

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН)



ОТЧЕТ

о работе молодежной научной школы

Руководитель МНШ: **Вишневский Владимир Миронович**, д.т.н., г.н.с., лаб. 69

Разработка и исследование методов повышения надежности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ нового поколения

Срок реализации проекта: 2 года (2020-2022 гг.)

Москва 2022

Участники МНШ

№ п/п	ФИО (полностью)	Ученая степень, ученое звание, должность	Номер лаборатории	Дата рождения	Примечание
1	Иванова Ника Михайловна	м.н.с., аспирант	69	05.01.95	
2	Мухтаров Амир Амангельдыевич	н.с., аспирант	69	01.02.94	
3	Соколов Александр Михайлович	м.н.с., аспирант	69	30.10.95	
4	Федотов Иван Анатольевич	м.н.с., аспирант	69	13.02.97	
5	Аликин Константин Александрович	н.с.	69	30.11.91	
6	Абрамян Вильмен Леонович	инженер, студент 6 курса МФТИ	69	11.03.99	
7	Лесив Евгений Андреевич	м.н.с., аспирант	90	03.05.97	

Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта

Целью проекта является разработка и исследование методов повышения надежности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ нового поколения. В соответствии с целью проекта в 2021 г. планировалось выполнение следующих работ:

- Анализ надежности привязных высотных беспилотных платформ с использованием математических моделей системы k из n : G и алгоритмов машинного обучения.

- Исследование мультисервисных приоритетных систем с коррелированными входными потоками с использованием алгоритмов машинного обучения. Разработка программного комплекса для проведения параллельных численных расчетов.

- Разработка методов и алгоритмов исследования характеристик системы стабилизации электропитания и системы безаварийной посадки беспилотного модуля, обеспечивающей повышение качества функционирования и надежности привязной высотной беспилотной платформы.

- Исследование многофазной стохастической системы большой размерности с использованием алгоритмов машинного обучения.

- Разработка математических методов и алгоритмов реализации резервной системы управления и стабилизации БПЛА для надежного функционирования привязной высотной платформы в условиях ослабления или отсутствия сигналов GPS/ГЛОНАСС.

- Разработка опытного лабораторного образца системы стабилизации напряжения электропитания в составе комплекса передачи энергии земля-борт большой мощности и измерительного стенда для испытания опытных образцов.



Степень выполнения поставленных в проекте задач

План работ второго года выполнен полностью. В 2021-2022 гг. опубликовано 22 научные работы, включая 11 статей в изданиях индексируемых в WoS/Scopus (в том числе 3 статьи в журналах квартиля Q1); прочитано 12 докладов на 8-ми международных конференциях; получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Участие в научных семинарах, проведенных в рамках МНШ

Проведено 12 семинаров лаб. 69 по обсуждению плана выполнения работ МНШ и результатов решения поставленных задач.

Члены молодежной научной школы приняли активное участие в подготовке и проведении международных конференций:

- 24-ая международная конференция Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (Москва, на базе ИПУ РАН)
- Международная конференция «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем (Москва, организаторы РУДН и ИПУ РАН)
- 5-ая Международная конференция «Информационные технологии и технические средства управления» (Астрахань)

Члены молодежной научной школы также приняли участие в проведении испытаний системы идентификации транспортных средств на полигоне в г. Казань и Центральной кольцевой автодороги (ЦКАД) Московской области.

Конкурсная заявка на грант для поддержки молодежных научных школ ИПУ РАН (МНШ)

Название проекта: «Разработка математических методов проектирования и реализации макетных образцов нового поколения системы управления безопасностью на автодорогах с использованием RFID-технологии и широкополосных беспроводных средств»

Цель проекта: Разработка теоретических основ проектирования систем безопасности на протяженных транспортных магистралях.

Постановка задачи: В рамках проекта предполагается решение актуальной проблемы разработки математических методов проектирования и реализации, макетных образцов нового поколения системы управления безопасностью на автодорогах с использованием RFID-технологии и широкополосных беспроводных средств. Решение указанной проблемы будет осуществляться в соответствии с представленным ниже двухлетним планом

Срок реализации проекта: 2 года (2022-2024гг.)

