nd Intel Special Edition / Andrew Moore with Ron Wilson, Editon-In-Chief and Intel Programmable Solutions Group, John Wiley & Sons, Inc. – 2017, – 53 p.
10. Intel 10M02DCU324A7G MAX10 FPGA Overview / Intel Corporation, 2017, – 54 p.
11. Авксентьева, О. А. Разработка виртуальной лаборатории для изучения и моделирования архитектур процессорных элементов / О. А. Авксентьева, Р. В. Мальчева // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2016): сб. науч. тр. I науч.-практ. конф, 16–17 ноября 2016 г, Донецк – Донецк, ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», 2016. – С. 102–107.

*Авксентьева О. А., Николаев Д. А. Специализированный процессор для выполнения операций над числами с плавающей запятой. В статье предложен вариант модифицированного алгоритма сложения и вычитания чисел с плавающей запятой, ориентированного на реализацию высокотехнологичными аппаратными средствами. Представлена структура встроенного специализированного процессора и операционного блока, реализующего данный алгоритм. Архитектура разработанного процессора была адаптирована под технологию FPGA. Работоспособность устройства подтверждена тестированием и моделированием с помощью языка описания аппаратуры VHDL.*

**Ключевые слова:** архитектура специализированного процессора, числа с плавающей запятой, прямой код, положительный ноль, VHDL, ПЛИС, FPGA.

*Avksentieva. O., Nikolaev D. Specialized processor for performing operations on floating point numbers. There is a variant of the modified algorithm for addition and subtraction of floating point numbers, focused on the implementation of high-tech hardware. The structure of an embedded specialized processor and an operating unit that implemented this algorithm was presented. The architecture of the developed processor was adapted for FPGA technology. Device operability is confirmed by testing and simulation using the VHDL hardware description language.*

**Keywords:** architecture of a specialized processor, floating point numbers, sign and magnitude method, biased exponent, VHDL, FPGA.

Статья поступила в редакцию 19.04.2020  
Рекомендована к публикации профессором Аноприенко А. Я

# **Компьютерные науки**

## Коммутативные полугруппы с ограничениями на подпрямо неразложимые полигоны

И. Б. Кожухов

Московский институт электронной техники,  
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва  
[kozuhov\\_i\\_b@mail.ru](mailto:kozuhov_i_b@mail.ru)

### Аннотация

В связи с работой Кожухова И. Б. и Халиуллиной А. Р. 2014 г. возник вопрос: будут ли ограничены в совокупности порядки подпрямо неразложимых полигонов над коммутативной равномерно локально конечной полугруппой? Автор даёт положительный ответ на этот вопрос для полигонов без нуля и полигонов с двумя нулями. В статье рассмотрены равномерно периодические коммутативные полугруппы и полигоны над ними. Доказано, что среди этих полигонов всякий подпрямо неразложимый полигон с двумя нулями двухэлементен, а подпрямо неразложимые полигоны без нулей имеют ограниченные в совокупности количества элементов.

### Введение

Полугруппой называется множество  $S$  с одной ассоциативной бинарной операцией. Полигон над полугруппой  $S$  [1] – это множество, на котором действует полугруппа  $S$ , т. е. определено отображение  $X \times S \rightarrow X$ ,  $(x, s) \mapsto xs$ , такое, что  $x(st) = (xs)t$  при всех  $x \in X$ ,  $s, t \in S$ . Известно, что полигон над полугруппой является алгебраической моделью автомата [2].

Сама полугруппа  $S$  является полигоном над  $S$ . обозначим этот полигон  $S_S$ .

Цель данной работы – доказать, что если  $S$  – равномерно периодическая коммутативная полугруппа, то все подпрямо неразложимые полигоны  $X$  над  $S$ , не имеющие нулей, конечны, причём  $|X| \leq N$  для некоторого  $N$ , не зависящего от  $X$ , а для подпрямо неразложимого полигона  $X$  с двумя нулями  $\theta_1$  и  $\theta_2$  имеет место равенство  $X = \{\theta_1, \theta_2\}$ . В работе [3] было доказано, что подпрямо неразложимый полигон (над любой полугруппой) имеет не более двух нулей. Т. о., осталось невыясненным, будут ли в этом случае ограничены в совокупности количества элементов подпрямо неразложимого полигона  $X$  над  $S$ , если  $X$  имеет ровно один нуль.

### Основные обозначения

Пусть  $S$  – полугруппа, т. е. множество с бинарной операцией, удовлетворяющей закону ассоциативности  $(ab)c = a(bc)$  при всех  $a, b, c \in S$ . Обозначим через  $S^1$  наименьшую полугруппу с единицей, содержащую  $S$  в качестве подполугруппы, т. е.

$$S^1 = \begin{cases} S, & \text{если } S \text{ имеет единицу,} \\ S \cup \{1\}, & \text{если } S \text{ не имеет единицы.} \end{cases}$$

Основные сведения из теории полугрупп можно найти в монографии [4], из теории

полигонов – в [1], из универсальной алгебры – в [5].

Полигон  $X$  над полугруппой  $S$  называется *простым*, если он не имеет нетривиальных подполигонов, т. е.  $xS^1 = X$  для всех  $x \in X$ .

Пусть  $X$  – произвольное множество. Обозначим через  $T(X)$  множество всех отображений  $\alpha : X \rightarrow X$  с умножением, определяемым правилом  $x(\alpha\beta) = (x\alpha)\beta$  при  $x \in X$ ,  $s, t \in S$ .

Пусть  $X$  – полигон над полугруппой  $S$ . Введём для каждого  $a \in S$  отображение  $\varphi_a : X \rightarrow X$ , полагая  $x\varphi_a = xa$  для всех  $x \in X$ . Нетрудно видеть, что отображение  $\Phi : S \rightarrow T(X)$ ,  $a \mapsto \varphi_a$  является гомоморфизмом полугруппы  $S$  в полугруппу  $T(X)$ . Пусть  $\rho = \ker \Phi$  – ядро отображения  $\Phi$  и  $\bar{S} = S / \rho$  – фактор-полугруппа. Тогда  $X$  можно будет рассматривать как полигон над полугруппой  $\bar{S}$ . Полигон  $X$  над  $S$  и полигон  $X$  над  $\bar{S}$  во многом схожи. В частности, они имеют одну и ту же решётку конгруэнций:  $\text{Con}_S X = \text{Con}_{\bar{S}} X$ .

### Равномерно локально конечные и равномерно периодические полугруппы

Для полугруппы  $S$  и элементов  $a_1, \dots, a_n \in S$  пусть  $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$  обозначает подполугруппу, порождённую элементами  $a_1, \dots, a_n$ . При  $n = 1$  получаем циклическую подполугруппу  $\langle a \rangle = \{a, a^2, a^3, \dots\}$ . Полугруппа называется *периодической*, если подполугруппа  $\langle a \rangle$  конечна для любого  $a \in S$ , и *локально конечной*, если все подполугруппы  $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$

конечны. Назовём полугруппу  $S$  *равномерно периодической*, если  $|\langle a \rangle| \leq N$  для некоторого  $N \in \mathbb{N}$  и всех  $a \in S$ . Нетрудно видеть, что равномерная периодичность полугруппы равносильна выполнению в ней тождества  $a^{m+r} = a^m$  при некоторых  $m \geq 0, r > 0$ . Назовём полугруппу  $S$  *равномерно локально конечной*, если существует функция  $f(n)$  такая, что  $|\langle a_1, \dots, a_n \rangle| \leq f(n)$  для любых  $a_1, \dots, a_n \in S$ . Проверим, что для коммутативной полугруппы  $S$  равномерная периодичность влечёт равномерную локальную конечность. Действительно, пусть  $a_1, \dots, a_n \in S$ . Т. к.  $S$  равномерно периодическая, то  $|\langle a \rangle| \leq m+r-1$  при всех  $a \in S$ . Т. к.  $S$  коммутативна, то любой элемент из  $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$  представим в виде  $a_1^{t_1} \dots a_n^{t_n}$ . Имеем:  $t_1, \dots, t_n \leq m+r-1$ . Следовательно,  $|\langle a_1, \dots, a_n \rangle| \leq (m+r-1)^n$ .

