

Научный семинар

АСПИРАНТСКИЕ ЧТЕНИЯ СФТИ НИЯУ МИФИ

Сборник трудов

СФТИ НИЯУ МИФИ
2026 г.

УДК 082
А 90

Научный семинар «АСПИРАНТСКИЕ ЧТЕНИЯ СФТИ НИЯУ МИФИ – 2026». Сборник трудов научного семинара. 14-15 мая 2026 г. - М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2026. – 47 с.

В сборнике представлены труды научного семинара «Аспирантские чтения СФТИ НИЯУ МИФИ – 2026», состоявшегося 15–17 мая 2026 года. Основные задачи семинара – привлечение аспирантов к решению актуальных научных и прикладных задач, развитие их научной активности, оптимизация научно-исследовательской работы, содействие созданию междисциплинарных проектов, а также оказание научно-методической помощи молодым ученым в подготовке и написании диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

В ходе работы семинара аспиранты представили актуальность, цели, задачи, научную новизну, теоретическую и практическую значимость своих исследований, а также наиболее важные полученные к настоящему времени результаты.

Сборник адресован аспирантам, магистрантам, молодым преподавателям и научным сотрудникам, а также всем специалистам, интересующимся современными проблемами физики, техники, информационных технологий и прикладной математики. Издание будет полезно при подготовке кандидатских диссертаций и научных публикаций.

Издается в авторской редакции.

Материалы получены до 01.06.2026.

ISBN 978-5-7262-3258-4

©Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

О ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ АНТЕННОГО ОБТЕКАТЕЛЯ 2
Безносов Н.А.

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА С ПОМОЩЬЮ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ 8
Вазиева И. А.

МЕТОДЫ РАДИОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ *GNSS* 10
Валов М.В.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ 16
Гречушкин И.Е., Шульгин А. Н.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ТРЕБУЕМЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТАЛИ 12Х18Н10Т 19
Казаков И.А; Гришин Ю.А.

РОЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СНИЖЕНИИ РУТИННОЙ НАГРУЗКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЕКТАМИ 21
Колмаков А.Н., Ваулин С.Д.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ IT-ПРОЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ AGILE, WATERFALL И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 24
Колмаков А.Н., Ваулин С.Д.

МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДРОСТКОВОГО НАСТАВНИЧЕСТВА «РАВНЫЙ — РАВНОМУ» В ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ШКОЛЬНИКОВ 27
Певнева Н.А., Попова А.И.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ БЫСТРОЙ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ВИДЕОДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 33
Пыхов В.В.

ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ НА ОСНОВЕ СЛОЖЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ 42
Сабиров А.Т., Гречушкин И.Е., Ширяев В.И., Шульгин А.Н.

Алфавитный указатель авторов 47

О ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ АНТЕННОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Безносов Н.А.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
e-mail: beznosov.n@mail.ru

Аннотация. В статье даётся обзор основных структур антенного обтекателя, проектируется и моделируется частотно-избирательная поверхность с полосовой фильтрацией диапазона 4–8 ГГц. В первой части статьи обсуждаются типы АО и эффективность их применения, а также поведение отдельно взятой ЧИП. Во второй части описывается процесс проектирования многослойного АО, проектирования топологии ЧИП и электродинамического моделирования полученной структуры.

Ключевые слова: антенный обтекатель, FSS (частотно-избирательная поверхность), БПЛА, радиопрозрачность.

ON FREQUENCY-SELECTIVE SURFACES OF AN ANTENNA RADOME

Beznosov N.A.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Snezhinsk Physical-Technology Institute (SPhTI) –National Research Nuclear University MEPhI»,
Snezhinsk, Russia

Abstract. The article provides a review on the basic radome structures and presents the design and simulation of a frequency-selective surface with bandpass filtering in the 4–8 GHz range. The first part of the article discusses on the radome types and the effectiveness of their application, as well as the behavior of a single frequency-selective surface. The second part describes the process of designing a sandwich radome, designing the FSS topology and performing numerical simulation for the given structure.

Keywords: radome, FSS (frequency-selective surface), UAV, radio-transparency.

Антенные обтекатели (АО) — конструкции, выполняющие функцию кожуха для антенн, то есть поддерживающие герметичность или прочностную устойчивость прибора, при этом к данным обтекателям предъявляются требования по радиопрозрачности.

Основным сектором использования АО является аэрокосмическая отрасль, в которой данная конструкция является определяющей для функционирования систем связи и телекоммуникации.

По мере формирования основного вектора исследований сформировалось несколько форматов исследуемых и разрабатываемых АО:

1) Монолитные полуволновые обтекатели: стенка обтекателя занимает половину длины центральной волны полосы;
2) Монолитные тонкостенные: толщина стенки не превышает 0.1λ для волны максимальной частоты оперативного диапазона;
3) Многослойные структуры: содержат пять или более диэлектрических слоёв; чётное число слоёв основного материала и нечётное — облицовочных, диэлектрические параметры которых превышают таковые у основного материала;
4) Подтип многослойных структур: A-Sandwich, B-Sandwich, C-Sandwich и т.п.

Поведение монолитных полуволновых АО в первую очередь определяется взаимодействием сред на границе разделов «диэлектрик–воздух» и «воздух–диэлектрик», а

также имеет характерным отличием узкую полосу частот (около 5% от центральной частоты).

Среди недостатков стоит выделить следующие: при использовании толщины, кратной 0.5λ, полоса частот подвергается ещё большему сужению, а вес, являющийся одним из ключевых недостатков данного исполнения, кратно увеличивается.

Поведение монолитных тонкостенных АО подобно поведению НЧ-фильтра, частота среза которого соответствует:

$$f_c \sim \frac{1}{20\lambda},$$

где λ — толщина стенки.

Применимый диапазон угла падения θ составляет от $0°$ до $70°$.

Известны случаи применения структур с особо тонкими стенками в качестве защитных кожухов для апертур антенн систем телекоммуникации.

Среди прочих применений можно выделить обшивку малогабаритных воздушных средств, функционирующих в полосе частот X-band.

Многослойные АО (sandwich radome) были разработаны с целью увеличения оперативной полосы частот и уменьшения итогового веса.

Внедрение слоистой структуры АО значительно увеличивает гибкость конструкторских решений, позволяя обеспечивать многочастотную и многодиапазонную обработку. Однако, на больших значениях угла падения начинает увеличиваться вносимая фазовая задержка, из-за чего растут ошибка пеленгации и её производная. [1]

Типы исполнений АО приведены на рисунке 1. Светло-серый – основной материал, чёрный - обшивочный слой.

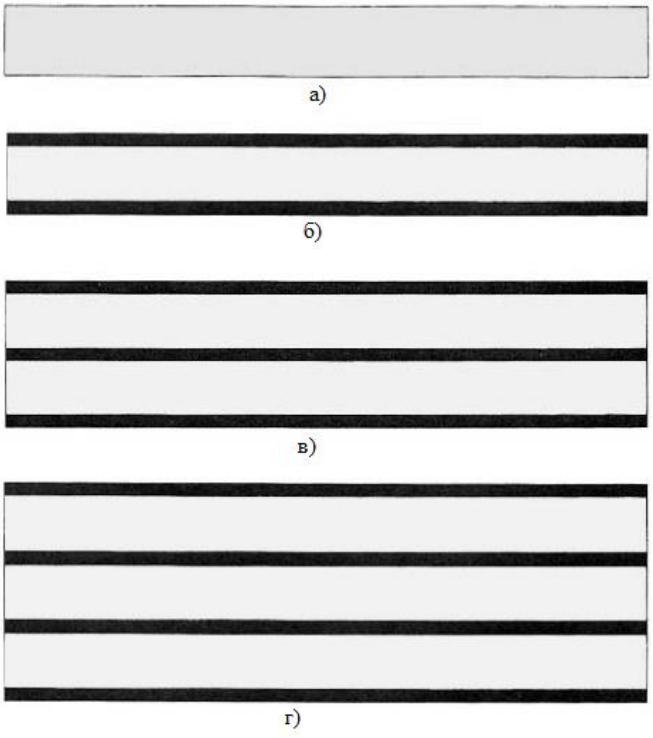


Рисунок 1 - Основные типы исполнений АО: а — монолитный, б — sandwich A, в — sandwich B, г — sandwich C.

Основной принцип радиопрозрачности для частотно-избирательной поверхности — формирование такой поверхности, при прохождении через которую угол выходного излучения ЭМ-волны соответствует углу падения волны на входе.

Принцип действия ЧИП, используемой в данной работе, заключается в воздействии структуры на проходящий сигнал: использование структуры из диэлектриков и

проводников, воздействующих на коэффициенты ε и μ среды, что позволяет создать среду, эффективно равную прозрачной.

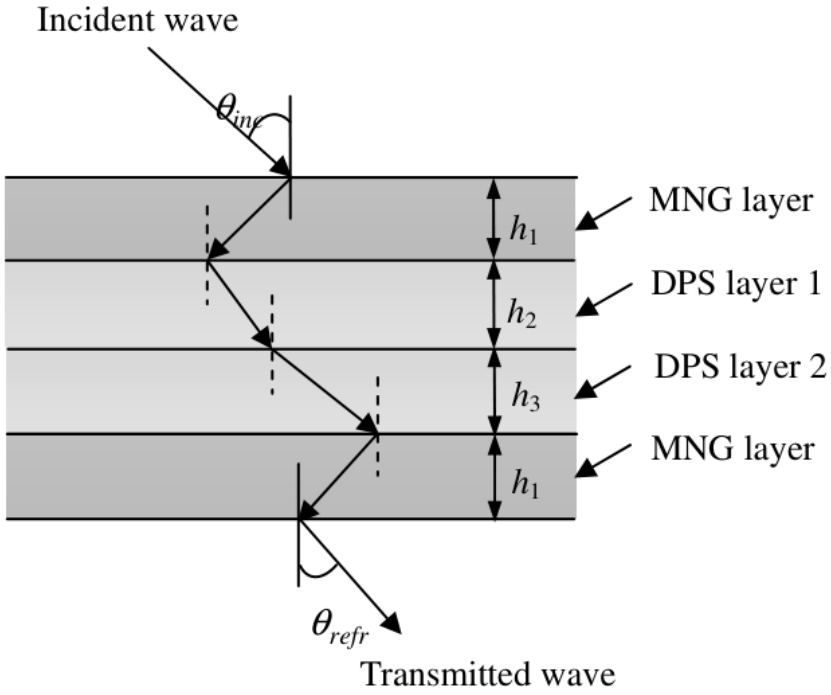


Рисунок 2 - Пример достижения радиопрозрачности с помощью многослойной структуры. [1]

На рисунке 2 представлены мю-отрицательный ($\varepsilon > 0,\ \mu < 0$) и полностью положительный ($\varepsilon > 0, \mu > 0$) слои, формирующие оптическое поведение проходящей ЭМ-волны, в том числе нивелирующее отклонение выходного угла от угла падения, что формирует радиопрозрачность слоя.

Для случая прохождения радиосигнала каждый слой можно представить как матрицу передачи T, что приводимо к модели эквивалентной длинной линии передачи, которая в свою очередь представима в виде передаточной функции или многочлена Баттерворта, что позволяет проектировать частотно-избирательное поведение итоговой поверхности.

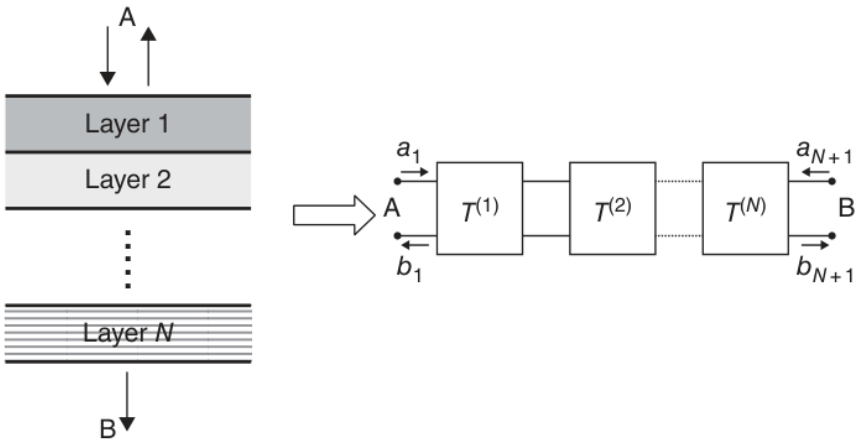


Рисунок 3 -Представление многослойного АО в виде последовательных матриц Т. [2]

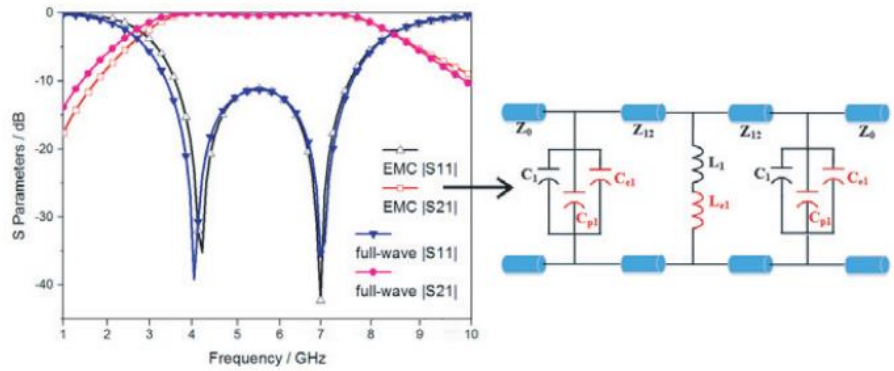


Рис.4 - Эквивалентная схема, соответствующая рис. 3.

Преобразование к эквивалентной LC-цепи позволяет реализовать данные характеристики путём конфигурации микрополосковых линий передачи, эквивалентные ёмкости и индуктивности которых соответствуют рассчитанным значениям, согласно рисункам 5,6.

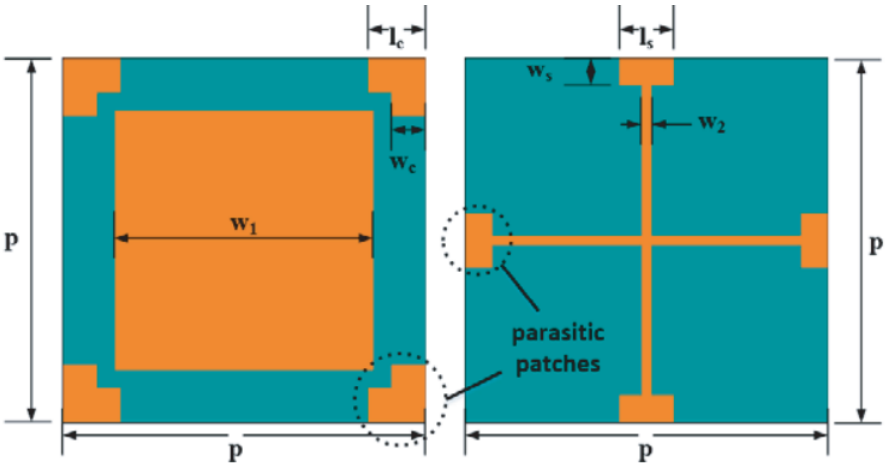


Рисунок 5 -Топология используемой ЧИП. [3]

Таблица 1 - Использованные значения и результаты расчётов.

p, мм	w_1, мм	w_c, мм	l_c, мм	w_2, мм	l_s, мм	w_s, мм
8	5.68	0.77	1.28	0.2	1.2	0.6
h, мм	Z_1, Ом	C_1, фФ	C_{e1}, фФ	C_{p1}, фФ	L_1, нГн	L_{e1}, нГн
2	254	45.17	22.89	2.35	3.71	0.09

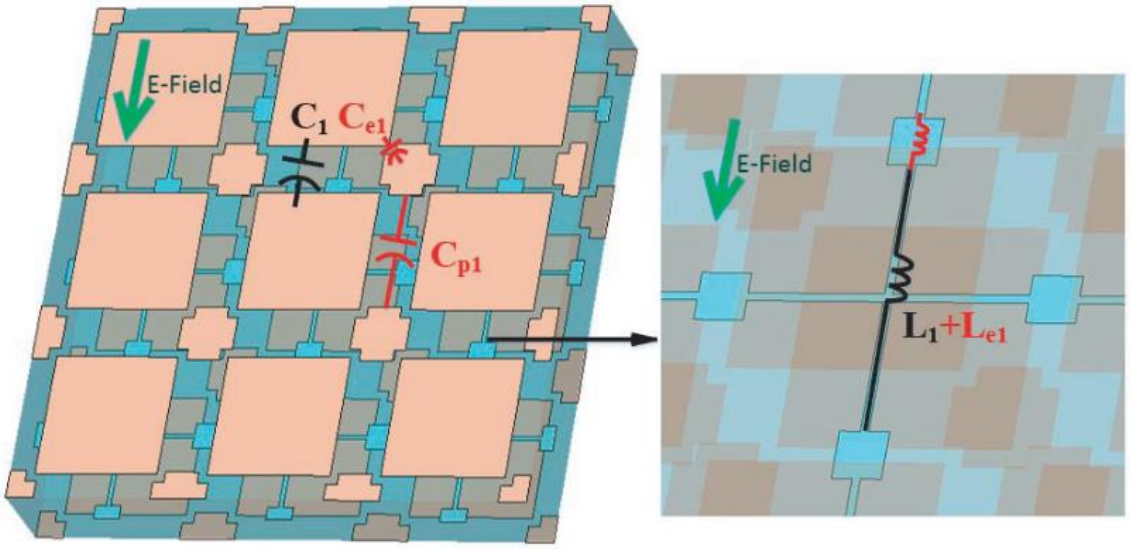


Рисунок 6 -Полная структура ЧИП и эквивалентные L- и C-элементы.