1. Анализ мировых тенденций, стандартов и перспективных технологий в области построения систем безопасности на автодорогах.
2. Разработка аналитической модели взаимодействия между считывателем и меткой по протоколу EPC Class 1 Generation 2 на основе аппарата марковских и полумарковских случайных процессов.
3. Разработка методов расчета затуханий радиосигнала между считывателем и метками с использованием техники трассировки лучей.
4. Разработка аналитических моделей для анализа вероятностей битовых ошибок при передаче прямого и рассеянного сигнала с использованием машинного обучения и статистического моделирования.
5. Разработка методов анализа производительности протоколов передачи данных по широкополосным беспроводным каналам связи с использованием аппарата марковских и полумарковских случайных процессов.
6. Разработка имитационной модели радиочастотной идентификации подвижных RFID-меток на автомобилях со стационарных считывателей при многолучевом распространении сигналов и отражении от боковых поверхностей.
7. Разработка алгоритмов точного и приближенного решения задачи оптимизации параметров RFID-системы в зависимости от свойств окружения и параметров движения устройств для максимизации производительности.
8. Разработка имитационной модели передачи данных между считывателями и метками по протоколу EPC Class 1 Generation 2, учитывающая особенности распространения сигнала вблизи автодороги, использование различных антенных систем, схему управления питанием, протокол взаимодействия между считывателями и метками, сценарии выполнения операций над метками и возможность перемещения меток и/или считывателей на высоких скоростях.
9. Анализ сложности и приближенные методы на основе графового подхода для синтеза оптимальной топологии сети передачи данных в условиях ограниченного бюджета и ограничений на производительность сети в целом, учитывающие как особенности местности, так и свойства используемых протоколов и оборудования.
10. Разработка имитационной модели распределенной сети передачи данных от стационарных считывателей и видеокамер в центр обработки данных, учитывающей особенности трафика потока прочитанных меток, фото изображений и потокового видео.
11. Разработка прототипа RFID-считывателя для размещения на дроне и сбора данных с наземных RFID-меток.
12. Разработка программного обеспечения для проведения и обработки результатов эксперимента с размещением RFID-считывателя на дроне и сбора данных с наземных RFID-меток.
13. Разработка программного комплекса для автоматического управления распределенной системой идентификации со стационарными RFID-считывателями, при размещении меток на автомобилях (номерных знаках).
14. Разработка экспериментального образца RFID-считывателя, рассчитанного на идентификацию быстродвижущихся меток на больших расстояниях (до 15 метров с пассивными метками), который будет поддерживать возможность удаленной автоматической настройки, обеспечивать передачу данных о считанных метках в реальном времени по различным протоколам, включая MQTT (что также позволит подключать его к существующим системам управления в Internet of Things, IoT).

Исследование нестационарных режимов многофазной стохастической системы для проектирования широкополосных беспроводных сетей системы идентификации транспортных средств

Исполнитель МНШ: Барабанова Елизавета Александровна,
д.т.н., в.н.с., лаб. 69


Ожидаемые результаты:

1 год.


1. Математическая модель стохастической многофазной системы массового обслуживания в нестационарном режиме при инсталляции, одиночных скачках трафика и интенсивности обслуживания, периодических и непериодических повторяющихся скачках трафика и интенсивности обслуживания.
2. Пакет программ для расчета характеристик системы в соответствии с построенной аналитической моделью.

2 год

1. Математическая модель надежности широкополосной беспроводной сети системы идентификации транспортных средств на базе RFID-технологии при воздействии одиночных, периодических и непериодических помех, нарушении работоспособности узлов сети и плавающих неисправностях.
2. Пакет программ для расчета показателей надежности в соответствии с построенной аналитической моделью.



Основные результаты,
полученные за отчетный период



Анализ надежности привязных высотных беспилотных платформ с использованием математических моделей системы k из n : G и алгоритмов машинного обучения

Иванова Н.М.

м.н.с. лаб. 69

аспирант 3-го года РУДН

Постановка задачи

Система k-из-n состоит из n элементов и остается работоспособной тогда и только тогда, когда не менее k из n элементов исправны.