### Подпрямо неразложимые полигоны

Универсальная алгебра  $A$  (любой сигнатуры) называется *подпрямо неразложимой*, если она не раскладывается в нетривиальное подпрямое произведение алгебр. Интерес к подпрямо неразложимым алгебрам объясняется замечательной теоремой Биркгофа [5, теорема 7.3], утверждающей, что любая алгебра является подпрямым произведением подпрямо неразложимых алгебр.

В работе [6] было доказано, что над конечной полугруппой  $S$  все подпрямо неразложимые полигоны также конечны, причём если  $|S| = n$ , то  $|X| \leq 2^{n+1}$  для любого подпрямо неразложимого полигона  $X$ . В работе [7] изучался класс  $K$  полугрупп, для которых существует такое  $n$ , что все полигоны аппроксимируются конечными полигонами, содержащими каждый не более, чем  $n$  элементов. Данное требование равносильно тому, что подпрямо неразложимые полигоны содержат не более, чем  $n$  элементов каждый. Этот класс содержит все конечные полугруппы.

Обозначим через  $K_n$  класс полугрупп, над которыми каждый подпрямо неразложимый полигон содержит не более, чем  $n$  элементов. Тогда будем иметь: любая полугруппа из  $n$  элементов принадлежит классу  $K_{2^n+1}$ . Интересно отметить, что любая полурешётка (т. е. коммутативная полугруппа идемпотентов), даже бесконечная, принадлежит классу  $K_2$  [8].

В работе [7] содержится много информации о полугруппах, принадлежащих классу  $K$ . В частности, полугруппы этого класса финитно аппроксимируемы вместе со всеми своими гомоморфными образами. В этой работе

рассматривался и более широкий класс полугрупп – полугруппы, над которыми все полигоны аппроксимируются конечными, но порядки этих полигонов не обязательно ограничены в совокупности.

В работе [7] было доказано, что всякая полугруппа класса  $K$  равномерно локально конечна (более того, теорема 9 из [7] утверждает, что уже из того факта, что полигон  $S_S$  аппроксимируется конечными полигонами ограниченных в совокупности порядков, следует равномерная локальная конечность полугруппы  $S$ ).

Возникает вопрос: верно ли обратное: то есть будет ли всякая равномерно локально конечная полугруппа принадлежать классу  $K$ ? Автор полагает, что ответ на данный вопрос положительный для коммутативных полугрупп, а результаты настоящей работы, помогут получить полное решение проблемы в случае коммутативной полугруппы.

Для получения основного результата нам нужно доказать ряд вспомогательных утверждений.

**Лемма 1.** Пусть  $S$  – коммутативная полугруппа, удовлетворяющая тождеству  $a^{m+r} = a^m$ . Тогда существует такое  $j$ , что  $a^j$  – идемпотент для каждого  $a \in S$ .

*Доказательство.* Очевидно, существует единственное число  $j \in \{m, m+1, m+r-1\}$  такое, что  $j \equiv 0 \pmod{r}$ . Непосредственно проверяется, что  $a^j = a^{2j}$ .

Для множества  $X$  определим отношение равенства на  $X$ , полагая  $\Delta_X = \{(x, x) \mid x \in X\}$ . Если  $X$  – полигон, то  $\Delta_X$  – наименьшая конгруэнция на  $X$ . Конгруэнция  $\Delta_X$  называется тривиальной, остальные – нетривиальными. Полигон, содержащий ровно один элемент, называется тривиальным, другие полигоны – нетривиальными. Известно, что подпрямо неразложимая универсальная алгебра, если она содержит более одного элемента – это в точности такая, которая содержит наименьшую нетривиальную конгруэнцию (другими словами: пересечение нетривиальных конгруэнций нетривиально). Отсюда нетрудно вывести, что любой нетривиальный полигон имеет *ядро* – наименьший нетривиальный подполигон.

**Лемма 2.** Пусть  $X$  – подпрямо неразложимый полигон над коммутативной полугруппой  $S$ . Если  $X$  имеет ровно два нуля  $\theta_1, \theta_2$ , то  $X = \{\theta_1, \theta_2\}$ .

*Доказательство.* Т. к.  $\{\theta_1, \theta_2\}$  – подполигон, то  $K = \{\theta_1, \theta_2\}$  – ядро полигона  $X$ . Пусть существует элемент  $x \in X \setminus K$ . Т. к.  $x$  – не ноль, то  $|xS^1| > 1$ . Следовательно,  $xS^1 \supseteq \{\theta_1, \theta_2\}$ . Это означает, что  $xa = \theta_1, xb = \theta_2$  при некоторых  $a, b \in S$ . Ввиду коммутативности полугруппы  $S$  имеем:  $\theta_1 = \theta_1 b = xab = xba = \theta_2 a = \theta_2$ , что

невозможно.

**Лемма 3.** Пусть  $X$  – подпрямо неразложимый простой полигон над коммутативной полугруппой  $S$ , удовлетворяющей тождеству  $a^{m+r} = a^m$ . Тогда для каждого  $a \in S$  отображение  $\varphi_a : X \rightarrow X$  взаимно однозначно.

*Доказательство.* Т. к.  $S$  коммутативна, то  $Xas = Xsa \subseteq Xa$  при любых  $a, s \in S$ , поэтому  $Xa$  – подполигон. Т. к.  $X$  простой, то  $Xa = X$  при всех  $a \in S$ . Следовательно, отображение  $\varphi_a : x \mapsto xa$  сюръективно. Докажем, что оно инъективно. Пусть  $xa = ya$ . Тогда  $xa^j = ya^j$  для всех  $j$ . По лемме 1  $j$  можно выбрать так, чтобы  $a^j$  было идемпотентом. Положим  $e = a^j$ . Тогда  $xe = ye$ . Т. к.  $e$  – идемпотент и  $X = Xe$ , то  $u = ue$  для всех  $u \in X$ . Следовательно, будем иметь:  $x = xe = ye = y$ . Т. о., отображение  $\varphi_a$  инъективно.

**Лемма 4.** Пусть  $X$  – подпрямо неразложимый полигон над коммутативной полугруппой  $S$ , удовлетворяющей тождеству  $a^{m+r} = a^m$ . Если  $X$  без нулей, то  $X$  – простой полигон.

*Доказательство.* Утверждение очевидно, если  $|X| \leq 2$ , поэтому далее будем считать, что  $|X| \geq 3$ . Тогда  $X$  имеет ядро, обозначим его через  $K$ . Понятно, что достаточно доказать, что  $X = K$ .

Пусть  $x \in X \setminus K$ . Т. к.  $X$  без нулей, то  $|xS^1| > 1$ . Следовательно,  $xS^1 \supseteq K$ . Пусть  $a \in S^1$  таково, что  $xa \in K$ . Т. к.  $x \notin K$ , то  $a \in S$ . Найдём такое  $j$ , что элемент  $e = a^j$  – идемпотент. Имеем:  $xe \in K$ . Т. к.  $K$  – простой полигон, то  $xe \cdot S = K$ . Т. к.  $S$  коммутативна, то  $ye = y$  для всех  $y \in K$ . Пусть  $\rho_1 = \{(x, y) \in X \times X \mid xe = ye\}$ ,  $\rho_2 = (K \times K) \cup \Delta_X$ . Очевидно,  $\rho_1, \rho_2 \in \text{Con } X$ . Т. к.  $x \notin K$ , то  $(x, xe) \in \rho_1 \setminus \rho_2$ . Нетрудно проверить, что  $\rho_1, \rho_2 \neq \Delta_X$  и  $\rho_1 \cap \rho_2 = \Delta_X$ . Но это противоречит тому, что  $X$  – подпрямо неразложимый полигон. Полученное противоречие показывает, что  $X = K$ .

**Лемма 5.** Пусть  $X$  – подпрямо неразложимый полигон над коммутативной полугруппой  $S$ , удовлетворяющей тождеству  $a^{m+r} = a^m$ . Если  $X$  без нулей, то  $|X| = p^t$  для некоторого простого числа  $p$  и натурального числа  $t$ , причём  $p^t \leq r$ .