Для расчёта использовались следующие формулы:

$$C_{p1} = -0.013\frac{(1+\varepsilon_r)\varepsilon_0 p}{\pi}\ln\left(\sin\frac{\pi p}{s_{p1}}\right) \quad (1)$$

$$C_{e1} = -0.324\frac{(1+\varepsilon_r)\varepsilon_0 p}{\pi}\ln\left(\sin\frac{\pi p}{s_{e1}}\right) \quad (2)$$

$$Z_1 = \frac{Z_0}{\sqrt{(1-j\tan\delta)\varepsilon_r}} \quad (3)$$

$$C_1 = -\frac{(1+\varepsilon_r)\varepsilon_0 p}{\pi}\ln\left(\sin\frac{\pi p}{s_1}\right) \quad (4)$$

$$L_1 = -\frac{\mu_0 p}{2\pi^2}\ln\left(\sin\frac{\pi w_2}{2p}\right) \quad (5)$$

$$s_1 = \frac{p^2 - w_1^2 - 8w_c l_c + 4w_c^2}{4p} \quad (6)$$

$$L_{e1} = -0.012\frac{\mu_0 p}{2}\ln\left(\sin\frac{\pi l_s w_s}{p^2}\right) \quad (7)$$

$$s_{p1} = \frac{2w_c(p-2l_c) + (p-w_1-2w_c)(p-2w_c)}{p-w_1} \quad (8)$$

$$s_{e1} = \frac{\int_0^{\sqrt{2}l_c/2}\left[-x + \frac{\sqrt{2}(p-w_1)}{2}\right]dx + \int_{\sqrt{2}l_c/2}^{\sqrt{2}l_c}\left(x - \frac{p-w_1-2w_c}{2}\right)dx}{\sqrt{2}l_c} \quad (9)$$

где Z_0 — волновое сопротивление воздушной среды, ε_0 и μ_0 — электрическая и магнитная постоянные соответственно, ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость [3]. Результат моделирования предоставлен на рисунке 7.

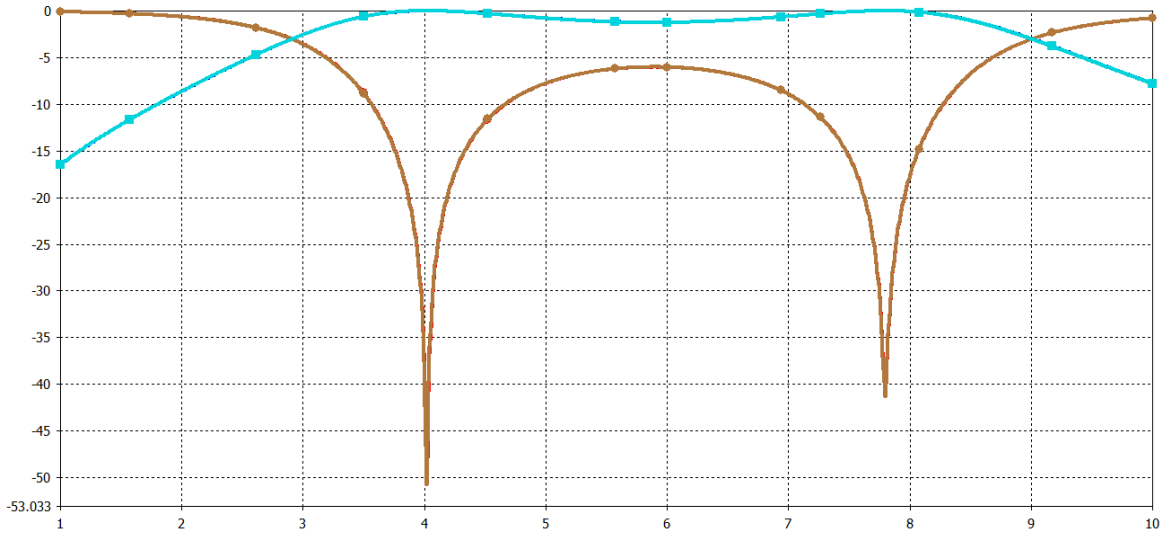


Рисунок 7 - *Г*рафик параметров матрицы рассеяния смоделированной антенны. Синим обозначен коэффициент пропускания S21, коричневым – коэффициент отражения S11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье проведён обзор структур АО, была смоделирована широкополосная ЧИП и определены электромагнитные свойства структуры.

Достигнут эффект полосовой фильтрации в диапазоне 4–8 ГГц с сохранением пропускания сигнала в целевом диапазоне.

Список использованной литературы:

1. Shiv Narayan, Shamala Joshi B.L., Raveendranath U. Nair, R. M. Jha. Electromagnetic Performance Analysis of Novel Multi-band Metamaterial FSS for Millimeter Wave Radome Applications // CMC, vol. 31, no. 1, pp. 1–15, 2012.
2. Reuven Shavit. *Radome Electromagnetic Theory and Design*. John Wiley & Sons Ltd., 2018.
3. Boyu Hua, Xiaochun Liu, Xiaoxiang He, Jin Yang. Wide-Angle Frequency Selective Surface with Ultra-Wideband Response for Aircraft Stealth Designs // Progress In Electromagnetics Research C, vol. 77, pp. 167–173, 2017.

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА С ПОМОЩЬЮ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ

Вазиева И. А.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
e-mail: vazieva.i@yandex.ru

В работе рассматривается развитие методики построения решений нелинейных уравнений с частными производными в виде бесконечных тригонометрических рядов. Данный подход применен к полной системе уравнений Навье-Стокса, описывающей трехмерные нестационарные течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа.

Ключевые слова: полная система уравнений Навье-Стокса, задача Коши, тригонометрические ряды, приближенные решения.

CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SOLUTIONS OF THE COMPLETE SYSTEM OF NAVIER-STOKES EQUATIONS USING TRIGONOMETRIC SERIES

Vazieva I. A.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Chelyabinsk Region.
e-mail: vazieva.i@yandex.ru

The paper considers the development of a method for constructing solutions to nonlinear partial differential equations in the form of infinite trigonometric series. This approach is applied to the complete system of Navier–Stokes equations describing three-dimensional unsteady flows of a compressible viscous heat-conducting gas.

Key words: complete system of Navier-Stokes equations, Cauchy problem, trigonometric series, approximate solutions.

Методика построения решений различных нелинейных уравнений и систем с частными производными в виде бесконечных тригонометрических рядов уже применялась [1-4]. В данной работе предложенная методика применена к полной системе уравнений Навье-Стокса, описывающей трехмерные нестационарные течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа.

В пространстве *Oxyz* в области, представляющей собой куб, ставится задача Коши с непрерывными начальными данными. После соответствующего продолжения этих данных на область большего размера решение задачи Коши представляется в виде соответствующих тригонометрических рядов по пространственным переменным. Коэффициенты рядов являются искомыми функциями, зависящими от времени. Для этих коэффициентов приведена бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме с соответствующими начальными условиями. С помощью тождественных преобразований от бесконечных двойных сумм сделан переход к одинарным бесконечным суммам.

Для последующего построения приближенных решений используются конечные отрезки тригонометрических сумм и численно решаются конечные системы обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов этих сумм.

Использованные источники:

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск: Наука, Екатеринбург: УрГУПС, 2014.
2. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргерса тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, Том 11, № 4, с. 305–318.
3. Баутин С.П., Карелина О. А., Обухов А. Г. Представление решений системы уравнений движения с помощью тригонометрических рядов // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2023. Том 12, № 1. С. 39–51.
4. Баутин С.П., Вазиева И.А. Представление решений одномерного нелинейного уравнения теплопроводности тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2024, Том 13, №3, с. 154–159.

МЕТОДЫ РАДИОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ *GNSS*

Валов М.В.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
atomskils@gmail.com

В работе рассмотрены методы автономного радиопозиционирования в условиях отсутствия сигналов GNSS. Представлен анализ метода TDOA как основного инструмента определения координат БПЛА с использованием стационарных наземных опорных точек. Проведено сравнительное исследование трёх радиотехнологий: стандартного радиоканала с модуляцией QPSK/QAM, технологии UWB и LoRa по ключевым параметрам: точности позиционирования, дальности действия, скорости передачи данных и применимости на открытой местности. На основе анализа обоснована оптимальная архитектура системы локального позиционирования для сценариев, в которых использование GNSS невозможно.

Ключевые слова: радиопозиционирование, автономная навигация, подавление GNSS, UWB, LoRa, QPSK, TDOA, БПЛА, помехоустойчивость.

METHODS OF UAV RADIO POSITIONING IN GNSS-DENIED CONDITIONS

Valov M. V.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Chelyabinsk Region

This paper examines methods of autonomous radio positioning in the absence of GNSS signals. An analysis of the TDOA method is presented as the primary tool for determining UAV coordinates using stationary ground-based reference nodes. A comparative study of three radio technologies is conducted: a standard radio channel with QPSK modulation, UWB, and LoRa, evaluated across key parameters: positioning accuracy, operating range, data transfer rate, and applicability in open terrain. Based on the analysis, an optimal architecture for a local positioning system is proposed for scenarios where GNSS is unavailable.

Keywords: radio positioning, autonomous navigation, GNSS jamming, UWB, LoRa, QPSK, TDOA, UAV, interference immunity

В условиях отсутствия сигналов GNSS одной из наиболее распространённых схем автономного радиопозиционирования является метод TDOA (Time Difference of Arrival) - пассивное определение координат БПЛА по разностям времён прихода одного и того же сигнала от подвижного передатчика на несколько разнесённых наземных опорных узлов с заранее известными координатами. Для определения трёхмерных координат необходимы минимум четыре синхронизированных наземных приёмника.

Принципиальное физическое ограничение точности TDOA задаёт нижняя граница Крамера-Рао для оценки задержки сигнала с эффективной полосой и отношением сигнал/шум SNR:

$$\sigma_\tau \geq \frac{1}{2\pi \cdot B_{RMS} \cdot \sqrt{2 \cdot SNR \cdot T_{obs} \cdot B}}$$

$$\sigma_d \approx \frac{c}{B}$$

Из этого вытекает ключевое следствие, определяющее весь дальнейший анализ:

При полосе 125 кГц (LoRa) фундаментальное разрешение по дальности c/B ≈ 2.4 км.

При полосе 1 МГц - около 300м.

При полосе 10 МГц - около 30м.

При полосе 500 МГц (UWB) - около 0.6 м, что после интерполяции корреляционного пика и осреднения даёт сантиметровое разрешение.

Именно ширина полосы сигнала непосредственно определяет потолок достижимой точности TDOA. Все остальные эффекты (многолучёвость, шум приёмника, ошибки синхронизации, геометрия расстановки якорей через GDOP, дрейф тактовых генераторов) накладываются сверху.

1. Радиоканалы использующие цифровые модуляции QPSK и QAM.

Модуляции QPSK и QAM являются одними из наиболее распространённых в современных системах беспроводной передачи данных. К этой группе относятся радиоканалы передачи данных для БПЛА, построенные на модуляциях семейства PSK/QAM (QPSK, 16QAM). Типичные рабочие диапазоны - 400-470 МГц, 900 МГц, 1.3-1.5 ГГц, а также наиболее распространённые гражданские диапазоны 2.4 и 5.8 ГГц. Ширина полосы канала варьируется и, как правило, выбирается из стандартного ряда: 1.25/2.5/5/10/20 МГц.

Ключевое практическое преимущество данных модулей состоит в том, что они изначально предназначены для передачи видео и телеметрии с БПЛА, то есть уже присутствуют на борту как штатное оборудование. Это позволяет дополнительно использовать тот же сигнал для позиционирования методом TDOA без установки отдельной аппаратуры - модулирующая последовательность одновременно несёт полезную информацию и служит опорным сигналом для временно́й корреляции на наземных приёмниках.

QPSK-канал технически пригоден для TDOA, однако точность напрямую определяется шириной полосы. При полосе 1.25-2.5 МГц физическое разрешение по дальности составляет 120–240м, и реальная точность позиционирования на открытой местности - десятки-сотни метров. При расширении полосы до 10-20 МГц ошибка снижается до единиц-десятков метров при хорошем уровне сигнала и правильно выбранном расположении опорных узлов.

Основные параметры данных типов радиоканала:

Ширина полосы: 1.25/2.5/5/10/20 МГц.

Точность TDOA: при полосе 1.25-2.5 МГц - порядка 100-300м,
при 10-20 МГц на открытой местности в условиях прямой видимости - единицы-десятки метров.

Временное разрешение: ~100 нс…1 мкс (определяется шириной полосы и частотой дискретизации приёмника).

Дальность в условиях прямой видимости: на диапазоне 2.4 ГГц - до 5-10 км, на 5.8 ГГц - несколько километров при мощности передатчика 0.5-1Вт и направленных антеннах.

Скорость передачи данных: от нескольких сотен кбит/с в узкополосных конфигурациях до 10-20 Мбит/с при полосе 10-20 МГц с модуляцией QPSK/16QAM.

Совмещение данных и позиционирования: естественное - тот же сигнал используется одновременно для передачи данных и TDOA.

Синхронизация опорных узлов: обязательна - ошибка 1 нс соответствует погрешности дальности 30 см. Достигается через дисциплинированный опорный генератор или протокол PTP. Практически достижимая точность синхронизации - 1-10 нс.

Помехоустойчивость и многолучёвость: на открытой местности влияние многолучёвости относительно невелико. Тем не менее при узкой полосе разделить прямой и отражённый сигналы невозможно, что ограничивает точность TDOA.

Энергопотребление: обычно 0.5-10 Вт.

Радиоканалы с модуляцией QPSK и QAM наиболее практичное решение для совмещения передачи данных и позиционирования, поскольку используют уже имеющееся на борту БПЛА оборудование. При ширине полосы 10-20 МГц обеспечивают точность TDOA в единицы-десятки метров на дальностях до 5-10 км, что достаточно для большинства навигационных задач на открытой местности. Основное ограничение - точность позиционирования жёстко привязана к ширине полосы канала и не может быть улучшена без её увеличения.

2. UWB (Ultra-Wideband)

UWB - сверхширокополосная технология, которая передаёт данные не непрерывным сигналом, а короткими радиоимпульсами длительностью около 2 нс. Именно эта особенность делает её исключительно точной для измерения расстояний: чем короче импульс - тем точнее можно зафиксировать момент его прихода. Рабочие диапазоны: 3.5-4.5 ГГц и 6-10.6 ГГц, наиболее используемые каналы - 6.5 ГГц и 8 ГГц с шириной полосы около 500 МГц.

UWB изначально разрабатывался именно как технология точного позиционирования. Стандарт напрямую поддерживает режим TDOA: БПЛА передаёт один кадр, сеть синхронизированных наземных узлов принимает его и сравнивает временны́е метки. Каждый такой кадр одновременно является и пакетом данных - совмещение позиционирования и передачи информации встроено в стандарт.

Основные параметры:

Ширина полосы: ≥500 МГц.

Точность TDOA: 10-30 см в условиях прямой видимости. В экспериментах с БПЛА при использовании 4-6 наземных узлов - менее 18 см по каждой оси.

Временно́е разрешение: ~2 нс (длительность импульса), квантование временны́х меток - десятки пикосекунд.

Дальность в условиях прямой видимости: стандартные модули с внешней антенной - до 200 м; специализированные модули для БПЛА с усилителем мощности 4 Вт и направленными антеннами - до 2.5 км.

Скорость передачи данных: 0.11/0.85/6.81/27 Мбит/с в зависимости от режима.

Совмещение данных и позиционирования: встроено в стандарт - каждый кадр несёт и данные, и временну́ю метку для TDOA.

Синхронизация опорных узлов: субнаносекундная точность - достигается по проводу (PTP/White Rabbit) или беспроводными UWB-сообщениями (~0,25 нс).

Помехоустойчивость и многолучёвость: очень высокая - короткие импульсы позволяют разделять прямой и отражённый сигналы. На открытой местности отражение от земли надёжно отфильтровывается.

Энергопотребление: низкое в штатном режиме. При использовании усилителя мощности для дистанций более 1 км - единицы-десятки ватт.