- A_i , $i = 1, 2, \dots$ время жизни элементов системы; соответствующая ФР
 $A(t) = \mathbb{P}\{A_i \leq t\}$
- Мгновенные отказы невозможны и среднее время жизни конечно
 $A(0) = 0, \quad a = \int_0^{\infty} (1 - A(t)) dt.$
- Случайный процесс $J = \{J(t), t \geq 0\}$, состояния которого означают количество рабочих элементов системы в момент времени t
- Исследуем функцию надежности и среднее время до отказа системы
 $R(t) = \mathbb{P}\{T > t\}, \quad m = \int_0^{\infty} R(t) dt.$

Аналитические результаты

- Однородная система k-из-n

$$R(t) = \mathbb{P}\{T > t\} = \sum_{i \geq k} C_n^i (1 - A(t))^i A(t)^{n-i}$$

- Однородная система k-из-n с учетом расположения отказавших компонент

$$\mathbf{j} = (j_1, j_2, \dots, j_n), \quad \begin{array}{l} j_i = 0 \text{ если } i\text{-й компонент вышел из строя} \\ j_i = 1 \text{ если он работает} \end{array}$$

$$R(t) = \sum_{i \geq k} \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - A(t))^{j_i} A(t)^{1-j_i}$$

Численные результаты, система 4-из-6

$$[\Gamma(1/v^2, av^2)]$$

$$[GW(\mu, \frac{a}{\Gamma(1+1/\mu)})]$$

$$[LnN(\ln \frac{a}{\sqrt{1+v^2}}, \sqrt{\ln(1+v^2)})]$$

$$a = 1$$

$$v = [0,1,0,5,1,5,10]$$

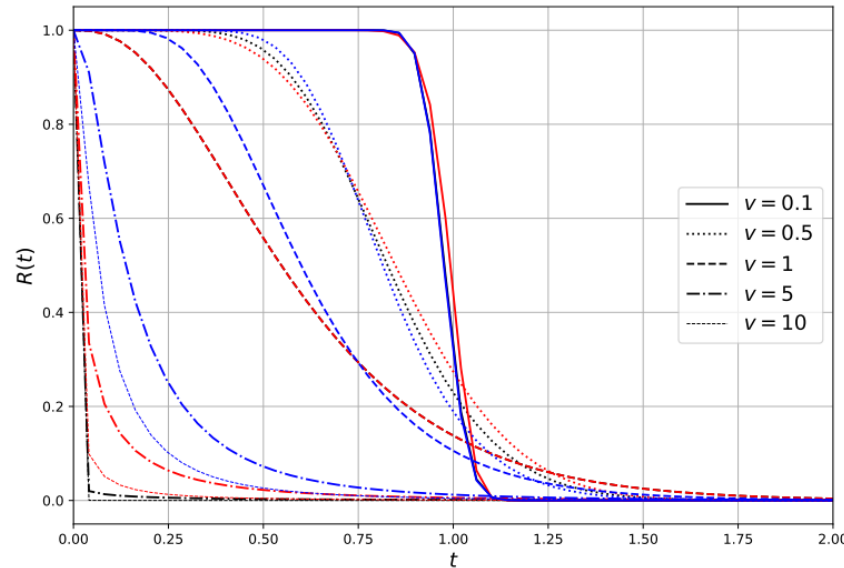


Рис. 1. Функция надежности $R(t)$ однородной системы 4-из-6:G

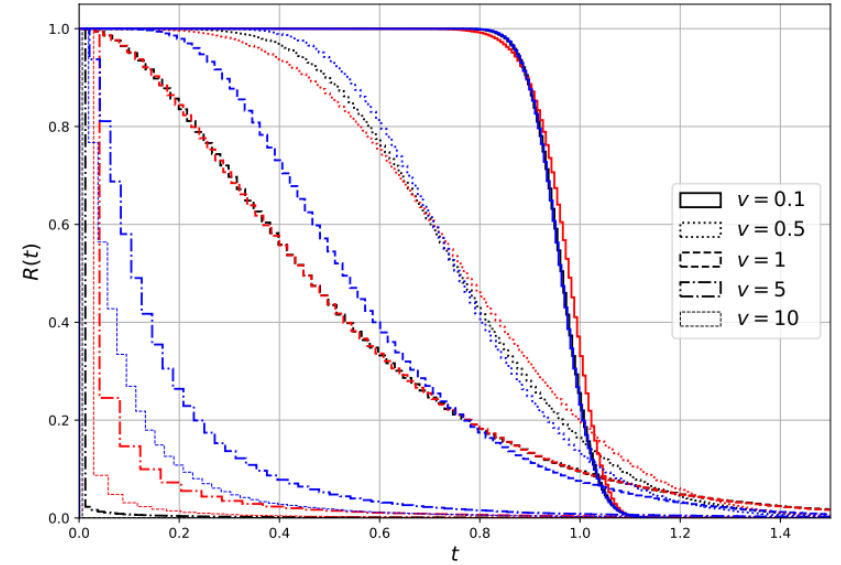


Рис. 2. Функция надежности $R(t)$ однородной системы 4*-из-6:G

$A(t) \backslash v$	0.1	0.5	1	5	10
Γ	0.9775	0.8445	0.6174	0.0077	$8 \cdot 10^{-5}$
GW	0.9886	0.8593	0.6176	0.0697	0.0197
LnN	0.9760	0.8349	0.6509	0.2047	0.1154
	0.9608	0.7747	0.5154	0.0041	$3 \cdot 10^{-5}$
	0.9693	0.7777	0.5177	0.0503	0.0136
	0.9598	0.7743	0.5714	0.1621	0.0874