*Доказательство.* Рассмотрим гомоморфизм  $\Phi : S \rightarrow T(X)$ , определённый в начале работы. Положим  $S_1 = \Phi(S)$ . Т. к. полигон  $X$  подпрямо неразложим как полигон над полугруппой  $S$ , то он также подпрямо неразложим и как полигон над полугруппой  $S_1$ . Полугруппа  $S_1$  – гомоморфный образ полугруппы  $S$ , поэтому также коммутативна и удовлетворяет тождеству  $a^{m+r} = a^m$ . Более того, так как элементы

полугруппы  $S_1$  – взаимно однозначные отображения (по лемме 3), то  $S_1$  – группа. Тождество  $a^{m+r} = a^m$  для группы  $S_1$  превращается в тождество  $a^r = e$ , где  $e$  – единица группы  $S_1$  (тождественное отображение). Кроме того,  $X$  – унитарный полигон над группой  $S_1$  (в том смысле, что  $xe = x$  при всех  $x \in X$ ). Порядки элементов группы  $S_1$  являются делителями числа  $r$  (ввиду тождества  $a^r = e$ ), поэтому экспонента группы  $S_1$  – также делитель числа  $r$ . По теореме 7 из работы [9] мы теперь получаем, что  $|X| = p^t \leq r$ .

Приведём теперь основной результат нашей работы.

**Теорема.** Если  $S$  – равномерно локально конечная коммутативная полугруппа, то порядки подпрямо неразложимых полигонов без нулей и с двумя нулями ограничены в совокупности.

*Доказательство.* Т. к. равномерно локально конечная полугруппа является равномерно периодической, то полугруппа  $S$  удовлетворяет тождеству  $a^{m+r} = a^m$ . Пусть  $X$  – подпрямо неразложимый полигон над  $S$ . Если  $X$  имеет два нуля, то по лемме 2  $|X| = 2$ . Если  $X$  без нулей, то по лемме 5  $|X| \leq r$ . Теорема доказана.

## Выводы

В статье рассмотрены равномерно периодические коммутативные полугруппы и полигоны над ними. Доказано, что среди этих полигонов всякий подпрямо неразложимый полигон с двумя нулями двухэлементен, а подпрямо неразложимые полигоны без нулей имеют ограниченные в совокупности количества элементов. Т. о., автор даёт положительный ответ на вопрос «будут ли ограничены в совокупности порядки подпрямо неразложимых полигонов над коммутативной равномерно локально конечной полугруппой?» для полигонов без нуля и полигонов с двумя нулями.

## Литература

1. Kilp, M. Monoids, acts and categories / M. Kilp, U. Knauer, A. V. Mikhaev. - N. Y. – Berlin, W. de Gruyter, 2000. – 529 pp.
2. Кудрявцев, В. Б. Введение в теорию абстрактных автоматов / В. Б. Кудрявцев, А. С. Подколзин, Ш. Ушчумлич. - М.: МГУ, 1985. - 174 с.
3. Ройз, Е. Н. О подпрямо неразложимых монахах // Межвуз. научн. сборник «Упорядоченные множества и решётки». - Саратов, 1974. - вып. 2. - С. 80-84.
4. Клиффорд, А. Алгебраическая теория полугрупп, тт. 1, 2. / А. Клиффорд, Г. Престон. - Перевод с англ.: М.: Мир, 1972. - т. 1. – 286 с., т. 2 – 423 с.
5. Кон, П. Универсальная алгебра / М.

Кон. - М.: Мир, 1968. – 353 с.

6. Кожухов, И. Б. Условия конечности для подпрямо неразложимых полигонов и модулей / И. Б. Кожухов // Фундам. и прикл. матем., 1998. - т. 4. - N 2. - С. 763-767.

7. Кожухов, И. Б. Полугруппы с финитно аппроксимируемыми полигонами / И. Б. Кожухов, А. Р. Халиуллина // Матем. заметки СВФУ, 2014. - т. 21. - № 3 (83). - С. 60-67.

8. Kozhukhov, I. B. One characteristical property of semilattices / I. B. Kozhukhov // Commun. Algebra, 1997. - v. 25. - N 8. - PP. 2569-2577.

9. Кожухов, И. Б. Абелевы группы с финитно аппроксимируемыми полигонами / И. Б. Кожухов, А. В. Царёв // Фундам. и прикл. матем., 2019. - т. 22. - N 5. - С. 81-89.

10. Кожухов, И. Б. Полигоны над полугруппами, унарные алгебры и автоматы / И. Б. Кожухов, А. В. Михалёв // Информатика и кибернетика. – Д.: ДонНТУ, 2019. - № 2 (16). - С. 79-83.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Международного Центра фундаментальной и прикладной математики МГУ.*

**Кожухов И. Б. Коммутативные полугруппы с ограничениями на подпрямо неразложимые полигоны.** В связи с работой Кожухова И. Б. и Халиуллиной А. Р. 2014 г. возник вопрос: будут ли ограничены в совокупности порядки подпрямо неразложимых полигонов над коммутативной равномерно локально конечной полугруппой? Автор даёт положительный ответ на этот вопрос для полигонов без нуля и полигонов с двумя нулями. В статье рассмотрены равномерно периодические коммутативные полугруппы и полигоны над ними. Доказано, что среди этих полигонов всякий подпрямо неразложимый полигон с двумя нулями двухэлементен, а подпрямо неразложимые полигоны без нулей имеют ограниченные в совокупности количества элементов.

**Ключевые слова:** Полигон над полугруппой, коммутативная полугруппа, подпрямо неразложимый полигон.

**Kozhukhov I. Commutative semigroups with restrictions on subdirectly irreducible acts.** In connections with a work by Kozhukhov I. and Haliullina A. 2014, the question arose: will the orders of subdirectly indecomposable acts over a commutative uniformly locally finite semigroup be bounded in aggregate? The author gives a positive answer to this question for acts without zero and acts with two zeros. The article deals with uniformly periodic commutative semigroups and polygons over them. It is proved that among these polygons, every sub-directly indecomposable polygon with two zeros is two-element, and sub-directly indecomposable polygons without zeros have a limited number of elements in the aggregate.

**Keywords:** Act over semigroup, commutative semigroup, subdirectly irreducible act.

*Статья поступила в редакцию 07.07.2020  
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.*

# **Инженерное образование**

## Применение технологии воркшоп для повышения уровня динамических знаний будущих специалистов

Е. И. Приходченко

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

[88rapoport88@mail.ru](mailto:88rapoport88@mail.ru)

### Аннотация

*Требования к будущему специалисту на рабочем месте в сегодняшней действительности предъявляются очень высокие. Не исключение составляет и подготовка магистров, умение ими в нестандартной обстановке применить полученные знания. В данной статье рассматривается технология воркшоп, которая направлена на развитие личностных качеств будущего специалиста. Также рассмотрена трёхсферная модель динамических знаний и проанализированы основные подходы к организации технологии воркшопа.*

### Постановка проблемы, цель и задачи исследования

Выпускник высшей школы, особенно технической, должен обучаться на протяжении всей жизни, постоянно обновлять свои знания, повышать, развивать и углублять свой уровень компетенций - такое требование выставляют не только Европейские образовательные стандарты, но и Российские. На их решение и нацелена современная технология воркшоп. Различными подходами к ее организации занимаются различные ученые. Ярким пример является В. И. Загвязинский, которого интересовало влияние развивающего влияния на обучение [1].

Педагогическими инновациями в образовании занимались М. Е. Киригина, Н. Р. Юсуфенкова, А. В. Хуторской, В. С. Лазарев, Б. П. Мартirosян, В. М. Полонский, А. И. Вагизова, С. Д. Пивкин, Н. Ш. Валеева, А. И. Мингалеева, К. Ф. Фопель [2–4]. Разработку занятий с применением технологии воркшопа предлагают Е. И. Канивец, Л. Н. Онищенко и др. [5, 6].

Цель работы является изучение теоретический и практический концепты технологии воркшоп. Для чего решаются задачи проведения сравнительного анализа взглядов различных ученых на обозначенную проблему, а также описания методик, применяемых в технологии воркшоп с целью развития более высокого уровня динамической системы знаний.