UWB обеспечивает наилучшую точность позиционирования среди рассматриваемых технологий - на уровне сантиметров–дециметров - и является оптимальным выбором для задач, требующих высокой точности на дистанциях до 2-2,5 км. Основное ограничение -дальность действия: для покрытия больших зон необходима плотная сеть наземных узлов с усилителями мощности и направленными антеннами.

3. LoRa (Long Range, CSS)

LoRa использует модуляцию CSS (Chirp Spread Spectrum): каждый символ кодируется частотно-модулированным импульсом - чирпом, который линейно проходит всю ширину канала. Рабочие диапазоны - 433 МГц, 868 МГц, 915 МГц и 2.4 ГГц. Ширина полосы выбирается из ряда: 125/250/500 кГц. Дополнительно настраивается коэффициент расширения спектра SF (7-12): чем он выше, тем больше дальность, но ниже скорость передачи данных.

Главное преимущество LoRa - исключительная чувствительность приёмника (до -137 дБм), что позволяет принимать сигнал ниже уровня теплового шума и обеспечивает дальность в десятки километров. Каждый пакет может одновременно использоваться для передачи телеметрии и как сигнал для TDOA-геолокации - эта возможность заложена в инфраструктуре LoRaWAN.

LoRa плохо подходит для высокоточного позиционирования методом TDOA из-за узкой полосы сигнала. При полосе 500 кГц физическое разрешение по дальности составляет около 600м, при типичной 125 кГц - около 2.4км. Полевые исследования подтверждают: медианная ошибка TDOA на открытой местности - 100-250м, в лучшем случае около 50-75м при дополнительной картографической коррекции.

Основные параметры:

Ширина полосы: 125/250/500 кГц.

Точность TDOA: медиана 100-250 м на открытой местности; принципиально не лучше 30-60м.

Временное разрешение: ~2мкс при полосе 500 кГц - соответствует ходу сигнала около 670м.

Дальность в условиях прямой видимости: 10-15км в сельской местности; для БПЛА в воздухе - десятки километров.

Скорость передачи данных: очень низкая - от 250 бит/с до ~22 кбит/с.

Совмещение данных и позиционирования: каждый пакет одновременно несёт телеметрию и служит сигналом для TDOA.

Синхронизация опорных узлов: наносекундная точность - достигается через GPS-дисциплинированный генератор (10-100нс).

Помехоустойчивость и многолучёвость: очень высокая устойчивость к шуму и узкополосным помехам; однако из-за узкой полосы разделить прямой и отражённый сигналы невозможно, что принципиально ограничивает точность TDOA.

Энергопотребление: очень низкое - одно из главных преимуществ для бортового оборудования БПЛА.

LoRa обеспечивает наибольшую дальность среди рассматриваемых технологий при минимальном энергопотреблении, однако для точного позиционирования методом TDOA не подходит из-за фундаментального ограничения узкой полосы. Практическая ценность технологии - как резервный канал телеметрии и грубой геолокации на дистанциях, недоступных для UWB и QPSK-каналов.

4. Сравнение технологий

Все три рассмотренные технологии способны одновременно передавать данные и работать как сигнал-носитель для TDOA, однако их характеристики различаются принципиально. Ключевой параметр, определяющий точность: ширина полосы сигнала и дальность связи.

Параметр	QPSK / QAM	UWB	LoRa
Ширина полосы	1.25-20 МГц	≥500 МГц	125-500 кГц
Точность TDOA	Теоретически 1-50м	10–30 см	100-250 м
Дальность (прямая видимость)	5-10 км	до 2.5 км	10-15 км
Скорость передачи данных	10–20 Мбит/с	до 27 Мбит/с	0.25–22 кбит/с
Энергопотребление	среднее (0.5–10 Вт)	низкое / высокое с усилителем	очень низкое
Помехоустойчивость	средняя	высокая	высокая
Готовность оборудования на борту	штатное оборудование БПЛА	требует отдельных модулей	требует отдельных модулей

QPSK/QAM. Главное достоинство - оборудование уже стоит на борту БПЛА для передачи видео и телеметрии, поэтому позиционирование не требует дополнительной аппаратуры. Обеспечивает разумный баланс: точность в единицы-десятки метров на дальности 5-10 км. Минус - точность жёстко ограничена шириной полосы и не может быть улучшена без её расширения.

UWB. Лучшая точность среди всех технологий - сантиметры-дециметры - и высокая устойчивость к многолучёвости. Минус - малая дальность: стандартные модули работают в пределах сотен метров, и даже специальные модули с усилителем не превышают 2.5 км. Покрытие больших зон требует плотной и дорогой сети наземных узлов.

LoRa. Наибольшая дальность при минимальном энергопотреблении. Минус - узкая полоса делает технологию принципиально непригодной для точного позиционирования: ошибка TDOA составляет сотни метров. Скорость передачи данных также крайне низкая.

Применимость по масштабу зоны:

Зона ~1×1км - оптимален UWB: высокая точность достижима, дальности хватает.

Зона ~5×5км - оптимален QPSK-канал: точность единиц-десятков метров на достаточной дальности. UWB потребует сети узлов с усилителями.

Зона ~10x10км и более - QPSK-канал как основа навигации. LoRa - как резервный канал телеметрии и грубой геолокации. UWB на таких масштабах нерационален.

Заключение

Ни одна из трёх технологий не является универсальным решением - каждая занимает свою нишу.

UWB обеспечивает наивысшую точность (сантиметры-дециметры), но ограничен дальностью до 2-2.5 км. Это технология для локальных задач, требующих высокой точности: взлёт, посадка, удержание строя, точный выход в заданную точку.

Радиоканал с модуляцией QPSK/QAM - наиболее практичное решение для навигации БПЛА на открытой местности. Он использует уже имеющееся на борту оборудование, обеспечивает точность в единицы-десятки метров на дальности 5-10 км и одновременно выполняет функции передачи видео и телеметрии. Именно эта технология рекомендуется как основа системы позиционирования на дистанциях от 2км.

LoRa для точного позиционирования методом TDOA не подходит из-за фундаментального ограничения узкой полосы. Её роль - резервный дальнобойный канал телеметрии и грубой геолокации с минимальным энергопотреблением.

Оптимальной является гибридная схема: широкополосный QPSK-канал как основной источник координат и передачи данных, UWB - для прецизионной навигации в локальных зонах (посадка, точные операции), LoRa - как резервный канал на предельных дальностях. Такой подход использует сильные стороны каждой технологии и обеспечивает надёжное автономное позиционирование БПЛА в условиях отсутствия GNSS.

Использованные источники:

1. Chan Y. T., Ho K. C. A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location. IEEE Transactions on Signal Processing. 1994. Vol. 42, No. 4. P. 1905–1915. [Электронный ресурс] URL: https://doi.org/10.1109/78.301830
2. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. M. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors. 2016. Vol. 16, No. 9. Article 1466. [Электронный ресурс] URL: https://doi.org/10.3390/s16091466
3. Alarifi A., Al-Salman A., Alsaleh M. et al. Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. Sensors. 2016. Vol. 16, No. 5. Article 707. [Электронный ресурс] URL: https://doi.org/10.3390/s16050707
4. Podevijn N., Plets D., Trogh J. et al. TDoA-Based Outdoor Positioning with Tracking Algorithm in a Public LoRa Network. Wireless Communications and Mobile Computing. 2018. Article 1864209. [Электронный ресурс] URL: https://doi.org/10.1155/2018/1864209
5. Ioannides R. T., Pany T., Gibbons G. Known Vulnerabilities of Global Navigation Satellite Systems, Status, and Potential Mitigation Techniques. Proceedings of the IEEE. 2016. Vol. 104, No. 6. P. 1174–1194. [Электронный ресурс] URL: https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2535898

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Гречушкин И.Е., Шульгин А. Н.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
ivan.grechushckin@gmail.com

В работе представлен программно-аппаратный комплекс для определения осевой составляющей силы при сверлении печатных плат из стеклотекстолита. Актуальность исследования связана с высокой абразивностью и анизотропией материала, затрудняющими процесс обработки и увеличивающими износ инструмента. Разработанный динамометр основан на применении пьезоэлектрических датчиков силы, системы обработки сигналов и микроконтроллерной платформы для регистрации силовых характеристик в динамическом режиме. Проведённые эксперименты подтвердили возможность определения относительных значений силы и использования полученных данных для выбора рациональных режимов резания с минимальным давлением на печатную плату.

Ключевые слова: стеклотекстолит, печатные платы, динамометр, пьезоэлектрические датчики, осевая сила, режимы резания

DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR DETERMINING THE AXIAL COMPONENT OF CUTTING FORCE DURING PRINTED CIRCUIT BOARD DRILLING

Grechushkin I.E., Shulgin A.N.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI", Chelyabinsk Region

The paper presents a hardware-software system for determining the axial force component during drilling of fiberglass printed circuit boards. The relevance of the study is due to the high abrasiveness and anisotropic properties of the material, which complicate the machining process and increase tool wear. The developed dynamometer is based on the use of piezoelectric force sensors, a signal conditioning system, and a microcontroller platform for recording force characteristics in dynamic mode. Experimental results confirmed the possibility of determining relative force values and using the obtained data to select rational cutting conditions with minimal pressure applied to the printed circuit board.

Keywords: fiberglass laminate, printed circuit boards, dynamometer, piezoelectric sensors, axial force, cutting conditions

Стеклотекстолит является основным материалом, применяемым при изготовлении печатных плат. Его обработка затруднена из-за анизотропной структуры и высокой абразивности материала. Для снижения количества дефектов и увеличения времени стойкости инструмента необходимо подбирать эффективные режимы обработки, обеспечивающие уменьшение давления на плату в процессе резания.

Целью данной работы было создание программно-аппаратного комплекса для определения осевой составляющей силы с последующим определением рациональных режимов резания с минимальным давлением на печатную плату при сверлении.

Перед созданием прибора был проведен анализ готовых решений. Лидером в производстве динамометров, способных работать в динамическом режиме, является Kistler. За пример была взята модель MiniDyn 9257B. Его схема представлена на рисунке 1. На ней можно видеть, что в конструкции имеется 4 пьезоэлектрических датчика. Каждый такой датчик содержит внутри себя 3 отдельных чувствительных элемента (рис. 2), по одному на каждую ось. В нашей задаче не требуется измерять силы в трех направлениях, необходимо только знать осевую составляющую.

Исходя из этого, в качестве чувствительных элементов для нашего динамометра были выбраны пьезоэлектрические датчики силы GlobalTest AC23. Они имеют достаточно хороший коэффициент передачи, на уровне датчиков Kistler, а также небольшие размеры, что очень важно для нашей задачи. Данный тип датчиков преобразует оказываемую на них силу в заряд. Для дальнейшего преобразования используется специальная плата обработки сигналов пьезоэлектрических датчиков EVAL-CN0350-PMDZ, которая содержит в себе зарядовый усилитель и 12-битный АЦП. Для управления этой платой по SPI используется отладочная плата STM32 Nucleo f411re. Полученные значения собираются в пакеты и по uart отправляются на одноплатный ПК Raspberry Pi 4b. Все полученные пакеты формируются в один файл для последующей обработки. Упрощенная архитектурная схема представлена на рисунке 3, внешний вид динамометра – на рисунке 4, чувствительный элемент – на рисунке 5.

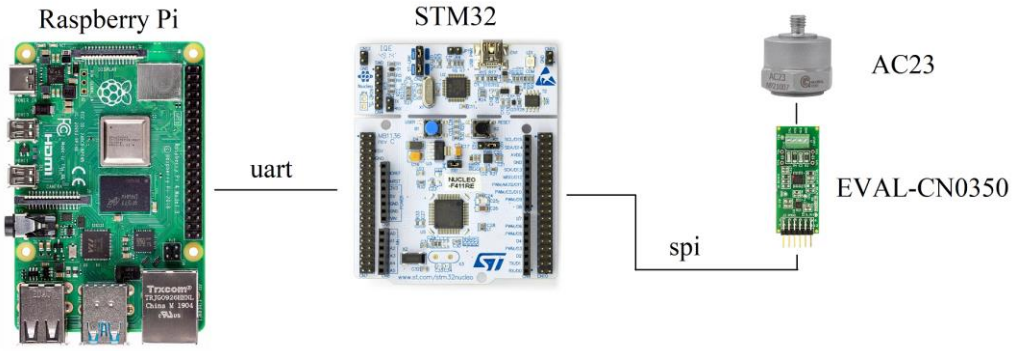


Рисунок 3. Архитектурная схема динамометра

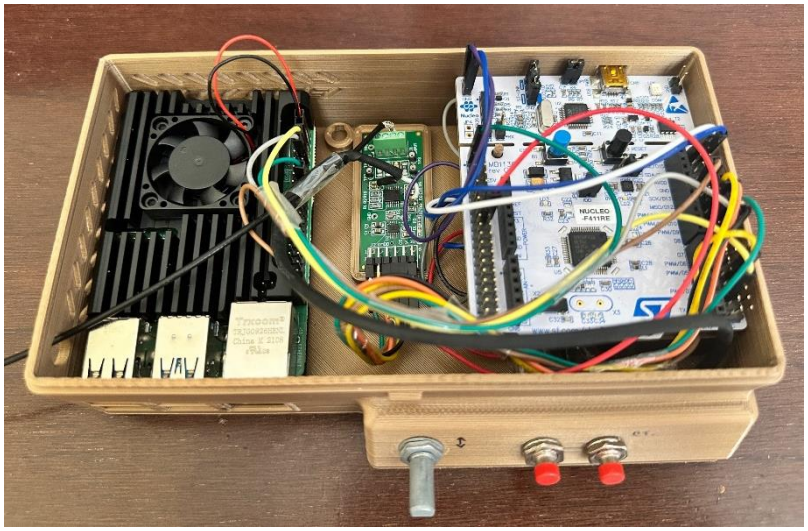


Рисунок 4. Внешний вид динамометра

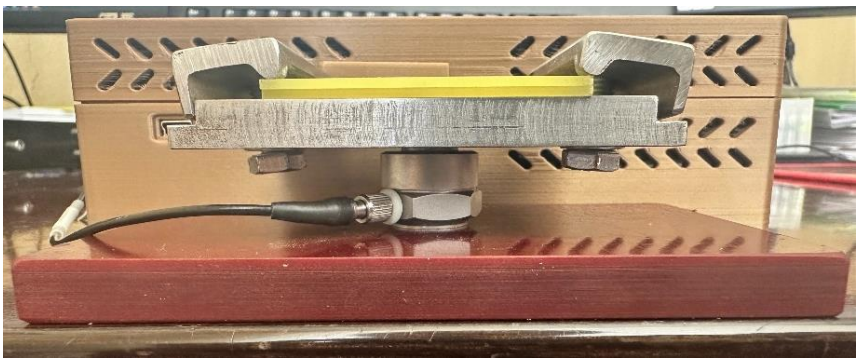


Рисунок 5. Чувствительный элемент

После сборки и отладки был проведен ряд экспериментов, которые показали возможность снятия силовых характеристик в динамическом режиме. Пример полученных данных представлен на рисунке 6.

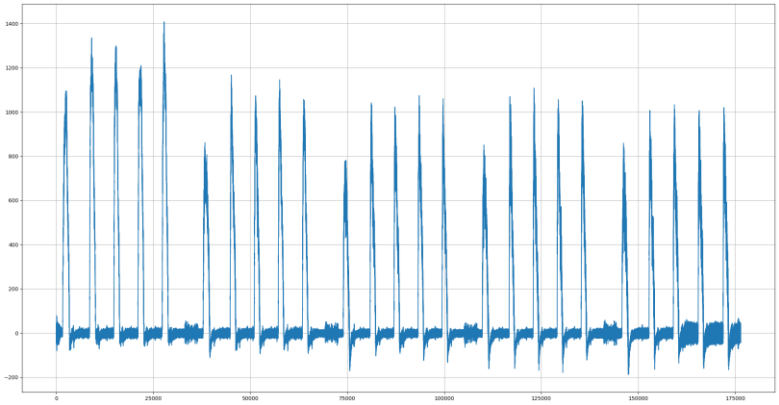


Рисунок 6. Данные с динамометра

Заключение

В ходе работы было подтверждена возможность определения относительной силы с помощью собранного динамометра, абсолютное значение в данной случае не так важно.

Также были выявлены некоторые недостатки системы:

- Жесткость станка, на котором проводились эксперименты, недостаточна для данной задачи;
- При использовании одного датчика разное расстояние от отверстия до датчика может влиять на полученные значения.

Использованные источники:

1. Гречушкин И.Е., Шульгин А.Н. Разработка алгоритма для проведения анализа и определения рациональных режимов сверления на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита. XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодёжной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 3523-3529.
2. Динамометр Kistler MiniDyn 9257B. – URL: https://www.kistler.com/INT/en/cp/multicomponent-dynamometers-9257b/P0000675 (дата обращения: 15.05.2026).
3. Датчик силы GlobalTest AC23. – URL: https://globaltest.ru/product/datchik-sily-ac23 (дата обращения: 15.05.2026).
4. AD EVAL-CN0350-PMDZ. – URL: https://www.analog.com/en/resources/reference-designs/circuits-from-the-lab/cn0350.html (дата обращения: 15.05.2026).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ТРЕБУЕМЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТАЛИ 12Х18Н10Т

Казаков[1] И.А; Гришин[1] Ю.А.