Табл. 1. Среднее время жизни до первого отказа систем 4-из-6:G / 4*-из-6:G

Применение методов машинного обучения

- Линейная регрессия (LinReg),
- Полиномиальная регрессия (степень полинома 4) (PolyReg),
- Регрессия К-ближайших соседей (neighbors = 5) (KNN),
- Многоканальная регрессия с перекрестной проверкой (оценка MSE) на основе регрессии Риджа (MultiReg),
- Искусственная нейронная сеть с тремя скрытыми слоями (оптимизатор = RMSprop(1e-3), оценка MSE, размер пакета 96) (ИНС).

Тип	Переменная	Символ	Интервал значений
Вход	Общее число элементов в системе	n	4 – 10
	Необходимое число элементов для работоспособного состояния системы	k	$2 - (n - 1)$
	Среднее время безотказной работы элемента	α	0,1 - 1
	Коэффициент вариации времени жизни	ν	0,01 - 1
Выход	Надежность (как вероятность)	R	0,5 - 1
	Время для поддержания уровня надежности	t	> 0
	Среднее время до первого отказа системы	m	> 0

Табл. 2. Переменные для моделей машинного обучения и диапазоны их значений

Подготовка к обучению

Было создано два набора данных для обучения и тестирования моделей.

Для обучения модели, описывающей поведение ТНАР однородной системой k -из- n : G , был сгенерирован набор данных по формуле (1), в которой $A(t) \sim \Gamma$.

Для второго случая, когда отказ системы зависит от расположения отказавших элементов, использовались результаты моделирования, $A(t) \sim \Gamma$. Эти данные предполагают, что отказ системы происходит либо при выходе из строя 2 смежных элементов, либо при выходе из строя любых $(n - k + 1)$ элементов.

Результаты обучения и тестирования

Система k-из-n без учета расположения отказавших компонент

Табл. 3. Точность предсказания на этапе обучения

		LinReg	PolyReg	KNN	MultiReg	ANN
MSE	<i>R</i>	0.0094	0.0028	10^{-4}	0.0313	0.0094
	<i>t</i>	0.0246	0.0149	0.0110	0.0322	0.0090
	<i>m</i>	0.0093	10^{-4}	$4 * 10^{-4}$	0.0123	10^{-4}

Табл. 4. Точность предсказания на этапе тестирования

		LinReg	PolyReg	KNN	MultiReg	ANN
MSE	<i>R</i>	0.0094	0.0028	$2 * 10^{-4}$	0.0239	0.0131
	<i>t</i>	0.0177	0.0339	0.0117	0.0344	0.0322
	<i>m</i>	0.0107	0.0056	$2 * 10^{-6}$	0.0105	0.0043
MAE	<i>R</i>	0.0708	0.0365	0.0033	0.0761	0.0746
	<i>t</i>	0.1001	0.1125	0.0395	0.1395	0.1342
	<i>m</i>	0.0690	0.0121	$3 * 10^{-4}$	0.0687	0.0273
R^2	<i>R</i>	0.3804	0.8134	0.9894	0.1343	0.1370
	<i>t</i>	0.6824	0.4274	0.7891	0.3807	0.4249
	<i>m</i>	0.8934	0.9295	0.9999	0.8942	0.9571

Система k-из-n с учетом расположения отказавших компонент

Табл. 5. Точность предсказания на фазе обучения


	<i>R</i>	<i>t</i>	<i>m</i>
KNN	10^{-4}	$8.7 * 10^{-3}$	10^{-4}

Табл. 6. Точность предсказания на тесте

	<i>R</i>	<i>t</i>	<i>m</i>
MSE	$1.6 * 10^{-4}$	$8.6 * 10^{-3}$	$1.9 * 10^{-6}$
MAE	$3.6 * 10^{-3}$	0.0492	$3.3 * 10^{-4}$
R^2	0.9904	0.7545	0.9999