### Основное содержание статьи

Суть технологии состоит в активизации всех студентов, задействованных в учебном процессе, через самостоятельную работу в целом или её отдельный фрагмент, который очень важен в целостной структуре выполняемой работы. Воркшоп, по утверждению Е.И. Канивец и Л.Н. Онищенко, это «интенсивное учебное мероприятие, на котором учатся прежде всего,

благодаря собственной активной работе» [5, с.143].

Впервые технология появилась в США в 80-е годы XX ст. и предполагала применение различных методов, направленных на активизацию студентов. Продолжительность воркшопа от одного часа до полутора, т.е. академическая форма занятия в высшей школе. Это очень удобно для поддержания внимания в аудитории на высоком уровне. Если воркшоп применить во внеучебное время, то обязательно нужно помнить о классической его длительности. Иначе может наступить кризис внимания, и мероприятие теряет всякий смысл. Попытка проведения воркшопа во второй раз может быть воспринята негативно. Поэтому при применении указанной технологии главное – чувство меры времени и высокая степень задействованной всех участников. «Воркшопы» представляют прекрасную возможность для получения динамического знания. В этом случае нет проблем с мотивацией, так как студентам просто нравится учиться» [5, с.145]. Они длительно активны, занимаясь социально значимой деятельностью.

Подход к их организации может быть фрагментарным, т.е. часть занятия посвящена данной технологии, целостным – все занятие ею охвачено, тематическим – тема, состоящая из нескольких лекций, проведена в рамках воркшопа; курсовым – через весь изучаемый курс красной нитью проходит совокупность разных интерактивных технологий, подобранных по нарастающей динамике и в совокупности организованных в предлагаемую к рассмотрению технологию.

Итак, термин «технология» обозначает учение об искусстве. В нашем случае – искусство обучать. Дефиниция «воркшоп» трактуется как «мастерская», откуда «технология воркшоп» - «это мастерская искусства обучения».

Рассмотрим, из каких методов состоит технология воркшопа по подходу к организации занятия: фрагментарная – «снежный ком», «аквариум», «микрофон» или «скажи свое слово», «один – вдвоем – все вместе»

Целостная – метод ретроспекции. Использование этого метода стимулирования познавательной активности обучаемого заключается в особенности преподнесения образовательного материала. Познание нового происходит за счет картины, составленной на основе ранее изученного. Студент строит догадки для решения новых вопросов, основываясь на ранее изученном материале. Даже не имея всех данных по новому материалу, обучаемый выдвигает гипотезы, основанные на прошлом материале.

Синектика (мозговой штурм). Метод базируется на групповом решении поставленной проблемы. Применяется широко при преподнесении нового материала, когда дано основное понятие, но еще не раскрыты все элементы изучаемого явления. Педагогом выдвигается проблемный вопрос, и в течение короткого времени обучаемый выдвигает догадки по поводу решения поставленной проблемы. При этом студенты работают в группах. По истечении времени, каждая группа представляет свою гипотезу решения проблемы с обоснованием. Чем больше решений предусматривается, тем больше возможностей для нахождения необычного, неожиданного пути решения проблемы. Синектика обучает творческому подходу к рассмотрению проблемы, развитию нестандартного мышления.

Тематическая – кейс-метод или метод анализа ситуаций. Предназначен для получения знаний по дисциплине, истина в которых плюралистична. Акцент обучения переносится на сотворчество студента и преподавателя. Результатом применения метода являются не только знания, но и навыки профессиональной деятельности. Технология метода заключается в следующем: разрабатывается модель определенной ситуации, произошедшей в реальной жизни; предлагается усвоить комплекс знаний, умений и навыков. При этом преподаватель выступает в роли ведущего: генерирует вопросы, фиксирует ответы, поддерживает дискуссию, управляет эмоциональным напряжением обучаемых, прибегает к системе группового оценивания деятельности студентов.

Портфолио. Метод, демонстрирующий достижения студента, его приобретенный опыт. Эта технология ориентирована на личность студента, учитывает и развивает его индивидуальность, творческие способности. Метод портфолио обеспечивает систематичность и регулярность как мониторинга, так и

самомониторинга процесса обучения. Портфолио, или портфель студента, вмещает все то лучшее, чего он достиг, демонстрирует прогресс обучаемого, умение размышлять над своими успехами и неудачами. Воспитывается объективность в оценивании своих возможностей, появляется видение способов преодоления трудностей, достижения более высоких результатов.

Деловые игры. С рождения и до самой старости человек играет. Со временем меняются задачи игры, ее установки, цели. В процессе обучения в ВУЗе перед будущими специалистами стоит сложная задача: умение применять полученные умения и навыки в производственном процессе. Метод деловой или ролевой игры как нельзя лучше подходит для попытки реализации и видения своих действий, их последовательности при решении производственной задачи. Функция педагога в данном случае сводится к правильной постановке проблемы, требующей решения. Этот метод вводит студентов в игровое моделирование изучаемых явлений и вырабатывает жизненный опыт. Деловая игра имитирует реальность путем проживания ситуаций в роли и дальнейшем применении полученного опыта.

Метод проектов. Слово «проект» обозначает в переводе с англ. – брошенный наперед. Данный метод является письменным и не требует от обучаемых дополнительного самостоятельного изучения материала. Он формирует навыки стилистического оформления своих мыслей, логическое мышление, осмысление материала. Обучает студента работе по индивидуальному графику, рассмотрению материала с разных сторон, в разных контекстах. Формирует исследовательские навыки обучаемых и способствует обоснованию собственной рабочей теории.

«Круглый стол». Этот интерактивный метод обучает работе в группе, взаимодействию диалог «студент-студент», прививает умение выслушать других, проявлять тактичность в высказываниях, выступать на публике. Сложность для преподавателя при применении метода дискуссии – это четко и верно выбрать тему, продумать логический ход работы, способствовать избежанию «лжедискуссии».

Курсовая – метод развития критического, комбинаторно-логического мышления, радиантного мышления, метод эвристического обучения.

Метод критического мышления был впервые разработан Сократом.

Джон Дьюи утверждает, что фундаментальная цель современного образования заключается не в предоставлении обучаемым информации, а в том, чтобы развивать у них практический способ мышления.

Критическое мышление обладает несколькими параметрами:

- полученная информация является начальным пунктом размышления;
- вначале оно характеризуется постановкой вопросов в выяснении проблемы, которые необходимо решить;
- критическое мышление всегда стремится к созданию убедительных аргументов.

По мнению ученых М. Векслера, А. Гелегао, Т. Воропай в критическом мышлении выделяют четыре этапа:

- актуализацию знаний, пробуждение интереса к теме, определение цели изучения конкретного материала;
- осмысления новой информации;
- формирование собственного мнения относительно изучаемого материала;
- обобщение и оценку информации, определение способов ее решения.

Критическое мышление предлагает умение строить нелогические выводы и принимать объективные решения.

Метод развития комбинаторно-логического мышления. Под комбинаторно-логическим мышлением понимаем продуктивный процесс, в результате которого происходит выбор необходимых знаний, способов, направленных на разрешение различным числом вариантов как частных конкретных задач, так и поиск общих закономерностей посредством мыслительных рассуждений.

Алгоритм развития комбинаторно-логического мышления:

Первое условие - содержание обучения должно носить циклический характер – периодическое возвращение к наиболее важным ключевым моментам на очередной новой ветке познания и понимания; обучение на высоком уровне позволяет каждому обучаемому осуществить очередной этап своего развития.

Второе условие - предлагается специальная типология заданий, направленных на реализацию ближней и дальней целей обучаемого.

Третье условие - развитие комбинаторно-логического мышления органично соединяется с развитием предметных умений, тем самым отражается на успеваемости.

Четвертое условие - реализация прямого (на нормативной дисциплине) и косвенного (на факультативной дисциплине) развития комбинаторно-логического мышления.

Пятое условие - индивидуальная педагогическая поддержка.

Шестое условие - специально разработанные модели системы занятий, реализуемых посредством педагогического мастерства.