[1]ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабахина», Снежинск, Челябинская обл.

a.r.eynbaum@vniitf.ru

Аннотация

В современных технологиях 3D печать получает широкое применение, однако многие ее параметры требуют дальнейших исследований. В данной работе произведен анализ технологических факторов влияющих на механические свойства и внутреннюю микроструктуру материала. Многие изготовители не раскрывают параметров печати, которые непосредственно влияют на конечные характеристики материала. Изучение технологических факторов позволит понимать, какими характеристиками будет обладать полученный в процессе печати материал и каким образом повлияет изменение того или иного фактора на конечный продукт.

Ключевые слова: Режимы печати, свойства полученного материала, 3D печать, аддитивное производство, аустенитная нержавеющая сталь, аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, микроструктура, физико-механические свойства.

TECHNOLOGICAL FACTORS OF SELECTIVE LASER MELTING, PROVIDING THE REQUIRED PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 12CR18NI10TA

Kazakov[1] I.A; Grishin[1] Yu.A.

[1]FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia

Abstract

Among modern technologies, 3D printing is widely applied, but many of its parameters require further research. This work analyzes the technological factors affecting the mechanical properties and internal microstructure of the material. Many manufacturers do not disclose the printing parameters that directly influence the final characteristics of the material. Studying the technological factors will allow understanding what characteristics the material obtained in the printing process will possess and how the change in one or another factor will affect the final product.

Keywords: printing modes, properties of the obtained material, 3D printing, additive manufacturing, austenitic stainless steel, additive technologies, selective laser melting, microstructure, physical and mechanical properties.

Современные тенденции развития промышленности требуют выбора новых технологий производства, требующих наименьших затрат и меньшего времени на изготовление изделий. Наряду с новыми и передовыми технологиями можно отметить быстрое развитие аддитивных технологий, позволяющих создавать уникальные металлические изделия уникальной формы. Они позволяют пересмотреть весь процесс технологического производства из широкого класса материалов, таких как, металлы и сплавы, композиционные материалы, неметаллы, керамика и т.д. Они позволяют подойти к новым методам конструирования, проектирования производственных процессов.

Технология послойного селективного лазерного сплавления – одно из наиболее динамично развивающихся направлений цифрового производства. Они позволяют значительно ускорить решение задач подготовки производства. Они позволяют значительно ускорить решение задач подготовки производства, а в ряде случаев уже активно применяются для производства готовой продукции и являются прорывными технологиями настоящего времени.

В данной работе материалом для исследования был сплавленный материал из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, полученный методом послойного селективного лазерного сплавления. Хромоникелевые сплавы на основе стали являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в настоящее время в разных отраслях промышленности.

Адаптивные методы, такие как СЛС, позволяют преодолевать ограничения традиционной обработки, но требуют глубокого понимания влияния параметров печати на свойства материала. Сталь 12Х18Н10Т перспективна для машиностроения благодаря сочетанию пластичности, ударной вязкости и химической стойкости, однако критично подбирается режим термообработки и печати для предотвращения дефектов.

Использованные источники:

1. Я. Гибсон. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер; пер. с англ. И. В. Шишковского. - Москва: Техносфера, 2016. - 646 с.
2. Yasa E. , Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management 6 (2011) 4, 259-270, ISSN 1854-6250 Scientific paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/332611/2/APEM6-4_259-270.pdf
3. Сапрыкин, А. А. Влияние режимов селективного лазерного плавления на свойства сплава системы Al-Si-Mg / А. А. Сапрыкин, Н. А. Сапрыкина, Т. С. Гусева // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, 25–27 мая 2023 г., Юрга. — Томск: Изд-во ТПУ, 2023. — [С. 107-109].

РОЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СНИЖЕНИИ РУТИННОЙ НАГРУЗКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЕКТАМИ

Колмаков[1] А.Н., Ваулин[2] С.Д.
[1]ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
[2]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт экономики и управления, кафедра менеджмента, г. Екатеринбург.

Аннотация

В статье обосновывается необходимость применения современных информационных технологий в управлении научно-технологическими IT-проектами. Анализируется проблема высокой рутинной нагрузки на руководителей и исполнителей, возникающей из-за необходимости ведения множества отчётностей, синхронизации данных, контроля сроков и коммуникаций. Показано, что традиционные «ручные» подходы приводят к потере до 30–40% рабочего времени, снижению скорости принятия решений и росту ошибок. В качестве решения предлагается переход на цифровые платформы управления проектами, использующие принципы централизации данных, автоматического оповещения, предиктивной аналитики и интеграции с инструментами разработки. Статья показывает, что автоматизация рутинных операций с применением современных IT-технологий является необходимым условием для внедрения гибких и гибридных моделей управления, а также для повышения эффективности работы команд в условиях неопределённости.

Ключевые слова

Управление проектами, IT-технологии, рутинная нагрузка, автоматизация, цифровая трансформация, гибридные модели, производительность труда.

THE ROLE OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN REDUCING ROUTINE WORKLOAD IN THE MANAGEMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROJECTS

Kolmakov[1] A.N., Vaulin[2] S.D.
[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region
[1]Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Institute of Economics and Management, Department of Management, Yekaterinburg

Abstract

The article substantiates the need for the use of modern information technologies in the management of scientific and technological IT projects. The problem of high routine workload on managers and performers, arising from the need to maintain numerous reports, synchronize data, monitor deadlines and communications, is analyzed. It is shown that traditional "manual" approaches lead to a loss of up to 30–40% of working time, a decrease in the speed of decision-making and an increase in errors. As a solution, the article proposes a transition to digital project management platforms that use the principles of data centralization, automatic notification, predictive analytics and integration with development tools. The article shows that the automation of routine operations using modern IT technologies is a necessary condition for the implementation of flexible and hybrid management models, as well as for improving the efficiency of teams in conditions of uncertainty.

Keywords
Project management, IT technologies, routine workload, automation, digital transformation, hybrid models, labor productivity.

Введение

Современные научно-технологические IT-проекты характеризуются высокой степенью неопределённости, большим объёмом данных и необходимостью постоянной координации между исследователями, разработчиками и заказчиками. В таких условиях ключевым ограничителем эффективности становится не столько сложность технологических задач, сколько колоссальная рутинная нагрузка на руководителей и членов команд. Ежедневные отчёты, синхронизация статусов задач, согласование изменений, ведение документации – всё это отнимает до 30–40% рабочего времени, оставляя недостаточно ресурсов для собственно творческой и продуктивной деятельности.

Цель данной статьи – теоретически обосновать необходимость применения IT-технологий для автоматизации рутинных управленческих операций и показать, что это является фундаментом для последующего внедрения гибридных моделей управления.

1. Рутинная нагрузка как скрытый тормоз проектов

Под рутинной нагрузкой понимаются регулярно повторяющиеся, часто регламентированные операции, не требующие высокой квалификации, но занимающие значительное время. В управлении IT-проектами к таким операциям относятся: сбор и консолидация статусов задач от участников, формирование отчётов для руководства и заказчиков, рассылка напоминаний о дедлайнах, обновление диаграмм Ганта, ведение журналов изменений и рисков, согласование небольших корректировок через цепочки электронных писем.

Исследования показывают, что проектный менеджер тратит в среднем 22 часа в неделю на координационные и отчётные мероприятия, из которых лишь треть действительно требует аналитических решений. Остальное – механическое перекладывание данных из одного формата в другой. Команды разработчиков также теряют время: постоянные переключения между задачами из-за несвоевременного получения информации, повторные объяснения уже известных фактов на совещаниях, ручное заполнение нескольких систем учёта.

2. **Информационные технологии как средство структурирования и автоматизации рутинных операций**

Внедрение специализированных IT-платформ управления проектами (таких как Jira, Azure DevOps, Trello, отечественные аналоги) позволяет кардинально сократить рутинную нагрузку. Основные механизмы:

Централизация данных – все задачи, документы, обсуждения и версии хранятся в единой системе с разграничением прав доступа. Руководитель перестаёт быть «узким горлышком» – любой участник может в любой момент посмотреть актуальный статус.

Автоматические оповещения – система сама рассылает уведомления об изменении статуса, приближающемся дедлайне или появлении новой задачи. Это исключает необходимость ручных напоминаний.

Автоматическая отчётность – дашборды и графики формируются на лету. Менеджеру достаточно задать шаблон, и система еженедельно генерирует отчёт о прогрессе, рисках и отклонениях без участия команды.

Согласно данным аналитических агентств (например, Gartner, 2024), внедрение таких платформ в среднем снижает время, затрачиваемое на оперативное управление, на 25–35%.

3. Искусственный интеллект и предиктивная аналитика

Следующий уровень цифровой трансформации – использование алгоритмов искусственного интеллекта для анализа проектных данных. В 2026 году уже наблюдается широкое распространение встроенных AI-ассистентов в системах управления проектами.

Они могут:

- прогнозировать вероятные задержки на основе истории выполнения задач;

- рекомендовать оптимальное распределение ресурсов между параллельными активностями;

- автоматически выявлять аномалии (например, резкое замедление выполнения задач) и предлагать возможные причины.

Это позволяет перевести руководителя из режима реактивного «пожаротушения» в режим проактивного управления, что особенно важно в научно-технологических проектах с высокой неопределённостью.

4. Связь с гибридными моделями управления

Автоматизация рутины создаёт основу для внедрения гибких и гибридных методологий. Agile требует быстрой обратной связи и частых итераций – без IT-поддержки это выливается в хаос. Waterfall требует чёткого контроля вех – без цифровых инструментов он превращается в гору бумажной отчётности. Гибридные же модели, сочетающие итеративную разработку с жёсткими фазами планирования, вообще не могут быть реализованы «вручную» из-за сложности координации.

Таким образом, цифровая трансформация управления является не роскошью, а необходимой предпосылкой для успешной работы с современными проектами.

5. Заключение

Проведённый теоретический анализ показывает, что использование IT-технологий в управлении проектами позволяет:

- Сократить рутинную нагрузку на руководителей и команды на 25–40%;
- Увеличить скорость принятия оперативных решений за счёт автоматической актуализации данных;
- Снизить количество ошибок, связанных с человеческим фактором;
- Создать технологический фундамент для внедрения гибких и гибридных моделей управления.

Дальнейшие исследования в рамках данной темы будут направлены на разработку конкретной гибридной модели, интегрирующей описанные IT-решения, и на количественную оценку её эффективности по сравнению с традиционными подходами.

Использованные источники:

1. Gartner. Market Guide for Project and Portfolio Management Software. Gartner, 2024. – 45 p.
2. Корнев, Д. Е. Концепции цифровых трансформаций и анализ рынка ИТ-решений по управлению проектами / Д. Е. Корнев // Российские регионы в фокусе перемен. – Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур», 2025. – С. 78–82.
3. Leech, B. The Evolution of Agile and Hybrid Project Management Methodologies: A Systematic Literature Review / B. Leech, R. Hanslo // arXiv preprint arXiv:2511.02859. – 2025.
4. Sutherland, J. The Scrum Fieldbook: Faster. Better. Fewer Bugs. / J. Sutherland. – New York: Crown Business, 2024. – 256 p.
5. Кравчук, О. Інтеграція методологій Agile і Waterfall у гібридні моделі управління IT-проєктами / О. Кравчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2025. – №3. – С. 99–104.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ IT-ПРОЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ AGILE, WATERFALL И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Колмаков[1] А.Н., Ваулин[2] С.Д.
[1]*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*
[2]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт экономики и управления, кафедра менеджмента, г. Екатеринбург.*

Аннотация

В статье представлена методика построения гибридной модели управления IT-проектами, объединяющей принципы Agile, Waterfall и современные информационные технологии. Описана архитектура модели, включающая стратегический, тактический и операционный уровни, а также механизмы управления технологическими переходами и знаниями. Особое внимание уделено практическим преимуществам внедрения модели, выраженным в количественных и качественных метриках. Приводятся результаты моделирования, демонстрирующие сокращение времени выполнения проектов на 20–30%, снижение операционных затрат на 10–15% и уменьшение числа критических рисков на 20%. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной методики для управления сложными информационно-технологическими и научно-технологическими проектами в условиях высокой неопределённости.

Ключевые слова

Гибридная модель управления, IT-проекты, Agile, Waterfall, методика построения, технологические шлюзы, автоматизация, практические метрики

A METHOD FOR CONSTRUCTING A HYBRID IT PROJECT MANAGEMENT MODEL BASED ON THE INTEGRATION OF AGILE, WATERFALL AND DIGITAL TECHNOLOGIES

Kolmakov[1] A.N., Vaulin[2] S.D.
[1]*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region*
[1]*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Institute of Economics and Management, Department of Management, Yekaterinburg*

Abstract

The article presents a method for constructing a hybrid IT project management model that combines the principles of Agile, Waterfall and modern information technologies. The architecture of the model, including strategic, tactical and operational levels, as well as mechanisms for managing technological transitions and knowledge, is described. Special attention is paid to the practical advantages of implementing the model, expressed in quantitative and qualitative metrics. The results of modeling demonstrating a reduction in project execution time by 20–30%, a decrease in operating costs by 10–15% and a reduction in the number of critical risks by 20% are presented. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed method for managing complex information technology and scientific and technological projects in conditions of high uncertainty.

Keywords

Hybrid management model, IT projects, Agile, Waterfall, construction method, technological gates, automation, practical metrics.

В условиях стремительного развития информационных технологий и роста сложности IT-проектов традиционные методологии управления, такие как «чистый» Waterfall или изолированный Agile, всё чаще демонстрируют свою недостаточную эффективность. Современные исследования показывают, что интеграция элементов Agile и Waterfall в рамках гибридных моделей позволяет достичь баланса между предсказуемостью и гибкостью управления. Однако существующие подходы слабо формализуют процессы интеграции и не в полной мере используют возможности цифровых технологий для автоматизации управленческих операций. Целью данной работы является разработка методики построения гибридной модели управления IT-проектами, основанной на комбинировании Agile и Waterfall с широким применением IT-инструментов, и оценка её практической эффективности.

Предлагаемая гибридная модель базируется на трехуровневой архитектуре. На стратегическом уровне применяются принципы Waterfall (каскадная модель) для долгосрочного планирования, управления бюджетом и контроля соблюдения «технологических шлюзов». Тактический уровень реализуется с помощью элементов Scrumban, обеспечивающих адаптивное управление бэклогом задач и итеративную разработку. Операционный уровень полностью автоматизирован на базе специализированных IT-платформ (Jira, Trello или их российских аналогов), поддерживающих ежедневную работу команд. Ключевым элементом модели является механизм управления технологическими шлюзами — формализованными точками принятия решений о переходе между фазами проекта. Для автоматизации этого механизма предлагается использовать алгоритмы, встроенные в систему управления проектами: по достижении определённых KPI (например, успешное завершение тестирования прототипа или подтверждение жизнеспособности технологии) система автоматически инициирует процедуру смены статуса проекта, формирует отчёт для стейкхолдеров и перераспределяет ресурсы. Дополнительно разработана подсистема управления знаниями, которая ведёт структурированный реестр всех проектных решений, включая «неудачные эксперименты», исключая их повторение в будущем.

Практическая апробация модели проводилась методом имитационного моделирования для условного научно-технологического IT-проекта со следующими параметрами: общая длительность — 12 месяцев, бюджет — 10 млн руб., численность команды — 8 человек. Сравнивались два сценария: традиционное управление с частичной автоматизацией («базовый сценарий») и управление по предлагаемой методике («целевой сценарий»). Результаты моделирования представлены в таблице.

Табл. 1. Сравнительные метрики эффективности управления проектом

Показатель	**Базовый сценарий**	**Целевой сценарий**	**Изменение, %**
Общая длительность проекта, мес.	14,5	10,2	**–30%**
Перерасход бюджета, % от плана	24%	8%	**–16 п.п.**
Количество критических рисков, ед.	12	8	**–33%**
Время на согласование решений, дней	5	2	**–60%**
Удовлетворённость команды (5-балльная шкала)	3,2	4,5	**+41%**

Полученные данные демонстрируют, что применение предложенной методики позволяет сократить общую длительность проекта на 30% за счёт устранения простоев на этапах межфазового согласования и ускорения принятия тактических решений. Снижение перерасхода бюджета с 24% до 8% достигается благодаря жёсткому контролю ресурсов на стратегическом уровне и автоматической корректировке трудозатрат на операционном. Уменьшение числа критических рисков на треть объясняется наличием реестра знаний и протоколов автоматизированного анализа. Рост удовлетворённости команды (+41%) связан со значительным сокращением рутинной отчётной нагрузки: большая часть отчётности формируется автоматически на основе данных, уже введённых в систему для учёта рабочего времени и статусов задач.

Таким образом, разработанная методика построения гибридной модели управления IT-проектами на основе интеграции Agile, Waterfall и IT-технологий подтверждает свою эффективность. Результаты количественного сравнения с традиционными подходами свидетельствуют о значительном сокращении сроков, бюджета и рисков (на 20–30% по ключевым метрикам) при одновременном улучшении качества работы команды. Предложенные решения могут быть масштабированы для широкого круга проектов в области информатики, вычислительной техники и научно-технологических разработок. Направлением дальнейших исследований является создание программного прототипа платформы, реализующей описанную модель, и её апробация в реальной организации.

Использованные источники:

1. Leech, B., Hanslo, R. The Evolution of Agile and Hybrid Project Management Methodologies: A Systematic Literature Review. arXiv preprint arXiv:2511.02859, 2025.
2. Kravchuk, O. Integration of Agile and Waterfall Methodologies into Hybrid IT Project Management Models: Challenges and Benefits. Measuring and Computing Devices in Technological Processes, (3), 2025, pp. 99–104.
3. Boanță, L. F., Marin, A., Zapciu, M. Method to Develop Hybrid Management Models for R&D Projects by Using a Morphological Analysis Matrix. Annals: Series on Engineering Sciences (Academy of Romanian Scientists), Vol. 16, Iss. 2, 2024, pp. 68–82.
4. Кравчук, О. Інтеграція методологій Agile і Waterfall у гібридні моделі управління IT-проєктами: виклики та переваги. Вісник Хмельницького національного університету, (3), 2025, с. 99–104.
5. Корнев, Д. Е. Концепции цифровых трансформаций и анализ рынка ИТ-решений по управлению проектами. В сб.: Российские регионы в фокусе перемен. Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур», 2025, с. 78–82.

МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДРОСТКОВОГО НАСТАВНИЧЕСТВА «РАВНЫЙ — РАВНОМУ» В ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ШКОЛЬНИКОВ

Певнева Н.А., Попова А.И.
[1]*ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.*

Аннотация. В статье представлена модель вертикального подросткового наставничества «равный — равному», разработанная и апробированная в СФТИ НИЯУ МИФИ совместно с партнёрскими школами г. Снежинска. Модель решает проблему дефицита квалифицированного сопровождения проектной деятельности учащихся 5–6 классов в условиях малых городов и ЗАТО. Основу модели составляет триада: феноменологический практикум, подготовка наставников (студентов и старшеклассников) по программе «Основы фасилитации и проектного менеджмента», а также системный сбор эмпирических данных для оценки эффективности. Приведены результаты пилотного эксперимента, подтверждающие значительный рост исследовательской мотивации младших школьников и формирование педагогических компетенций у наставников. Описан методический кейс, готовый к тиражированию. Модель признана победителем Международного конкурса «Большие вызовы» (трек «Когнитивные технологии»).

Ключевые слова: подростковое наставничество, модель «равный — равному», проектная деятельность, пропедевтика физики, фасилитация, когнитивное развитие, «Сириус.Лето».

VERTICAL TEEN MENTORING MODEL “EQUAL TO EQUAL” IN SCHOOL STUDENTS’ PROJECT ACTIVITIES

Pevneva N.A., Popova A.I.
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI", Snezhinsk, Chelyabinsk Region

Abstract. The article presents a model of vertical teen mentoring “equal to equal” developed and tested at SFTI NRNU MEPhI in partnership with schools of Snezhinsk. The model addresses the lack of qualified support for project activities of 5th–6th grade students in small towns and restricted administrative territories. The core of the model includes a phenomenological workshop, training of mentors (university students and high school students) in “Fundamentals of facilitation and project management”, and systematic collection of empirical data to assess effectiveness. The results of a pilot experiment (November 2025 – January 2026, N=26 younger students, N=3 high-school mentors) are presented, demonstrating a significant increase in research motivation of younger students (from 7.7% to 92.3% willing to continue research) and the development of pedagogical competencies in mentors. A methodological toolkit ready for replication is described. The model won the International competition “Bolshiye Vyzovy” (track “Cognitive technologies”).

Keywords: teen mentoring, “equal to equal” model, project activity, propaedeutics of physics, facilitation, cognitive development, “Sirius.Leto”.

Введение: проблема дефицита наставничества в проектной деятельности

В школах и вузах Российской Федерации проектный подход декларируется на уровне федеральных государственных образовательных стандартов. Однако массовая практика показывает, что учащиеся 5–6 классов зачастую остаются без квалифицированного сопровождения. Как следствие, проекты превращаются в формальные «скачивания рефератов», а реальные исследовательские и инженерные навыки не

развиваются. Особенно остро проблема проявляется в малых городах и сельской местности, где отсутствует доступ к вузовским кружкам и лабораториям, а дефицит учителей физики и математики достигает 30% и более (в том числе в ЗАТО г. Снежинск).

Проведённый авторами опрос в 5-м классе партнёрской школы №125 г. Снежинска выявил характерный разрыв: 69% детей декларируют интерес к науке, однако лишь 7,7% готовы самостоятельно предпринимать шаги для исследования. Причин несколько: нехватка учителей, высокая стоимость услуг профессиональных тьюторов (от 20 000 руб. за разовое занятие), отсутствие легитимных форматов для старшеклассников, которые могли бы стать наставниками.

Существующие успешные практики, такие как Всероссийская инициатива «Сириус.Лето: начни свой проект», охватывают исключительно студентов и не работают в школах без вузовской инфраструктуры. При этом потенциал старшеклассников практически не используется: они хотят пробовать себя в педагогике и управлении, но не имеют ни методической поддержки, ни признания.

Цель данной работы — описать и обосновать модель вертикального подросткового наставничества «равный — равному», которая позволяет вовлечь в проектную деятельность учащихся с 5–6 классов и дать профессиональную пробу старшим (студентам и старшеклассникам) при низкой себестоимости и тиражируемости.

Модель вертикального наставничества: структура и ключевые компоненты

Предлагаемая модель базируется на четырёхлетнем опыте участия СФТИ НИЯУ МИФИ в инициативе «Сириус.Лето», где студенты успешно выступают наставниками школьников. Однако существующая система доступна только вузам. Наша задача — распространить наставничество на три уровня: «студент — школьник», «старшеклассник — младший школьник» и, в перспективе, внутрисемейное наставничество.

Суть модели: наставник (студент или старшеклассник) проходит 16-часовую подготовку по основам когнитивной психологии, фасилитации и проектному менеджменту, после чего сопровождает проектную команду младших школьников. Наставник не передаёт готовые знания, а помогает ставить цели, планировать, искать информацию, проводить эксперименты, оформлять результат и рефлексировать.

Ключевой продукт — методический кейс, включающий:

- рабочую тетрадь для младшего школьника «Навигатор проектной работы»;
- памятку наставника;
- чек-листы наблюдения (поведенческие и когнитивные индикаторы);
- анкеты обратной связи;
- программу подготовки наставников.

Особенность модели — её экосистемный характер: она реализуется через связку «школа (учитель-супервизор) — старшеклассник-наставник — вуз (методическое сопровождение)». При этом старшеклассники выступают не только фасилитаторами, но и исследователями собственной деятельности: они разрабатывают диагностические инструменты, ведут протоколы наблюдения, анализируют динамику младших школьников.

Организация и методы пилотного эксперимента

В 2025–2026 учебном году на базе СФТИ НИЯУ МИФИ и МБОУ СОШ №125 г. Снежинска был реализован пилотный проект «Физика до физики» (руководитель — Певнева Н.А.). В эксперименте приняли участие три старшеклассника-наставника (9–10 классы, автор проекта — ученица 9 класса София Трофимова) и группа учащихся 5-х классов (N=26 на итоговом событии, N=13 — на входной диагностике).

Диагностический инструментарий, разработанный наставниками при поддержке вуза, включал:

- анкеты для оценки мотивации и интереса (до и после);

- чек-листы вовлечённости и когнитивной нагрузки (заполнялись наставниками на каждом занятии);
- протоколы включённого наблюдения;
- рефлексивные отчёты наставников.

Для оценки надёжности чек-листов была проведена межэкспертная оценка (два независимых наблюдателя) — коэффициент согласия составил >85%, что позволяет использовать инструмент для дальнейших исследований.

Результаты и их обсуждение

4.1. Динамика мотивации и когнитивных представлений младших школьников

Сравнительный анализ входной (N=13) и выходной (N=26) диагностики показал:

- Доля детей, считающих физику «интересной» или «полезной», выросла с 69,2% до 80,8%.
- Доля детей, желающих продолжать самостоятельные исследования, увеличилась с **7,7% до 92,3%** (ключевой показатель).
- 92,3% респондентов правильно усвоили идею о превращении энергии (абстрактное понятие, не входящее в программу 5 класса).
- 57,7% лучшим моментом назвали возможность провести эксперимент самостоятельно (а не увидеть демонстрацию или услышать объяснение).

Эти данные подтверждают, что формат «равный — равному» снижает страх ошибки и повышает учебную активность младших подростков. Доверительная коммуникация с наставником, который лишь на несколько лет старше, создаёт безопасную среду для проб.

Компетенции наставников-старшеклассников

Качественный анализ рефлексивных отчётов, разработанных диагностических материалов и видеозаписей занятий выявил у трёх наставников развитие следующих компетенций:

- проектные и управленческие навыки (планирование цикла занятий, распределение ролей, адаптация материалов под конкретную группу);
- гибкие навыки (коммуникация с младшими, лидерство, эмпатия, публичная защита результатов);
- основы исследовательской культуры (от постановки вопроса до сбора и первичного анализа данных педагогической диагностики);
- осознанная профориентация (двое из трёх наставников заявили о намерении поступать на педагогические или психолого-педагогические направления).

Кроме того, проект получил внешнее признание: автор проекта София Трофимова стала победителем Международного конкурса «Большие вызовы» (трек «Когнитивные технологии») и получила приглашение на образовательную смену в ОЦ «Сириус» (июль 2026). Это первый случай от г. Снежинска за последние годы.

Сравнение с альтернативными форматами

В таблице 1 приведено сравнение предлагаемой модели с другими подходами к сопровождению проектной деятельности школьников.

Таблица 1. Сравнительный анализ моделей наставничества в проектной деятельности

Критерий	Выездные научные шоу	Онлайн-платформы (типа Stepik)	Вузовские кружки	Предлагаемая модель СФТИ
Основная цель	Разовое удивление, популяризация	Формирование отдельных знаний	Системное обучение	Формирование исследовательского мышления через наставничество

Характер коммуникации	Лектор — пассивная аудитория	Индивидуальное взаимодействие с контентом	Преподаватель — ученик	«Равный — равному», доверительная
Учёт возрастных особенностей 10–12 лет	Частичный	Низкий	Частичный	Высокий (игровые механики, феноменология)
Себестоимость на 1 цикл (4–6 занятий)	>20 000 руб.	0–500 руб. (платный контент)	0 руб. (при наличии)	~1500 руб. (печать тетрадей, расходники)
Тиражируемость в малых городах	Низкая (требует приезда)	Высокая (требует техники)	Низкая (нет вуза)	Высокая (силами школы)
Развитие компетенций наставника	Нет	Нет	Нет	Да (педагогические, исследовательские)

Ограничения, риски и пути их преодоления

В ходе пилотной апробации были выявлены следующие риски:

1. Выгорание наставников-волонтёров. Снижается за счёт включения деятельности в портфолио, официальной сертификации и поддержки со стороны куратора (опыт «Сириус.Лето» показывает устойчивость при наличии методического сопровождения).
2. Сопротивление учителей (боязнь потерять контроль). Преодолевается демонстрацией успешных пилотов и сохранением за учителем роли эксперта-супервизора.
3. Зависимость результатов от личности наставника. Нивелируется стандартизированной 16-часовой программой подготовки и чек-листами наблюдения.
4. Отсутствие легального статуса школьника-наставника (должностные инструкции, страховка). Это системная проблема, требующая изменения локальных актов школ; в пилоте использовались добровольческие согласия родителей.

Тем не менее, полученные данные позволяют считать модель эффективной и готовой к масштабированию при соблюдении организационных условий.

Перспективы: контролируемое исследование 2026–2027 учебного года

Для перехода модели из разряда локальной успешной практики в статус доказательной образовательной технологии в 2026–2027 учебном году запланировано контролируемое исследование на базе двух школ г. Снежинска (№125 и №135 — школа Росатома). Будут сформированы экспериментальные и контрольные группы (общий охват около 60 младших школьников, подготовка 10 наставников). Планируется сбор и анализ количественных данных (динамика интереса, когнитивные пробы) и качественных данных (интервью, рефлексивные отчёты). Итогом станет научно валидированный методический кейс и рекомендации для системы образования.

Заключение

Представленная модель вертикального подросткового наставничества «равный — равному» решает актуальную проблему дефицита доступного сопровождения проектной деятельности школьников в условиях малых городов и ЗАТО. Пилотный эксперимент показал значительный рост исследовательской мотивации младших школьников и успешное формирование педагогических и проектных компетенций у наставников-

старшеклассников. Модель отличается низкой себестоимостью, открытостью методических материалов и возможностью тиражирования силами самой школы при наличии одного педагога-куратора. Результаты опубликованы, проект признан победителем конкурса «Большие вызовы». Дальнейшее контролируемое исследование позволит подтвердить эффективность модели строгими данными и рекомендовать её к внедрению в регионах РФ.

Использованные источники:

1. Акопова М. В. Формирование метакогнитивных способностей обучающихся в образовательном процессе [Электронный ресурс] // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – Режим доступа: http://en.sciforedu.ru/system/files/articles/pdf/08__akopova_5-22.pdf (дата обращения: 18.02.2026).
2. **Гинзбург М.Р.** Методика исследования учебной мотивации // Практикум по возрастной психологии: Учебное пособие / Под ред. Л.А. Головей, Е.Ф. Рыбалко. – СПб.: Речь, 2002. – С. 120–125.
3. Жилина, В. С. Инновационный подход к формированию проектных компетенций молодежи с помощью конструктора проектной работы для инженерных классов Росатома / В. С. Жилина, Н. А. Певнева, А. И. Попова // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2025 по направлению «Инновационные ядерные технологии»: сб. науч. тр. всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию атомной промышленности (Заседания тематических секций). — М.: НИЯУ МИФИ, 2025. — С. 213–214. — URL: https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2025/02/тезисы-НС-2025_c-ISBN.pdf (дата обращения: 27.01.2026).
4. Иванова Н. Н. Формирование у младших школьников когнитивных и метакогнитивных стратегий в процессе изучения предмета «Окружающий мир» // Педагогика. – 2020. – № 4. – С. 45–52.
5. Исследование мотивации педагогов к наставнической деятельности в системе образования [Электронный ресурс] // Психологическая наука и образование. – 2024. – Т. 29. – № 2. – Режим доступа: https://psyjournals.ru/journals/pse/archive/2024_n2/Trapitsin_Granichina_et_al (дата обращения: 18.02.2026).
6. Когнитивное и метакогнитивное развитие личности в образовательном процессе: монография [Электронный ресурс]. – М.: НИУ ВШЭ, 2019. – Режим доступа: https://publications.hse.ru/pubs/share/direct/964969000.pdf (дата обращения: 18.02.2026).
7. Когнитивное развитие дошкольников и младших школьников: современные подходы и проблемы [Электронный ресурс] // Журнал «Учитель». – 2024. – Режим доступа: https://www.teacherjournal.ru/categories/24/articles/8395 (дата обращения: 18.02.2026).
8. Колмогорцев, А. М. Педагогическая магистратура в инженерно-техническом вузе: опыт создания и перспективы развития / А. М. Колмогорцев, Н. А. Певнева, О. В. Линник // Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз-2025: сб. науч. тр. XI Междунар. конф. — М.: НИЯУ МИФИ, 2025. — С. 367.
9. Наследов А.Д. Математические методы психологического исследования. – СПб.: Речь, 2012. – 392 с.
10. Особенности развития когнитивной сферы учащихся начальной школы в условиях реализации ФГОС [Электронный ресурс] // Педагогика и психология образования. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razvitiya-kognitivnoy-sfery-uchaschihsya-nachalnoy-shkoly-v-usloviyah-realizatsii-fgos (дата обращения: 18.02.2026).

11. Певнева Н.А. Пропедевтика физики в 5--6 классах через призму педагогического эксперимента / Н.А.Певнева, О.В. Линник, А.М. Колмогорцев, А.И. Попова, О.Н. Бочкарева // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2026 по направлению «Инновационные ядерные технологии»: сб. науч. тр. всерос. науч.-практ. конф. (Заседания тематических секций). — М.: НИЯУ МИФИ, 2026. — С. 224–229. — URL: https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2026/02/тезисы-НС-2026.pdf (дата обращения: 01.04.2026).
12. Педагогические условия формирования метакогнитивных умений обучающихся [Электронный ресурс] // Педагогическое образование. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/pedagogicheskie-usloviya-formirovaniya-metakognitivnyh-umeniy-obuchayuschihsya/pdf (дата обращения: 18.02.2026).