Седьмое условие - обеспечивается единство содержательного, мотивационного,

критического, корректирующего, рефлексивного, творческого компонентов.

Восьмое условие - специальные материалы для оценки и коррекции умений (уровневые тесты).

Девятое условие - педагогическая деятельность направляется на развитие комбинаторно-логического мышления, помня, что логическое мышление является приобретенным, а не врожденным качеством людей.

#### Метод развития радиантного мышления.

Радиантное (или ассоциативное) мышление – это способ работы мозга, когда происходящие в нем процессы мышления осуществляются в ключевых словах или графических образах. Радиантное мышление (от «радиант» – точка небесной сферы, из которой распространяются видимые пути тел с равнонаправленными скоростями). Ученый Тони Бьюзен разработал так называемые интеллектуальные или ментальные карты. Они, по мнению исследователя, дают возможность увеличения производительности мозга, сохранив его эффективность, если воспользоваться его способностью работать обоим полушариям одновременно. Суть рассматриваемого метода заключается в определении основного понятия, от которого отходят идеи, мысли и задачи. Каждая ветвь может заключать несколько более мелких ветвей-подпунктов. К каждой ветви возможно оставлять комментарии, чтобы не запутаться в более сложном проекте.

Радиантное, или ассоциативное, мышление благоприятствует пониманию взаимосвязи явлений и путей достижения целей предметов, совершенствованию воображения и укреплению памяти. Радиантное мышление – это объединяющее звено между абстрактным и конкретным (предметным) мышлением. Чем развитее в обучаемых такой тип мышления, тем более целостен и эффективен его мыслительный процесс. Составляя ментальные карты, т.е. представляя мысли графическими образами, обучаемые проявляют индивидуальный способ восприятия и обработки информации.

Метод эвристического обучения – (от гр. эвристика – обнаружение, открытие, отыскивание) - частично-поисковый метод, ставящий целью конструирование обучаемым собственного подхода к решению проблемы через: перестраивание известной информации, согласование логических и эвристических способов познавательной деятельности; личностные интеллектуальные возможности обучаемого. Эвристическое обучение можно свести к следующим основным предписаниям:

- задание исследуется по частям, перебираются возможные варианты решения;
- формулируется возникшая проблема;

- изменяется и преобразуется проблема с выявлением новых свойств;
- выбирается эффективная система обозначений;
- задание подразделяется на части;
- рассуждение ведется от противного;
- умение обобщать;
- рассматривается несколько моделей решения творческой проблемы, выявляются связи между ними;
- отыскивается аналогия в природе;
- проверяется результат (по достаточности и излишку условий по содержанию интерпретации);
- выделяется главное.

Частично-поисковый, или эвристический, метод обучения предусматривает организацию активного поиска решения познавательных задач. При этом мыслительный процесс приобретает продуктивный характер. Главной его задачей является создание новых образовательных результатов. Это непрерывное открытие нового.

## Выводы

Таким образом, организовав воркшоп, педагог может применить множество интерактивных методов по своему усмотрению. Главная задача – провести отдельное занятие или его фрагмент захватывающе, интересно, на высшем интеллектуальном уровне. Ведь китайская мудрость гласит: Расскажи – и я забуду, покажи – и я запомню, увлеку меня – и я научусь.

**Приходченко Е. И. Использование технологии воркшоп для повышения креативности будущих инженеров-педагогов.** Учебно-воспитательный процесс высшей школы должен быть нацелен на более высокий профессиональный уровень будущих специалистов. Развитие креативности, отход от нестандартного мышления, расширение поля компетенций и будет способствовать формированию неординарной личности. Технология воркшоп как раз и есть той инновацией, которая в корне изменит весь ход проведения занятий. Организуя воркшоп, педагог может применить множество интерактивных методов по своему усмотрению. Главная задача педагога – провести отдельное занятие или его фрагмент захватывающе, интересно, на высшем интеллектуальном уровне.

**Ключевые слова:** технология воркшоп, интерактивное обучение, компетентностный подход, креативная личность.

**Prikhodchenko K. I. Using workshop technology to enhance the creativity of future engineers and educators.** The educational process of higher education should be aimed at a higher professional level of future specialists. The development of creativity, the departure from non-standard thinking, the expansion of the field of competencies will also contribute to the formation of an extraordinary personality. The workshop technology is precisely the innovation that will fundamentally change the entire course of the class. When organizing a workshop, the teacher can apply a variety of interactive methods as they see fit. The main task of the teacher is to conduct a separate lesson or its fragment in an exciting, interesting way, at the highest intellectual level.

**Key words:** technology workshop, interactive learning, competency-based approach, creative personality.

## Литература

1. Шевченко, О. И. Технологии нестандартного обучения / О. И. Шевченко, М.А. Волков, В. А. Леонов // Педагогика высшей школы – Казань, 2018. – №3 (13). – С. 17-25.
2. Воробьев, Г. Г. Школа будущего начинается сегодня / Г. Г. Воробьев. – М.: Просвещение, 2001. – 174 с.
3. Маштабиц, Е. И. Компьютеризация обучения: проблемы и перспективы / Е.И. Маштабиц, Н.Н. Моисеев. – М., 2013. – 195 с.
4. Ярмухмедова, К. Г. Обучение иностранному языку по заочной форме с применением дистанционных технологий / К. Г. Ярмухмедова // Вестник Евразийской академии имени Д. А. Кунаева. – Алматы, 2015. – № 3. – С. 152-157.
5. Каневец, Е. Н. Некоторые теоретические и практические аспекты организации обучения на основе воркшопа / Е. Н. Каневец, Л. П. Онипченко // Наукові праці ДонНТУ: Серія: педагогіка, психологія і соціологія, 2012. – №12. – С.143-147.
6. Приходченко, Е. И. Использование интерактивных технологий в процессе обучения студентов / Е. И. Приходченко // Вестник Академии гражданской защиты, 2019. – Вып. 3 (19) – С. 103-106.

Статья поступила в редакцию 20.07.2020

Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.

**ПАМЯТИ**  
**Александра Степановича Миненко**  
**(1949–2020)**

*Человек, душа, не умирает,  
просто рядом быть перестает...*



Коллектив Государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»  
скорбит в связи с уходом из жизни доктора физико-математических наук, профессора,  
заведующего кафедрой «Искусственный интеллект и системный анализ»  
факультета компьютерных наук и технологий,  
члена Американского математического общества  
**Миненко Александра Степановича (19.05.1949 – 02.09.2020)**

Миненко Александр Степанович родился в 1949 году. В 1971 году закончил Донецкий государственный университет по специальности «Математика».

Его научно-педагогический стаж работы в высших заведениях образования III-IV уровня аккредитации – 34 года, в том числе педагогический стаж в ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» – 16 лет.

Кандидат физико-математических наук с 1980 года. Диссертацию защитил в специализированном ученом совете при Институте прикладной математики и механики АН УССР.

Ученое звание доцента по кафедре «Прикладная математика» ДПИ присвоено в 1983 г.

Начиная с 1982 года Александр Степанович прошел путь от сотрудника отдела уравнений математической физики Института прикладной математики и механики НАН до проректора Государственного университета информатики и искусственного интеллекта. Последние годы жизни Александр Степанович был заведующим кафедрой «Искусственного интеллекта и системного анализа» факультета компьютерных наук и технологий, членом редколлегии рецензируемых научных журналов «Проблемы искусственного интеллекта», «Информатика и кибернетика».

Отечественная наука понесла невосполнимую утрату. Научные результаты Александра Степановича весьма значительны, многогранны и хорошо известны специалистам мирового уровня.

Профессор Миненко внес существенный вклад в теорию моделирования процессов теплофизики и гидродинамики. Последнее время им были получены результаты по управлению сложных объектов при помощи нечетной логики. Александр Степанович Миненко занимался прикладными задачами искусственного интеллекта, проблемами восстановления изображения лица по его мимическим изображениям.