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ БЫСТРОЙ ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ВИДЕОДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Пыхов В.В.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
VVPykhov@mephi.ru

В настоящее время существует множество приложений, где необходима обработка видеоданных (большого количества изображений) с использованием нейронных сетей. При этом, кроме непосредственно использования компонентов искусственного интеллекта, часто требуются операции подготовки данных для сети и обработка результатов. Сегментация флотационной пены относится к данному типу задач.

В статье приведен процесс разработки специализированного программного обеспечения. Рассмотрены различные варианты реализации. Выполнено сравнение с точки зрения задействования аппаратных ресурсов и скорости работы. Представлена структура, позволяющая максимально ускорить процесс обработки данных, при этом задействовав все доступные ресурсы как центральных процессоров, так и ускорителей вычислений на основе технологии CUDA.

Ключевые слова: процесс флотации, размеры пузырьков, асинхронное программирование, нейронные сети

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR FAST PROCESSING OF LARGE AMOUNTS OF VIDEO DATA USING NEURAL NETWORKS

Pykhov V.V.
Snezhinsky Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University MEPhI, Chelyabinsk Region.
VVPykhov@mephi.ru

Currently, there are many applications where it is necessary to process video data (a large number of images) using neural networks. At the same time, in addition to directly using artificial intelligence components, data preparation operations for the network and processing of results are often required. Flotation foam segmentation belongs to this type of task.

The article describes the process of developing specialized software. Various implementation options are considered. A comparison was made in terms of hardware resource utilization and operating speed. A structure is presented that makes it possible to speed up the data processing process as much as possible, while using all available resources of both central processors and computing accelerators based on CUDA technology.

Keywords: flotation process, bubble sizes, asynchronous programming, neural networks

Введение

Для мониторинга процесса флотации широко используется машинное зрение. В многочисленных исследованиях подтверждено, что размер и форма пузырьков непосредственно влияют на качество процесса флотации [1]. Для того, чтобы оценить распределением пузырьков по размеру и форме, необходимо выполнить сегментацию. Сегментация изображения пены является довольно сложной задачей. Наилучшие результаты, согласно [2], показывает Unet. В [3] представлена специально обученная нейронная сеть. Даже при меньшем количестве слоев, по сравнению с оригинальной

реализацией [4], удалось получить стабильное качество сегментирования на разных видеоданных [5]. Это объясняется достаточной сложностью и хорошей обобщающей способностью данной конфигурации Unet.

При разработке алгоритмов управления технологическим процессом на основе результатов сегментации, может потребоваться многократный анализ больших объемов видеоданных. Для решения данной задачи необходимо специальное программное обеспечение, способное достаточно быстро выполнять задачи обработки изображений с использованием нейронных сетей.

Процесс сегментации и анализ результатов

В [6] приведен пример практической оценки распределения пузырьков по размерам в реальной флотационной установке на одном из обогатительных предприятий с помощью специально разработанного программного обеспечения. На рисунке 1 представлен процесс анализа изображения. Как видно из рисунка, для сегментации берется не вся видимая область, а только ее часть (белый квадрат в центре изображения, рисунок 1). Для анализа берутся кадры с определенным фиксированным интервалом, в данном примере интервал составляет 1 секунда.

Диаграмма распределения пузырьков по размерам представлена на рисунке 2. Шаг градации площадей пузырьков, а также минимально и максимально допустимый размер настраиваются перед запуском процедуры сегментации.

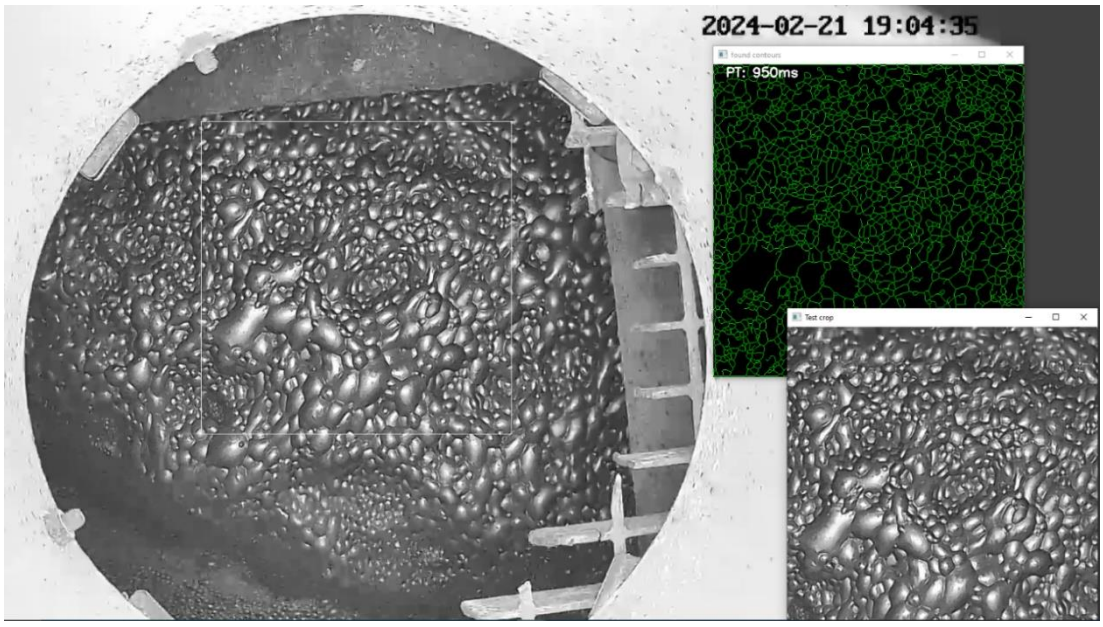


Рисунок 1. Процесс анализа изображения.

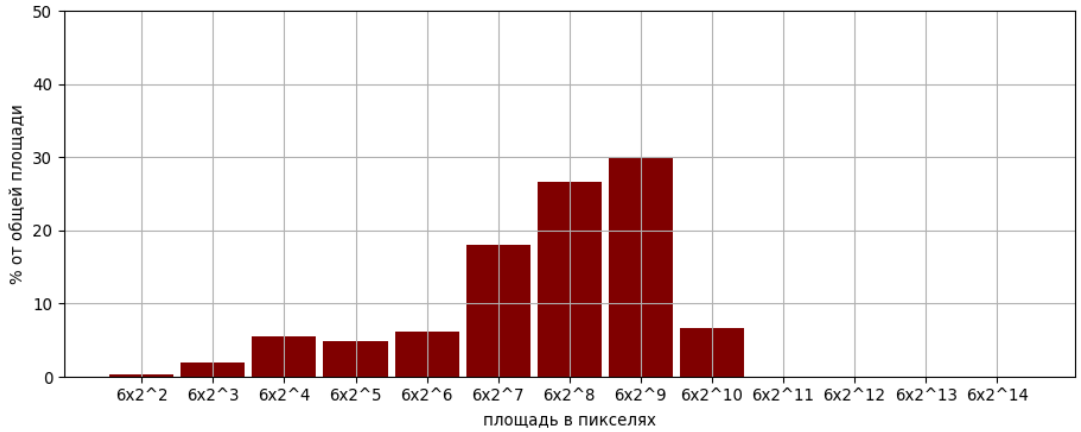


Рисунок 2. Распределение пузырьков по размерам.

Результатом работы программы является файл, содержащий относительную площадь для каждой градации размера пузырьков в соответствующий момент времени. Анализ полученного файла выполняется в специализированном программном обеспечении для научных и инженерных расчетов. Один из графиков, отражающих степень неравномерности гистограммы, представлен на рисунке 3.

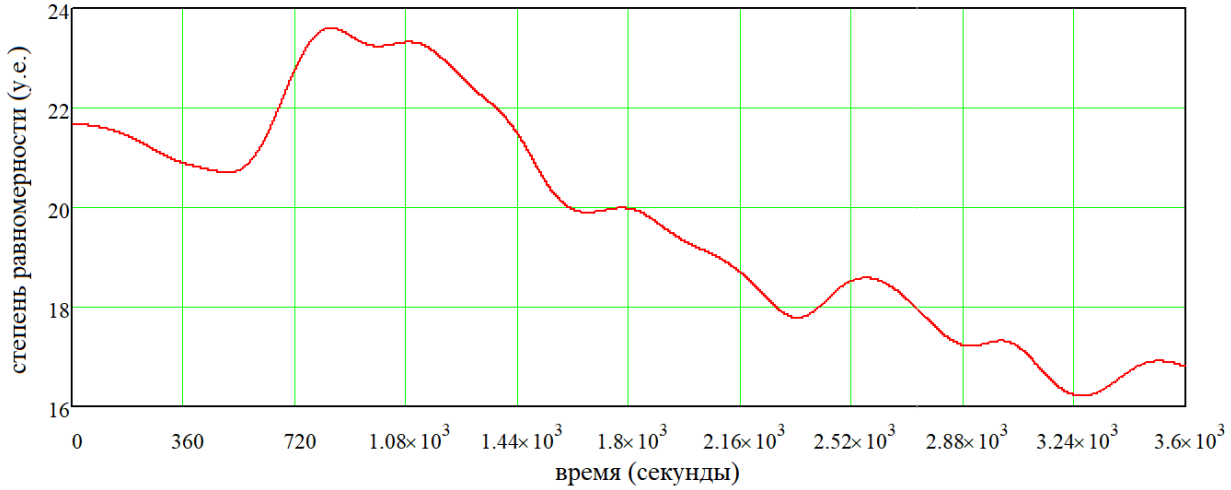


Рисунок 3. Степень равномерности гистограммы.

Чем больше значение, тем более равномерное распределение пузырьков по размерам. Отчетливо видно изменение свойств гистограммы со временем. С высокой долей вероятности, данный подход к сегментации и обработки результатов должен давать информацию о динамике и качестве процесса флотации.

Настраиваемые параметры и скорости обработки видеофайлов

На основании вышеизложенного можно выделить следующие параметры, которые необходимо настроить перед запуском процесса сегментации:

1) Положение и размер области сегментации. Изображение с видеокамеры из флотационной установки обычно кроме самой пены, содержит элементы конструкции. Выделение элементов, отличных от пузырьков (основной цели сегментации), может значительно усложнить архитектуру нейронной сети. Разные участки изображения могут иметь сильно разную освещенность, вплоть до невозможности различить отдельные пузырьки. Сегментация на таких участках может приводить к значительным ошибкам. Динамика движения пены так же может отличаться на разных участках.

2) Интервал анализа видеокадров. Стандартным значением для видеопотока является 25 кадров в секунду. Скорость движения пузырьков может быть разной по множеству причин, начиная с конструкции флотационной установки и заканчивая настройками протекающего технологического процесса. Малый интервал анализа видеокадров может привести к избыточности информации, что в свою очередь может усложнить процесс дальнейшего анализа. Большой интервал анализа может не захватывать нужный объем информации.

3) Шаг градации площадей пузырьков. Количество градаций площадей пузырьков на прямую влияет на качество анализа состояния технологического процесса, т.к. распределение пузырьков по площадям это один из основных показателей.

4) Минимально и максимально допустимый размер пузырьков. Пузырьки слишком малых размеров могут создавать избыточность при анализе, что значительно уменьшит общую скорость обработки изображения и повысит ресурсоемкость вычислений. Ограничение максимального размера защищает от возможных помех. Видеокамеры могут иметь различное разрешение и удаление от наблюдаемых объектов. Т.к. площадь пузырьков рассчитывается в пикселях, для каждой конкретной ситуации требуется свой допустимый диапазон.

В настоящие время вышеописанные работы выполняются в рамках исследования, направленного на разработку концепции управления технологическим процессом на основе изображения с видеокамер в реальном времени. Зависимости, представленные на рисунке 3, носят теоретический характер и нуждаются в практическом подтверждении. На предприятии обычно используется не одна флотационная установка, а целый каскад. Временной диапазон наблюдения за пеной в одной установке может быть от единиц до нескольких десятков часов. Учитывая количество и вариативность настраиваемых параметров, значительное количество флотационных установок, а также изначально достоверно не определенные зависимости, может понадобиться многократный повторный анализ большого временного объема видеофайлов. Для удобства анализа данных необходимо, что бы специальное программное обеспечение для сегментации изображения работало достаточно быстро.

Аппаратное и программное обеспечение

Запуск программного обеспечения для сегментации выполняется на сервере со следующим набором оборудования:

- Платформа: сервер ASUS RS720-E10-RS12
- Процессор: 2x Intel Xeon Gold 6338 3.20 ГГц 32 ядра (всего 128 логических процессоров);
- Оперативная память: Kingston DDR4 512 ГБ (8x 64 ГБ), 3200 МГц;
- Графический процессор: Nvidia A100 40 ГБ
- Хранение данных:
  1) SSD RAID 1 (операционная система): 2xSSD U.2 NVMe 960 ГБ Samsung PM9A3;
  2) SSD RAID 2 (пользовательские данные): 2xSSD U.2 NVMe 7.6 ТБ Samsung PM9A3;

На сервере установлено следующее программное обеспечение:

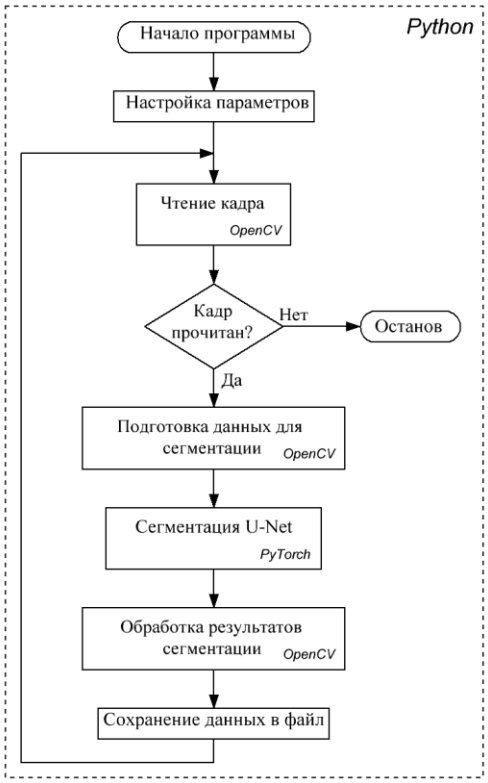
- Операционная система: Windows 10 22H2;
- Менеджер виртуального окружения для Python Conda 24.11.3 со следующим набором программного обеспечения:
  1) Python 3.13.2
  2) PyTorch: 2.6.0
  3) OpenCV: 4.10.0
- CUDA: 12.8;
- .NET Runtime 8.0.13
- Microsoft.ML.OnnxRuntime 1.20.1

Тестовый видеофайл: цветное изображение, длительность 1 час, кодек H.264, разрешение 1920x1080, 25 кадров в секунду.

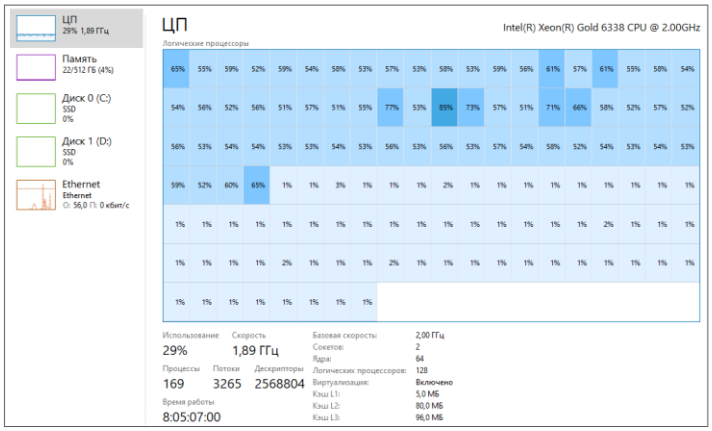
Прямая реализация в PyTourch

Изначально, разработка и тренировка нейронной сети для сегментации изображения пузырьков выполнялось с использованием фреймворка PyTorch [7]. Работа с данным программным обеспечением на языке Python позволяет довольно быстро решать поставленные задачи. Наиболее простым и самым очевидным является инференс с использование того же фреймворка и языка программирования.

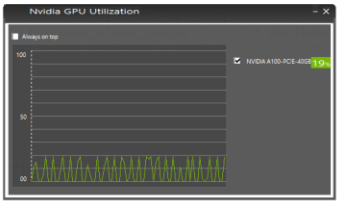
Алгоритм работы, используемые библиотеки, загрузка аппаратной части представлены на рисунке 4.



а)



б)



в)

Рисунок 4. Алгоритм работы и используемые библиотеки (а), загрузка ЦПУ (б), загрузка ГПУ (в)

Обработка видеофайла выполняется последовательно без явного параллелизма. Загрузка процессоров во время обработки составляет порядка 29%. По визуализации загрузки логических ядер очевидно, что часть функций распараллелено на уровне исходного кода используемых библиотек. Загрузка графического ускорителя неравномерная с пиками до 19%. Вероятно, это обусловлено ожиданием новых входных данных при последовательной обработке.

Время обработки видеофайла длительностью один час при анализе кадров с интервалов одна секунда в среднем составляет 2240 секунд.

Прямая реализация в .NET C#

С целью увеличения скорости обработки видеофайлов, было принято решение реализовать алгоритм на языке C# в платформе .NET. Данный язык, в отличии от Python, является компилируем, что в теории должно дать выигрыш в быстродействии при общих схожих подходах. При инференсе нейронных сетей в .NET наиболее часто используется обертка для ONNX Runtime под названием Microsoft.ML.OnnxRuntime. Модель, разработанная в PyTorch, может быть легко конвертирована в формат «.onnx».

Алгоритм работы, используемые библиотеки, загрузка аппаратной части для реализации на C# представлены на рисунке 5.

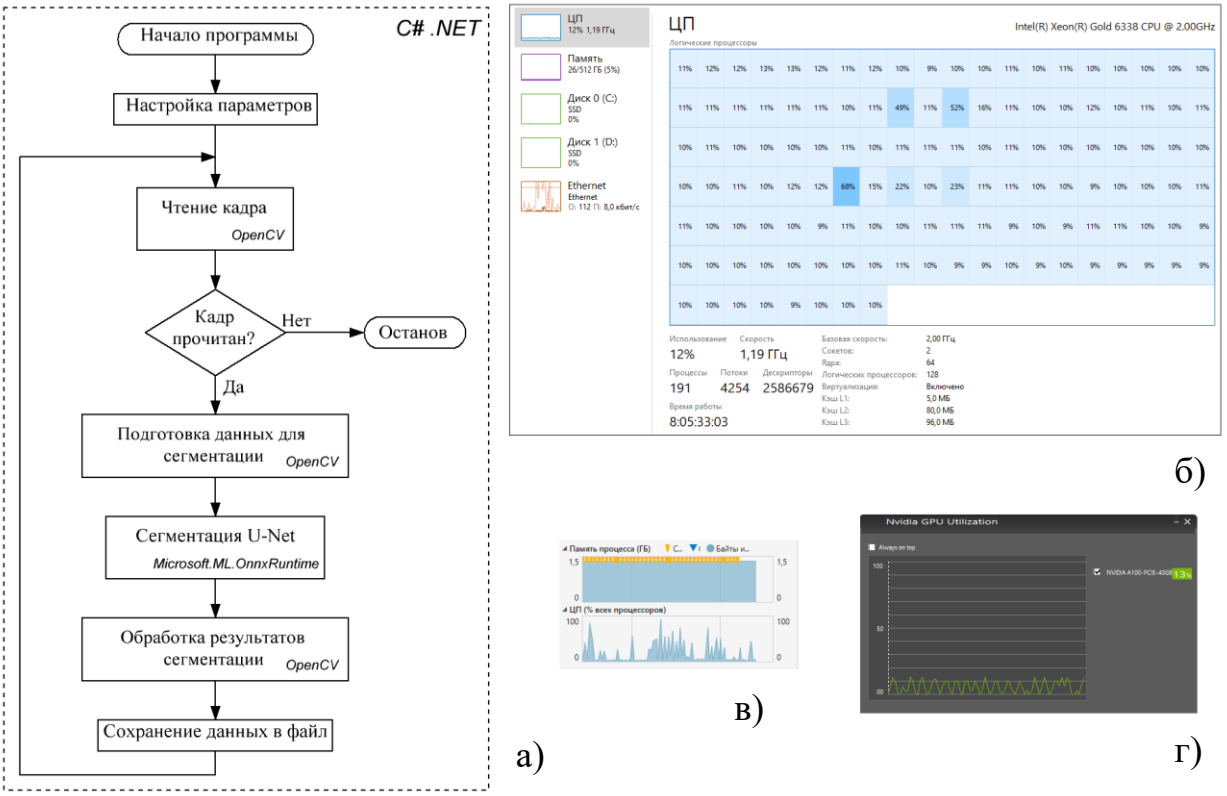


Рисунок 5. Алгоритм работы и используемые библиотеки (а),
загрузка ЦПУ (б), данные Visual Studio (в), загрузка ГПУ (г)

Алгоритм работы программы идентичен реализации на Python. Отличие только в языке программирования и движке для инференса (вместо PyTorch используется OnnxRuntime). Обработка видеофайла выполняется последовательно без явного параллелизма, на что косвенно указывает визуализация загрузки логических ядер. Загрузка процессоров во время обработки составляет порядка 12%. Загрузка графического ускорителя по-прежнему неравномерная с пиками до 13%.

Время обработки видеофайла длительностью один час при анализе кадров с интервалов одна секунда в среднем составляет 1140 секунд.

Асинхронная реализация в .NET C#

Два процессора, входящих в аппаратную платформу, имеют в общем 128 логических ядер. На рисунке 5б при выполнении программы загружены только часть из них. Очевидный путь увеличения скорости обработки данных, это задействовать все доступные ядра. Платформа .NET поддерживает модель асинхронного программирования задач. Распараллеливание на множество ядер может быть достаточно просто реализовано с использованием операторов «async» и «await».

Еще одним направлением повышения скорости обработки данных является задействование по максимуму возможностей графического ускорителя. На рисунке 5г при выполнении программы загрузка ускорителя не превышает 13%, так же очевидны моменты «простоя». Постоянный поток данных (без «простоя») может обеспечить асинхронная (многопоточная) реализация программы. Ограничения по пиковой производительности обусловлены малым размером нейронной сети, которая не способна утилизировать все ресурсы ГПУ. Данное ограничение можно преодолеть, запустив параллельно несколько копий сети внутри графического процессора.

Структура программы, используемые библиотеки, загрузка аппаратной части для асинхронной реализации представлены на рисунке 6.

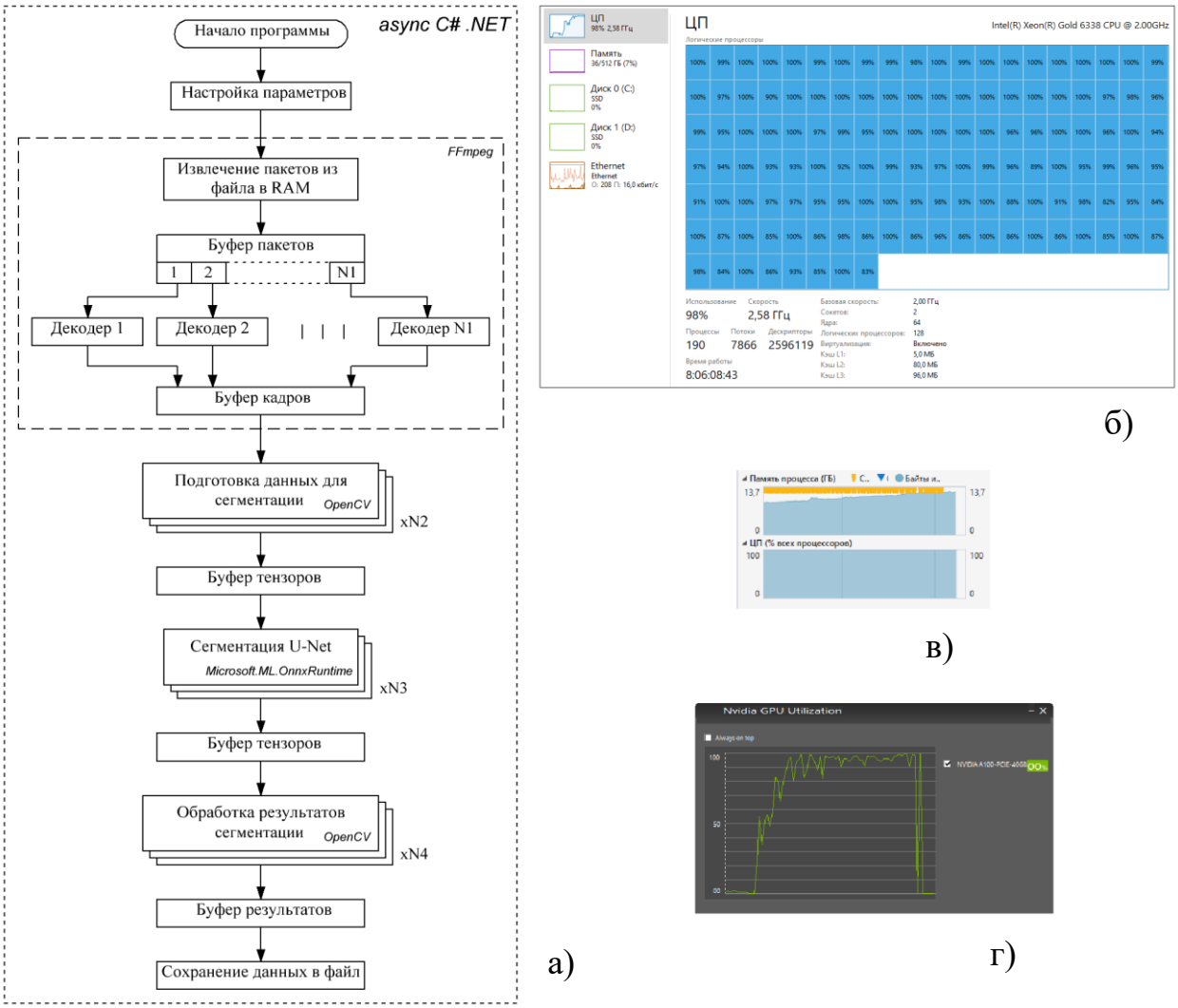


Рисунок 6. Структура программы и используемые библиотеки (а), загрузка ЦПУ (б), данные Visual Studio (в), загрузка ГПУ (г)

По сравнению с последовательными реализациями структура программы значительно усложнена. Каждый из этапов обработки данных распараллелен на несколько потоков (N1, N2, N3, N4 – максимальное количество поток для каждого модуля). Популярная библиотека OpenCV не обеспечивает в данном приложении требуемую скорость извлечения кадров из видеофайлов, поэтому на данном участке была заменена на FFmpeg [8].

При асинхронной реализации удалось полностью загрузить все ядра процессоров и утилизировать все ресурсы графического процессора. Загрузка ядер ЦПУ в среднем составляет порядка 96%. Использование ресурсов ГПУ около 100%, при этом нагрузка на графический процессор равномерная, без провалов. Следует также отметить значительно возросшее «потребление» оперативной памяти (с 1.5 ГБ до 14 ГБ), но учитывая доступный объем около 512 ГБ, это не является серьезным недостатком.

Время обработки видеофайла длительностью один час при анализе кадров с интервалов одна секунда в среднем составляет 80 секунд.

Сравнение вариантов реализации программного обеспечения

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики трех реализаций программного обеспечения для ускоренной сегментации изображений флотационной пены.

Таблица 1

Наименование параметра	Прямая в PyTourch	Прямая в .NET C#	Асинхронная в .NET C#
Загрузка ЦПУ	29%	12%	96%
Загрузка ГПУ	19%	13%	98%
Загрузка RAM	< 1.5 ГБ	≤ 1.5 ГБ	~ 14 ГБ
Время обработки файла (сек)	2240	1140	80
Время обработки фрейма (мс)	622	316	20

Под понятием «время обработки одного фрейма» подразумевается время обработки одного изображения флотационной пены. Но т.к. интервал взятия кадров для выполнения процесса сегментации может быть произвольным, это значение не соотносится на прямую с количеством кадров в видеофайле.

На основе проведенных исследований, прямые реализации являются наименее ресурсоемкими с точки зрения аппаратного обеспечения. Лучшие результаты показывает реализация на .NET C# как по быстродействию, так и по используемым ресурсам. Использование движка OnnxRuntime и языка программирования C# более предпочтительно по сравнению с Python и PyTourch для инференса.

Лучшим вариантом для ускоренного анализа большого накопленного объема видеоматериала является асинхронная реализация в .NET C#. Она обеспечивает лучшее быстродействие и может полностью задействовать предоставленные аппаратные ресурсы.

Заключение

Разработанное программное обеспечения для ускоренной сегментации изображений флотационной пены с использованием асинхронных методов и движка OnnxRuntime, позволяет быстро обрабатывать большие объемы видеоданных. При разработке использовались библиотеки с открытым исходным кодом. Разработанное программное обеспечение может быть адаптировано к любой аппаратной платформе путем настройки количества используемых потоков ЦПУ и ГПУ.

Выходными данными результата сегментации являются:

1) массивы данных, отражающих распределение пузырьков по площадям в каждый заданный момент времени;

2) массивы контуров пузырьков, отсортированные по допустимым размерам и привязанные к заданным моментам времени;

3) сегментированное изображение флотационной пены.

Это позволяет по итогам работы программного обеспечения не только получить данные для анализа распределения по размерам пузырьков, но и выполнить оценку формы, а также динамики движения пузырьков.

Т.к. программное обеспечение имеет модульную архитектуру, оно может быть легко адаптировано под любые схожие задачи. В качестве нейронной сети может быть использована любая модель, конвертированная в формат «.onnx». В асинхронные модули «Подготовки данных» и «Обработки результатов» могут быть интегрированы любые пользовательские «последовательные» функции, их запуск будет осуществлен в асинхронном режиме.

Данное программное обеспечение позволит значительно ускорить процесс анализа изображений флотационной пены для разработки алгоритма контроля и управления. Кроме того, разработанное ПО может быть использовано в любых других областях, где необходим быстрый анализ больших объемов видеоданных с использованием нейронных сетей.

Список используемых источников:

1. Пыхов В.В., Шнайдер Д.А. Методы анализа изображений пены для оптимизации процесса флотации. НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции (Снежинск, 23 марта – 24 марта 2022 г.). М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2022. С. 149–157

2. Lei Zhang, Degang Xu. Flotation bubble size distribution detection based on semantic segmentation. IFAC PapersOnLine 53-2 (2020) 11842–11847.

3. Пыхов В.В. Сегментация пузырьков флотационной пены с помощью нейронной сети U-Net. Цифровая Индустрия: Состояние и Перспективы Развития 2023 (ЦИСП'2023). Сборник научных статей. Челябинск, 2024. С. 407-414.

4. Ronneberger O., Fischer P., Brox T U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. MICCAI 2015. URL: https://arxiv.org/pdf/1505.04597.pdf (дата обращения: 25.03.2025). DOI: 10.48550/arXiv.1505.04597.

5. Пыхов В.В. Сегментация флотационной пены в реальном времени. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2024 по направлению "Инновационные ядерные технологии". Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 227-232.

6. Пыхов В.В. Анализ распределения по размерам пузырьков флотационной пены. Аспирантские чтения СФТИ НИЯУ МИФИ. Сборник трудов научного семинара. Снежинск, 2024. С. 115-121.

7. PYTORCH DOCUMENTATION. URL: https://pytorch.org/docs/stable/index.html (дата об-ращения: 25.03.2025).

8. FFmpeg. A complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video. URL: https://ffmpeg.org (дата об-ращения: 25.03.2025)

ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ НА ОСНОВЕ СЛОЖЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Сабиров А.Т., Гречушкин И.Е., Ширяев В.И., Шульгин А.Н.
ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Челябинская обл.
ivan.grechushckin@gmail.com, ATSabirov@mephi.ru, shiriaevvi@susu.ru, ANShulgin@mephi.ru

В работе проведён анализ явления импульсных усилений, возникающих при суперпозиции нескольких гармонических сигналов. Рассмотрены физические основы эффекта с позиции временной когерентности и интерференции. Показано, что всплески амплитуды являются линейным следствием периодической синфазности складывающихся колебаний, а не результатом нелинейных искажений. На примере 16-канальной фазированной антенной решётки (ФАР) на основе прямого цифрового синтеза (ПЦС) и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) продемонстрирована физическая реализация дискретного преобразования Фурье (ДПФ) через аппаратное сложение гармонических сигналов с кратными частотами. Показано, что формирование суммы гармоник с арифметической прогрессией частот эквивалентно вычислению отдельных спектральных компонент в базисе ДПФ.

Ключевые слова: импульсные усиления, интерференция, когерентность, дискретное преобразование Фурье, фазированная антенная решётка, ПЦС, ПЛИС.

PHYSICAL IMPLEMENTATION OF THE DISCRETE FOURIER TRANSFORM VIA THE SUMMATION OF HARMONIC SIGNALS

A.T.Sabirov, I.E.Grechushkin, V.I.Shiryaev, A.N.Shulgin
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Snezhinsk Physical-Technology Institute (SPhTI) –National Research Nuclear University MEPhI», Snezhinsk, Russia
ivan.grechushckin@gmail.com, ATSabirov@mephi.ru, shiriaevvi@susu.ru, ANShulgin@mephi.ru

The paper presents an analysis of the phenomenon of pulsed amplifications arising from the superposition of several harmonic signals. The physical foundations of the effect are examined from the perspective of temporal coherence and interference. It is shown that amplitude bursts are a linear consequence of periodic in-phase alignment of the summed oscillations, rather than a result of nonlinear distortions. Using a 16-channel phased antenna array based on direct digital synthesis (DDS) and a field-programmable gate array (FPGA) as an example, a physical implementation of the discrete Fourier transform (DFT) through hardware summation of harmonic signals with multiple frequencies is demonstrated. It is shown that the formation of a sum of harmonics with an arithmetic progression of frequencies is equivalent to the computation of individual spectral components in the DFT basis.