За время работы в ДонНТУ Миненко А. С. подготовил и читал лекционные курсы для студентов специальности «Системный анализ и управление»: «Дифференциальные уравнения», «Уравнения математической физики», «Методы оптимального управления», «Моделирования и идентификация систем». Постоянно совершенствовал методику чтения лекций и проведения научно-исследовательской работы со студентами с применением новых электронных средств обучения. В 2012 году был выпущен первый электронный учебник «Multimedia математика» (гриф МОН), который используется в учебном процессе.

Александр Степанович руководил научно-исследовательской работой студентов, магистрантов и аспирантов. В результате деятельности постоянно публиковал в соавторстве со студентами, магистрантами и аспирантами научные статьи, тезисы и доклады на научных конференциях разного уровня.

Проводил практические занятия, руководил дипломными работами и магистерскими диссертациями, а также диссертациями на соискание научной степени кандидата наук.

Участвовал в работе Государственных экзаменационных комиссий по государственной аттестации студентов.

А. С. Миненко был членом диссертационного Совета по защите кандидатских и докторских диссертаций.

Александром Степановичем было опубликовано 79 статей, из них 71 научного характера, в т. ч. 53 в профессиональных изданиях, и 8 учебно-методического характера.

Мы знали Александра Степановича как человека огромной внутренней силы, с прекрасным характером и абсолютным человеколюбием, целеустремленного. *«От нас ушел человек, чьи поступки и дела происходили от души, от сердца».*

Он был могучим, талантливым, светлым, добрым человеком. Александр Степанович был мудрым руководителем, человеком высокого уровня научной культуры, воспитавшим много поколений специалистов в области компьютерных наук.

В последние десять лет профессор уделял много времени научной работе и опубликовал более четырёх десятков работ.

#### **Перечень публикаций:**

#### **РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА В МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА**

*Ванжа Т. В., Миненко А. С.*

В сборнике: Вызовы цифровой экономики: развитие комфортной городской среды. Труды III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2020. С. 149-153.

#### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА ПО ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯМ**

*Семёнова А. П., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2020). Сборник материалов XI Международной научно-технической

конференции в рамках VI Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2020. С. 389-393.

#### ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ

*Миненко А. С., Лёвкина А. В., Радевич Е. В.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2020). Сборник материалов XI Международной научно-технической конференции в рамках VI Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2020. С. 527-531.

#### ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

*Дубина Д. А., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2020). Сборник материалов XI Международной научно-технической конференции в рамках VI Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2020. С. 570-573.

#### ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОММУНИКАТИВНОЙ КУЛЬТУРЫ У БУДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ОСНОВЕ ИХ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

*Ванжа Т. В., Миненко А. С., Приходченко Е. И.*

Информатика и кибернетика. 2020. № 1 (19). С. 71-76.

#### АНАЛИЗ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО ФОТОГРАФИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

*Миненко А. С., Семенова А. П.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2019). Материалы X Международной научно-технической конференции в рамках V Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2019. С. 123-126.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

*Миненко А. С., Лёвкина А. В., Радевич Е. В.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2019). Материалы X Международной научно-технической конференции в рамках V Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2019. С. 142-145.

#### ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ

*Горлов Е. Д., Березовская Е. А., Миненко А. С., Едемская Е. Н.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2019). Материалы студенческой секции X Международной научно-технической конференции в рамках V Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2019. С. 235-238.

#### АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ДЛЯ РОБОТА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ

*Егурнов Н. О., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2019). Материалы студенческой секции X Международной научно-технической конференции в рамках V Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2019. С. 301-304.

#### КРАТКИЙ ОБЗОР ПЛАТФОРМЫ ARDUINO UNO И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ HC-SR04

*Егурнов Н. О., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2019). Материалы студенческой секции X Международной научно-технической конференции в рамках V Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2019. С. 450-452.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА В ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ**

*Миненко А. С., Шихов И. В.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2019). Материалы студенческой секции X Международной научно-технической конференции в рамках V Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2019. С. 480-482.

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ**

*Миненко А. С., Радевич Е. В.*

В сборнике: Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях (СИТОНИ-2017). Материалы V Международной научно-технической конференции. 2018. С. 125-132.

**АНАЛИЗ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Семенова А. П., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2018). Материалы IX Международной научно-технической конференции в рамках IV Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2018. С. 22-25.

**ЗАДАЧА ПРИБЛИЖЕННОГО АНАЛИЗА СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ В УПРАВЛЕНИИ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

*Миненко А. С., Радевич Е. В., Лёвкина А. В.*

В сборнике: Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2018. С. 341-345.

**ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

*Семенова А. П., Миненко А. С., Ванжа Т. В.*

В сборнике: Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2018. С. 443-446.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА**

*Миненко А. С., Радевич Е. В.*

Проблемы искусственного интеллекта. 2018. № 1 (8). С. 13-23.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА НА ПЛОСКОСТИ**

*Миненко А. С., Лёвкина А. П.*

Проблемы искусственного интеллекта. 2018. № 3 (10). С. 74-83.

**ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭМОЦИЙ**

*Миненко А. С., Семенова А. П.*

Проблемы искусственного интеллекта. 2018. № 3 (10). С. 84-93.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ**

*Миненко А. С., Лёвкина А. В.*

Информатика и кибернетика. 2018. № 3 (13). С. 33-36.

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ**

*Миненко А. С., Радевич Е. В.*

Информатика и кибернетика. 2018. № 1 (11). С. 84-89.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И РАСПОЗНАНИИ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА ПО ЕГО МИМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

*Семенова А. П., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование

(ИУСМКМ-2017). Сборник материалов VIII Международной научно-технической конференции в рамках III Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2017. С. 375-379.

#### МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ЦЕНТРА ЗРАЧКА НА ИЗОБРАЖЕНИИ ГЛАЗА

*Потемкин А. С., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2017). Сборник материалов VIII Международной научно-технической конференции в рамках III Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2017. С. 450-454.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЯЗЫКА ЖЕСТОВ

*Потемкин А. С., Миненко А. С.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2017). Сборник материалов VIII Международной научно-технической конференции в рамках III Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2017. С. 470-474.

#### ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА

*Миненко А. С., Радевич Е. В.*

В сборнике: Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2017). Сборник материалов VIII Международной научно-технической конференции в рамках III Международного Научного форума Донецкой Народной Республики. 2017. С. 712-717.

#### ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ МИНИМИЗАЦИИ СТУПЕНЧАТОЙ ФУНКЦИИ

*Миненко А. С., Радевич Е. В.*

Проблемы искусственного интеллекта. 2017. № 2 (5). С. 14-25.

#### ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНВЕКТИВНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

*Миненко А. С., Радевич Е. В.*

Информатика и кибернетика. 2017. № 3 (9). С. 100-105.

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

*Миненко А. С., Радевич Е. В.*

Информатика и кибернетика. 2017. № 1 (7). С. 73-78.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РАСПОЗНАНИИ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА ПО ЕГО МИМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

*Миненко А. С.*

Проблемы искусственного интеллекта. 2016. № 2 (3). С. 48-54.

#### AXIALLY SYMMETRIC FLOW

*Minenko A. S.*

Problems of Artificial Intelligence. 2016. № 1 (2). С. 5-14.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РАСПОЗНАНИИ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА ПО ЕГО МИМИЧЕСКИМ ФОТОГРАФИЯМ

*Миненко А. С.*

Информатика и кибернетика. 2016. № 4 (6). С. 67-72.

#### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И РАСПОЗНАНИИ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА ПО ЕГО МИМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

*Миненко А. С.*

Информатика и кибернетика. 2016. № 1 (3). С. 81-85.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОГО КЛАССА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

*Миненко А. С.*

В сборнике: Инновационные перспективы Донбасса. материалы международной научно-практической конференции. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ДонНТУ). 2015. С. 133-137.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОГО КЛАССА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

*Миненко А. С.*

В сборнике: Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг. Сборник материалов VI Международной научно - технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках форума «Инновационные перспективы Донбасса» (ИУС КМ - 2015). Донецк, 2015. С. 204-209.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

*Шевченко А. И., Миненко А. С.*

Доклады Национальной академии наук Украины. 2013. № 6. С. 47.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОГО КЛАССА СЛОЖНЫХ С НЕЧЕТКИМИ УПРАВЛЕНИЯМИ

*Шевченко А. И., Миненко А. С., Сыпко И. А.*

Доклады Национальной академии наук Украины. 2013. № 8. С. 52.

ЗАДАЧА СТЕФАНА ПРИ НАЛИЧИИ КОНВЕКЦИИ

*Шевченко А. И., Миненко А. С.*

Доклады Национальной академии наук Украины. 2012. № 1. С. 25.

AN APPROACH FOR COMPLEX SYSTEMS MODELING

*Schevchenko A., Minenko A., Zamula A.*

Доклады Национальной академии наук Украины. 2012. Т. 10. С. 40.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНВЕКТИВНОЙ МОДЕЛИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

*Миненко А. С., Гунько С. А.*

Искусственный интеллект. 2012. № 1. С. 17-23.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ

*Миненко А. С.*

Искусственный интеллект. 2012. № 1. С. 60-65.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

*Миненко А. С., Волченко Е. В., Шишкин С. А.*

Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 2. № 4 (56). С. 4-10.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

*Шевченко А. И., Миненко А. С.*

Доклады Национальной академии наук Украины. 2010. № 10. С. 29.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ МНОГОМЕРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

*Шевченко А. И., Миненко А. С.*

Доклады Национальной академии наук Украины. 2010. № 4. С. 30.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

*Шевченко А. И., Миненко А. С.*

Доклады Национальной академии наук Украины. 2010. № 5. С. 36.

Он подавал пример мудрости, стойкости и мужества. Нам повезло с ним работать! Мы постараемся сохранить все то, что он создал, он остается в нашей памяти незабываемым и незаменимым!

Выражаем глубокие соболезнования  
близким, коллегам, студентам и ученикам

### Об авторах

**Авксентьева Ольга Александровна** (1951 г. р.) – старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Бельков Дмитрий Валерьевич** (1965 г. р.) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Дзюба Андрей Всеволодович** (1977 г. р.) – старший преподаватель кафедры автоматики и телекоммуникаций факультета компьютерных информационных технологий и автоматики Донецкого национального технического университета, соискатель по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», по научной специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)».

**Кожухов Игорь Борисович** (1950 г. р.) – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Высшая математика-1» национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, член Совета по защите кандидатских и докторских диссертаций специальности 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей», член редколлегии международного журнала "Enlightenments in Puke and Applied Mathematics".

**Лазебная Людмила Александровна** (1967 г. р.) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Николаев Дмитрий Александрович** (1999 г. р.) – студент 4 курса группы КС-17 кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Орлов Юрий Константинович** (1953 г. р.) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры искусственного интеллекта и системного анализа факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Приходченко Екатерина Ильинична** (1950 г. р.) – доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры социологии и политологии социально-гуманитарного института Донецкого национального технического университета, заслуженный учитель Украины, академик Международной академии наук педагогического образования.

**Рычка Ольга Валентиновна** (1985 г. р.) – старший преподаватель кафедры программной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета, соискатель по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», по научной специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Рязанов Сергей Анатольевич** (1972 г. р.) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инженерная геометрия и основы САПР» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.

**Хоменко Владимир Витальевич** (1996 г. р.) – студент-магистрант группы САУм-18 кафедры искусственного интеллекта и системного анализа факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Требования к статьям,  
направляемым в редакцию научного журнала  
«Информатика и кибернетика»**

Редколлегией принимаются к рассмотрению статьи, в которых рассматриваются важные вопросы в области информатики и кибернетики. Научный журнал издаётся с 2015 года, периодичность издания – 4 раза в год.

В журнале предусмотрены следующие рубрики:

- информатика и вычислительная техника;
- компьютерные и информационные науки;
- инженерное образование.

В соответствии с номенклатурой специальностей научных работников МОН ДНР первые две рубрики соответствуют следующим укрупненным группам специальностей научных работников:

05.01 – «Инженерная геометрия и компьютерная графика»,

05.13 – «Информатика, вычислительная техника и управление».

С 01.02.2019 Научный журнал включён в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (приказ МОН ДНР № 135) по группам специальностей 05.01.00 и 05.13.00.

Рубрика «Инженерное образование» предназначена опубликования сотрудниками научно-методических статей.

Журнал также включён в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 425-07/2016 от 14.07.2016).

Статьи, представляемые в данный сборник, должны отвечать следующим требованиям. **Содержание статьи** должно быть посвящено актуальным научным проблемам и включать следующие необходимые элементы:

- постановку проблемы в общем виде, её связь с важными научными и практическими задачами;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых решается данная задача и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья;
- формулировка цели статьи и постановка задач, решаемых в ней;
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы и перспективы последующих исследований в данном направлении.

Каждый элемент должен быть выделен соответствующим названием раздела, например, «введение», «постановка задачи», «цель и задачи работы», «цель статьи», «цель исследования», «цель разработки», «анализ ...», «сравнительная оценка ...», «разработка ...», «проектирование ...», «программная реализация», «тестирование ...», «полученные результаты», «выводы», «литература». Разделы «введение», «выводы», «литература» являются обязательными. Включать в названия разделов нумерацию не разрешается.

В основном тексте статьи формулируются и обосновываются полученные авторами утверждения и результаты. Выводы должны полностью соответствовать содержанию основного текста. Языки публикаций: русский, английский.

***Объём статьи, формат страницы***

Для оформления статьи следует использовать листы формата А4 (210x297 мм) с полями по 2,5 см со всех сторон. Нумерацию страниц выполнять не нужно.

Рекомендуемый объём статьи – 6-12 страниц. Рукописи меньшего объёма могут быть рекомендованы к публикации в качестве коротких сообщений.

Последняя страница текста статьи должна быть заполнена не менее чем на две трети, но содержать не менее трёх пустых строк в конце.

### **Форматирование текста**

Подготовка статьи осуществляется в текстовом редакторе Microsoft Office Word.

Весь текст статьи оформляется шрифтом Times New Roman 10 пт с одинарным междустрочным интервалом, если ниже в требованиях не сказано иного. Абзацный интервал «перед» – 0 пт, «после» – 0 пт.

На первой строке с выравниванием по левому краю располагается УДК.

Заголовок (название) статьи оформляется шрифтом Times New Roman 14 пт, полужирное начертание, с выравниванием по центру (без абзацных отступов). Заголовок статьи следует печатать с прописной буквы без точки в конце, переносы слов не допускаются. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

После названия статьи следует информация об авторах, которая выравнивается по центру (без абзацных отступов). На одной строке указываются инициалы и фамилии всех авторов через запятую. Между двумя инициалами ставится пробел. С новой строки указывается название вуза (организации) и город (для каждого автора, если не совпадают). На следующей строке указываются адреса электронной почты (один адрес либо каждого автора – по желанию). Адрес электронной почты оформляется в виде гиперссылки.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Заголовок «Аннотация» выделяется полужирным начертанием. Объём аннотации – 450-550 символов (без пробелов). Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

Основной текст статьи разбивается на две колонки шириной по 7,5 см (промежуток между столбцами – 0,99 см), выравнивается по ширине. Абзацный отступ первой строки – 1 см. Автоматический перенос слов не применяется.

Заголовки разделов выполняются шрифтом Arial 10 пт, полужирное курсивное начертание. Абзацный отступ отсутствует, интервал перед абзацем – 12 пт, после абзаца – 6 пт. Для заголовка «Введение» установить интервал «перед» – 0 пт, «после» – 6 пт.

### **Таблицы в тексте статьи**

Название следует помещать над таблицей с абзацного отступа (1 см) в формате: слово «Таблица», пробел, номер таблицы, пробел, тире, пробел, название таблицы. Название таблицы записывают с прописной буквы без точки в конце строки и выравнивают по ширине. В ячейках таблицы устанавливается выравнивание текста по центру по вертикали. По горизонтали текст выравнивается по центру либо по левому краю. Границы ячеек таблицы должны быть только чёрного цвета, толщина линии – 1 пт. На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте статьи, при ссылке следует писать слово «табл.» с указанием её номера, например, «... данные приведены в табл. 5». Таблицы нумеруются в пределах статьи. Таблица располагается сразу после ссылки на неё, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же таблица не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью таблицы, ширина которой превышает ширину колонки. В этом случае таблица и её название размещаются по центру страницы. Таблица не должна выступать за границы полей страницы. Таблица и её название отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после.