Keywords: pulsed amplifications, interference, coherence, discrete Fourier transform, phased antenna array, DDS, FPGA.

Часть 1. Физическая природа импульсных усилений

Первый рассматриваемый сигнал S1(t) представляет собой гармоническое колебание с постоянной амплитудой:

$$S1(t) = \frac{1}{\sqrt{(N)}} \cdot N \cdot A \cdot sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

Второй сигнал S2(t) образован суммой 4 гармонических колебаний с частотами, образующими арифметическую прогрессию:

$$S2(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A \cdot sin(2\pi(f_c + k \cdot \Delta f)t) \quad (2)$$

В отличие от гладкой синусоиды, S2(t) демонстрирует сложную нестационарную структуру с мощными всплесками, сменяющимися почти полным затуханием (Рисунок 1).

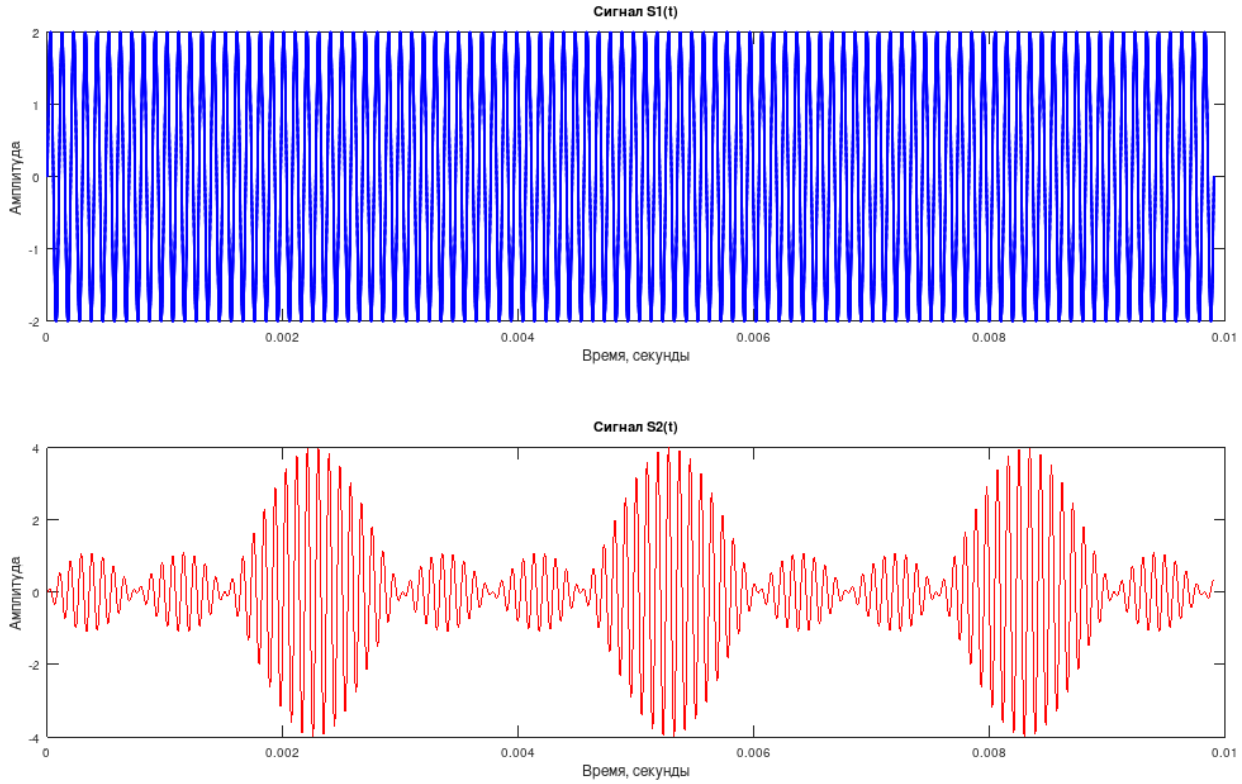


Рисунок 1- Сигналы S1(t) и S2(t) при N = 4, f_c=10.1 кГц и Δf = 331.17 Гц

При увеличении количества складываемых таким образом гармоник и сохранении постоянной разницы между частотами гармоник, эта картина становится ещё более явной (Рисунок 2).

Причина импульсных усилений — принцип суперпозиции. При одновременном прохождении нескольких волн через одну область пространства их мгновенные амплитуды алгебраически складываются. В зависимости от фазовых соотношений возможны два предельных случая:

- Конструктивная интерференция — при совпадении фаз, что ведёт к локальному усилению;
- Деструктивная интерференция — при противоположной фазе, когда результирующая амплитуда падает почти до нуля.

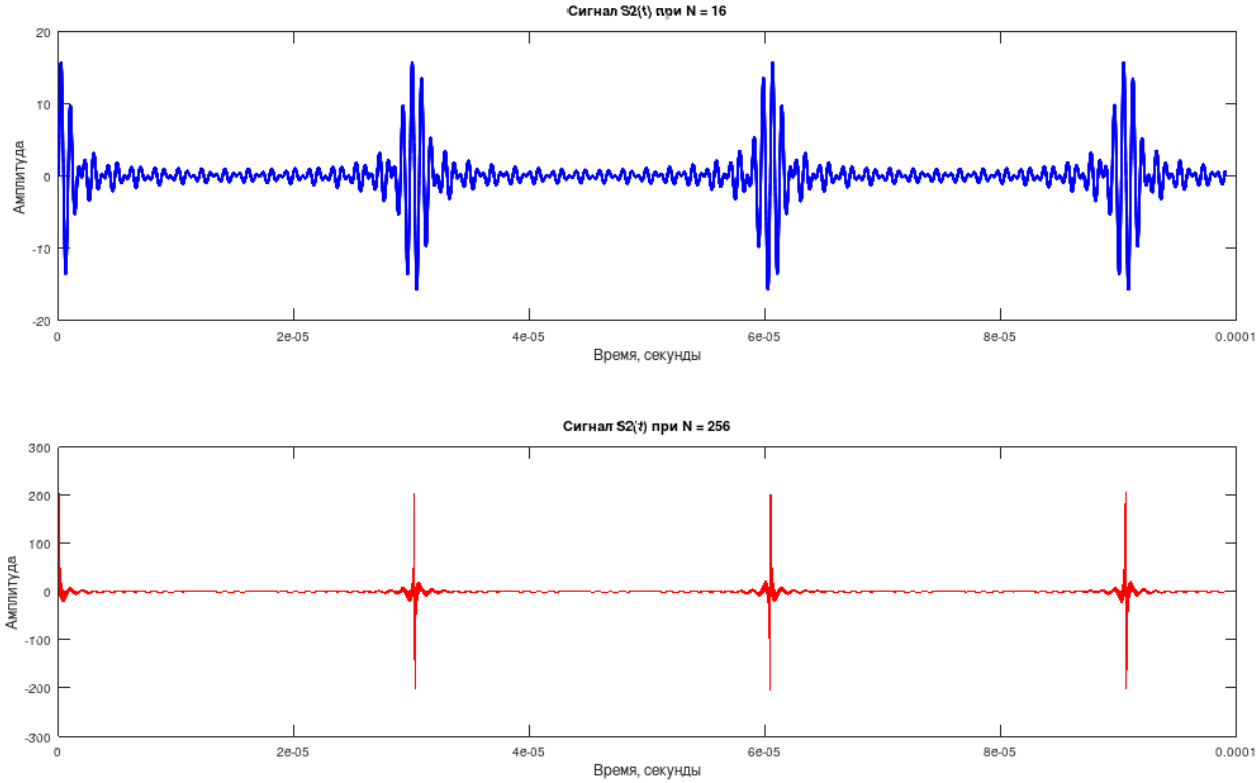


Рисунок 2- Сигнал S2(t) при N = 16 и N = 256

Поскольку частоты складываемых гармоник различны, их относительная фаза непрерывно меняется. В моменты близости фаз большинства компонентов возникает кратковременный всплеск; в другие моменты энергия взаимно гасится. Таким образом, импульсные усиления — это закономерный результат биений множества близких частот.

Стоит подчеркнуть, что эффект не является нелинейным: в системе не возникает новых частотных компонентов (интермодуляция отсутствует). Это чисто интерференционный эффект, присущий линейным волновым системам. Периодическое возвращение к синфазному состоянию объясняется тем, что частоты кратны базовой расстройке Δf, что порождает циклы временной когерентности. Важно отметить, что выражение (2) математически эквивалентно вещественной части обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) при равных амплитудах спектральных компонент. Таким образом, формирование суммы гармоник с арифметической прогрессией частот и наблюдение импульсных усилений представляет собой физическую реализацию ДПФ в волновой форме, где роль вычислителя играет интерференция.

Часть 2. Инженерная реализация в фазированной антенной решётке

Рассматриваемое устройство состоит из 16 независимых каналов, каждый из которых базируется на принципе прямого цифрового синтеза (DDS). Вычислительное ядро, реализованное в ПЛИС, содержит 16 фазовых аккумуляторов, работающих параллельно от единого тактового генератора 50 МГц. Данная архитектура является прямой инженерной реализацией модели сигнала S2(t): вместо программного формирования сложного сигнала он генерируется аппаратно в виде 16 меандров (Рисунок 3).

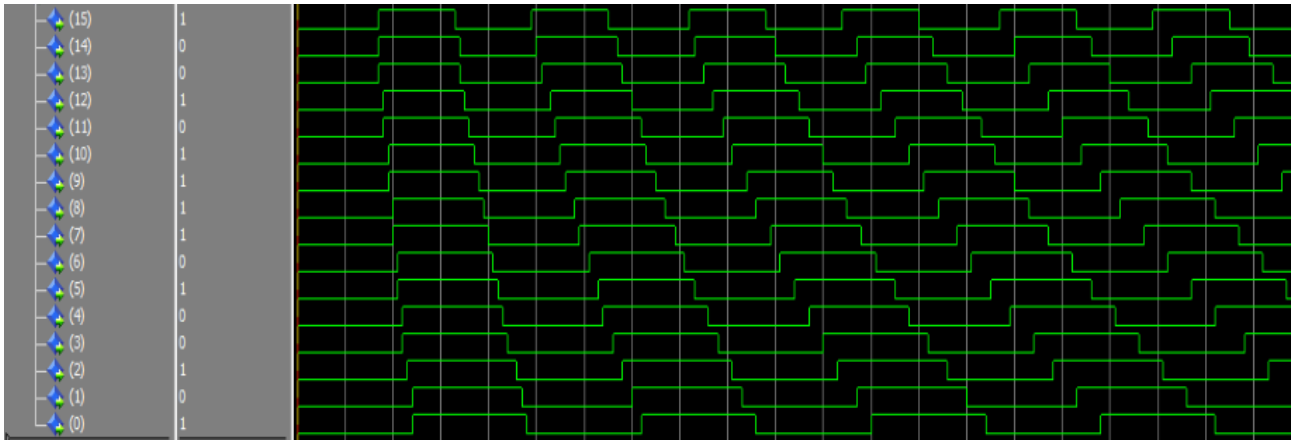


Рисунок 4 - 16 меандров при базовой частоте = 1.01 МГц и шаге 33.117 кГц

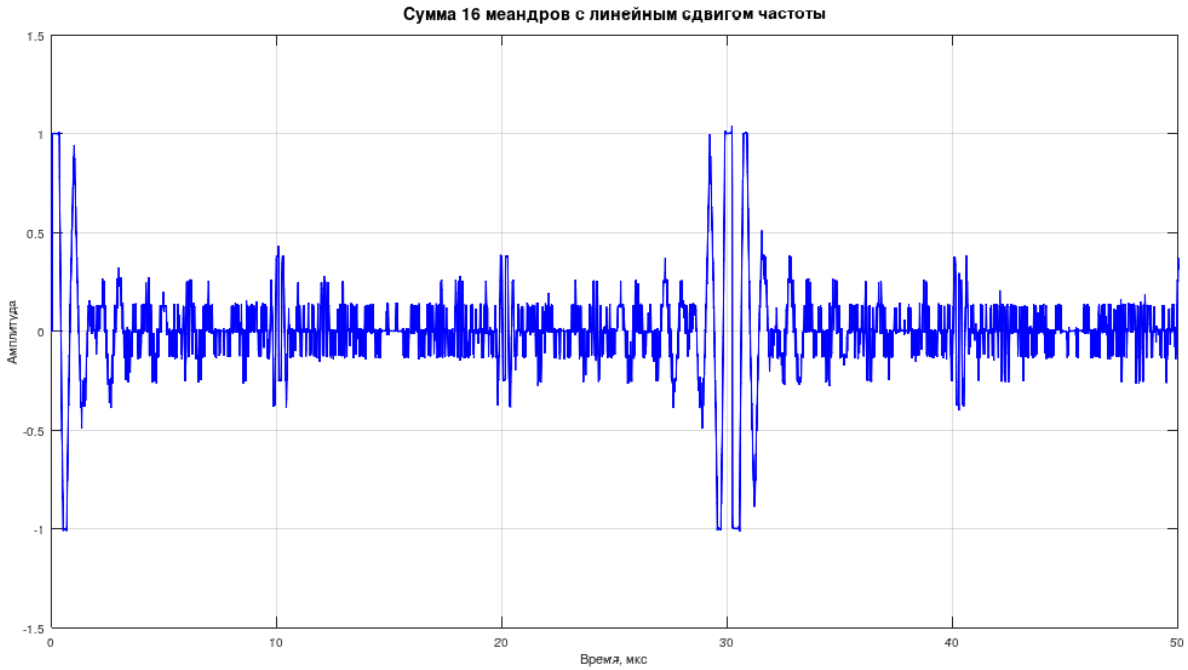


Рисунок 3- Сумма 16 меандров, реализованных в ПЛИС

Использование меандра (а не синусоиды) вносит спектральные особенности: меандр содержит нечётные гармоники. Следовательно, импульсные усиления будут возникать не только на основной частоте, но и на гармониках, однако базовый принцип суперпозиции и интерференции сохраняется (Рисунок 4).

В работе проведён анализ явления импульсных усилений, возникающих при суперпозиции нескольких гармонических сигналов. Рассмотрены физические основы эффекта с позиции временной когерентности и интерференции. Показано, что всплески амплитуды являются линейным следствием периодической синфазности складывающихся колебаний, а не результатом нелинейных искажений. На примере 16-канальной фазированной антенной решётки (ФАР) на основе прямого цифрового синтеза (ПЦС) и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) продемонстрирована физическая реализация дискретного преобразования Фурье (ДПФ) через аппаратное сложение гармонических сигналов с кратными частотами. Показано, что формирование суммы гармоник с арифметической прогрессией частот эквивалентно вычислению отдельных спектральных компонент в базисе ДПФ.

Использованные источники

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. Том 2. Волны. Оптика / И. В. Савельев. — 3-е изд., испр. — Москва: Наука, 1978. — 480 с. — Текст: непосредственный.
2. Ландсберг, Г. С. Оптика: учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. — 6-е изд., стер. — Москва: Физматлит, 2003. — 848 с. — ISBN 5-9221-0314-8. — Текст: непосредственный.
3. Борн, М. Основы оптики: пер. с англ. / М. Борн, Э. Вольф. — 2-е изд., перераб. — Москва: Наука, 1973. — 720 с. — Текст: непосредственный.
4. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов / А. Б. Сергиенко. — 3-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. — 768 с. — ISBN 978-5-9775-0687-5. — Текст: непосредственный.
5. Интерференция волн / под редакцией А. М. Прохорова // Физическая энциклопедия. — Москва: Советская энциклопедия, 1990. — Т. 2. — С. 163–164. — Текст: непосредственный.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Автор	Стр.
Безносов Н.А.	2
Вазиева И. А.	8
Валов М.В.	10
Ваулин С.Д.	21, 24
Гречушкин И.Е.	16, 42
Гришин Ю.А.	19
Казаков И.А	19
Колмаков А.Н.	21, 24
Певнева Н.А.	27
Попова А.И.	27
Пыхов В.В.	33
Сабиров А.Т.	42
Ширяев В.И.	42
Шульгин А. Н.	16, 42

Статьи сборника публикуются в авторской редакции

Оригинал-макет подготовлен Н.А. Певневой

Подписано в печать 02.06.2026. Формат 60х84 1/16
Печ. л. 10,5 Тираж 50 экз.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Каширское ш., 31.
Издательско-полиграфический отдел СФТИ НИЯУ МИФИ
456776, Снежинск, Комсомольская, 8