### **Рисунки в статье**

Ссылки на иллюстрации по тексту статьи обязательны и оформляются в виде «... на рис. 2» и т. п. Рисунок и его подпись выравниваются по центру колонки (без абзацных отступов), положение рисунка – «в тексте». Размещается рисунок после его первого упоминания в тексте, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же иллюстрация не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью рисунка, ширина которого превышает ширину колонки. В этом случае рисунок и его подпись выравниваются по центру страницы. Иллюстрация не должна выступать за границы полей страницы. Подпись рисунка оформляется в формате: слово «Рисунок», пробел, номер иллюстрации, пробел, тире, пробел, название рисунка. Название рисунка записывают с прописной буквы без точки в конце строки. Для подписи иллюстрации применяют курсивное

начертание. Иллюстрация и её подпись отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после. Не допускается выполнять рисунки с помощью встроенного графического редактора Microsoft Office Word. Если на иллюстрации имеется текст, размер шрифта должен быть не менее чем аналогичный текст, набранный шрифтом Times New Roman 10-го размера. Иллюстрация не должна содержать много незаполненного пространства.

### ***Формулы***

Формулы и уравнения рекомендуется набирать с использованием MathType (предпочтительно) или MS Equation. Формулы и математические символы не должны существенно отличаться по размеру от основного текста. Обязательной является нумерация формул, на которые имеется ссылка в тексте статьи. Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например, «... согласно формуле (2)». Формулы размещаются по центру колонки, а их номера – по правому краю. Как для строки с формулой, так и для первой строки пояснений (при наличии), абзацный отступ убирается. Первая строка пояснения начинается со слова «где», после которого следует поставить табуляцию на 1 см, затем само пояснение в формате: символ, подлежащий объяснению, пробел, тире, пробел, поясняющий текст, запятая, обозначение единицы измерения физической величины. Пояснения перечисляются через точку с запятой, выравниваются по ширине. Вторая и последующие строки пояснений начинаются с абзацного отступа (1 см). Весь блок текста, связанный с формулой (только формула, несколько формул подряд или формула с пояснениями), отделяется от основного текста одной пустой строкой до и после. Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак « $\times$ ». Формулы и математические уравнения могут быть записаны в тексте документа, если их высота не превышает высоту строки. При этом следует учитывать, что знаки математических операций отделяются от чисел или символов пробелами с обеих сторон. Например, «Если учесть, что  $y < 0$  и  $2x + y = 1$ , то из формулы (3) можно выразить  $x \dots$ ». К символам, которые приведены в формуле, при дальнейшем их употреблении (в том числе в пояснениях к формуле) должно применяться курсивное начертание. При этом к любым числам (верхние и нижние индексы, содержащие цифры и т.п.), а также к математическим знакам курсивное начертание не применяется. Не допускается вставлять формулы, выполненные в виде рисунков.

### ***Перечисления: оформление списков***

Основной текст статьи может содержать перечисления, оформленные в виде маркированного списка. В качестве маркера элемента списка разрешается использовать только короткое тире «—». Каждый элемент перечисления записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После символа короткого тире текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые строки располагается без отступов. Нумерованные и многоуровневые списки включать в статью не разрешается.

### ***Литература***

В тексте статьи обязательны ссылки на все литературные источники, номер источника указывается в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Рекомендуемое количество источников, на которые ссылается автор, не менее 10. Перечень источников приводится в порядке их упоминания в статье. Библиографическое описание каждого литературного источника оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018. Перечень литературных источников оформляется в виде нумерованного списка. В качестве маркеров элементов списка используют порядковые арабские цифры с точкой. Каждый источник представляет собой отдельный элемент перечисления, записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После порядкового номера с точкой текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые строки располагается без отступов.

В конце статьи обязательно приводятся аннотации на русском и английском языках, каждая заканчивается перечнем 5-6 ключевых слов.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Слово «Аннотация» опускается. Текст аннотации начинается с ФИО авторов и названия статьи, выделяемых полужирным начертанием. Аннотация на русском языке совпадает с аннотацией, приведенной в начале статьи. В тексте аннотации на английском языке после фамилии автора указывается только первая буква имени с точкой. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт. Ключевые слова оформляются с новой строки аналогично тексту аннотации. Заголовок «Ключевые слова:» (англ. «Keywords:») выделяется полужирным начертанием. Ключевые слова перечисляются через запятую.

#### ***Порядок представления статьи и сопроводительные документы***

В редакцию необходимо представить:

- файл с текстом статьи;
- файл, содержащий фамилию, имя и отчество авторов полностью; ученую степень, ученое звание; место работы с полным указанием должности, подразделения и наименования организации, города (страны); номера телефонов и e-mail для связи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи, подписанное руководителем и заверенное печатью организации, в которой работает автор статьи;
- выписка из заседания кафедры или письмо организации с просьбой об опубликовании и указанием, что изложенные в статье результаты ранее не публиковались.

Статьи и сопроводительные документы следует высылать на электронный адрес [infcyb.donntu@yandex.ru](mailto:infcyb.donntu@yandex.ru).

#### ***К сведению авторов***

Если статья оформлена с нарушением указанных выше требований и правил, редакция после предварительного рассмотрения может отклонить статью.

На рецензирование статьи направляются членам редакционной коллегии журнала. Все статьи публикуются при наличии положительной рецензии.

В статью могут быть внесены изменения редакционного характера без согласования с автором. Ответственность за содержание статьи и качество перевода аннотаций несут авторы.

Публикация статей в научном журнале «Информатика и кибернетика» осуществляется на некоммерческой основе.

Все номера Научного журнала размещаются на сайте <http://infcyb.donntu.org/>.

CONTENT

Informatics and computer engineering

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Practical application of the method for optimizing the structure of a heterogeneous LTE network, based on the minimization of energy consumption</b>     |    |
| <i>Dziuba A.</i> .....                                                                                                                                      | 5  |
| <b>Development of algorithm for implementation of methods to improve the quality of regression models used in design of technical systems</b>               |    |
| <i>Rychka O.</i> .....                                                                                                                                      | 13 |
| <b>Development of a computer simulation model for shaping the working surface of a worm wheel by a gear-cutting tool with a modified generating surface</b> |    |
| <i>Ryazanov S.</i> .....                                                                                                                                    | 20 |
| <b>Self-organization TCP-traffic</b>                                                                                                                        |    |
| <i>Belkov D., Lazebnaya L.</i> .....                                                                                                                        | 29 |
| <b>Smoothing and forecasting based on trend models</b>                                                                                                      |    |
| <i>Khomenko V., Orlov Yu.</i> .....                                                                                                                         | 37 |
| <b>Specialized processor for performing operations on floating point numbers</b>                                                                            |    |
| <i>Avksentieva. O., Nikolaev D.</i> .....                                                                                                                   | 47 |

Computer and information science

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Commutative semigroups with restrictions on subdirectly irreducible acts</b> |    |
| <i>Kozhukhov I.</i> .....                                                       | 57 |

Engineering education

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Using workshop technology to enhance the creativity of future engineers and educators</b> |    |
| <i>Prikhodchenko K.</i> .....                                                                | 62 |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| <i>In memory of Alexander Minenko</i> ..... | 66 |
|---------------------------------------------|----|

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <u>About Authors</u> ..... | 72 |
|----------------------------|----|

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Requirements to articles which are sent to the editors office of the scientific journal "Informatics and Cybernetics"</u> ..... | 73 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

Электронное периодическое издание

Научный журнал

ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА

(на русском, английском языках)

№ 3 (21) - 2020

Ответственный за выпуск Р. В. Мальчева

Технический редактор Р. В. Мальчева

Компьютерная верстка А. И. Воронова

Подписано к выпуску 07.09.2020. Усл. печ. лист. 9,0. Уч.-изд. лист. 5,1.  
Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,  
4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.  
Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11  
E-mail: infcyb.donntu@yandex.ru, URL: <http://infcyb.donntu.org>