Публикации

1. Rykov V, Ivanova N, Kozyrev D. Application of Decomposable Semi-Regenerative Processes to the Study of k-out-of-n Systems. *Mathematics*. 2021; 9(16):1933. <https://doi.org/10.3390/math9161933> (квартиль Q1).
2. Rykov V.V., Ivanova N.M., Kozyrev D.V. Risk tree as an assistant tool for the decision-maker / Proceedings of the 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT-2021, Brno). Brno, Czech Republic: IEEE, 2021. С. 109-114. <https://doi.org/10.1109/ICUMT54235.2021.9631604>
3. Иванова Н. М., Вишнеvский В. М. Оценка надежности привязных высотных беспилотных платформ с использованием моделей систем К-из-N и методов машинного обучения // журнал "Проблемы информатики", 2021, № 4, с.16-39. DOI: 10.24412/2073-0667-2021-4-16-39
4. Рыков В.В., Козырев Д.В., Иванова Н.М. Применение теории разложимых полурегенерирующих процессов к исследованию системы k-из-n:F с частичным ремонтом / Труды 24-й Международной конференции "РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И КОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛЕНИЕ, СВЯЗЬ" (DCCN 2021, Москва). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 454-460.
5. Иванова Н.М. О чувствительности характеристик надежности системы k-из-n к форме распределения длительностей жизни и ремонта её компонент / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 54-65.
6. N. Ivanova, V. Vishnevsky. Application of k-out-of-n:G System and Machine Learning Techniques on Reliability Analysis of Tethered Unmanned Aerial Vehicle // Proceedings of the 20th International Conference, ITMM 2021, CCIS, Springer, in press.
7. N. Ivanova, V. Vishnevsky. Applications of k-out-of-n:G system and machine learning methods on reliability analysis of unmanned high-altitude module // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2021): Материалы XX Международной конференции имени А. Ф. Терпугова, в печати



Исследование характеристик приоритетной мультисервисной системы MMAP/PN/M/N с использованием методов машинного обучения

Соколов А.М.

м.н.с. лаб. 69

аспирант 3-го года ИПУ РАН

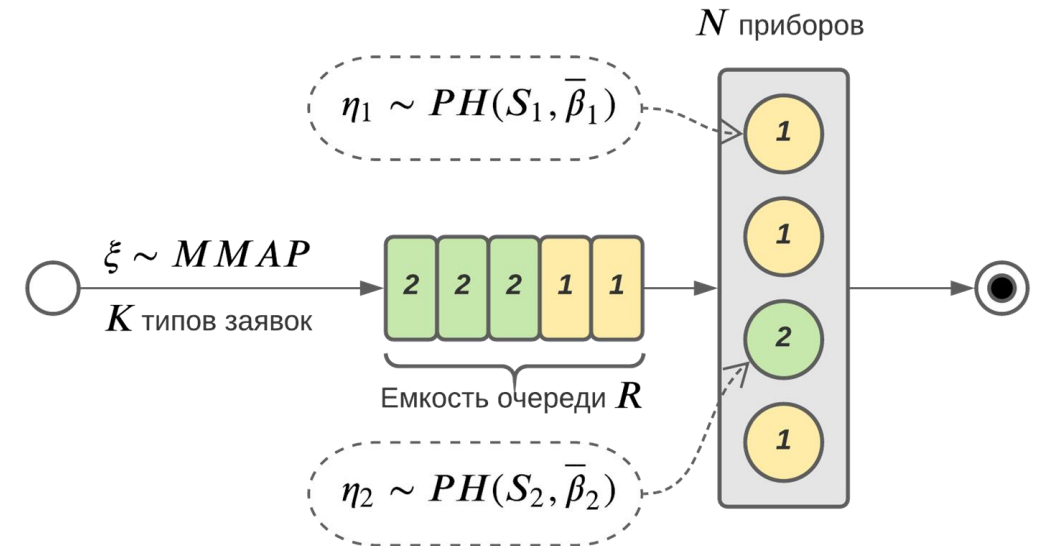
Постановка задачи

Заданы параметры системы массового обслуживания с приоритетами:

- Число обслуживающих приборов (N)
- Число типов заявок (K)
- Емкость буфера (R)
- Вероятности потери поступающих заявок, когда все приборы заняты (p_k)
- ММАР-поток входящих заявок задается матрицами D_0, \dots, D_K
- PH-распределения времени обслуживания каждого типа заявок задаются матрицами S_k и векторами начального распределения β_k

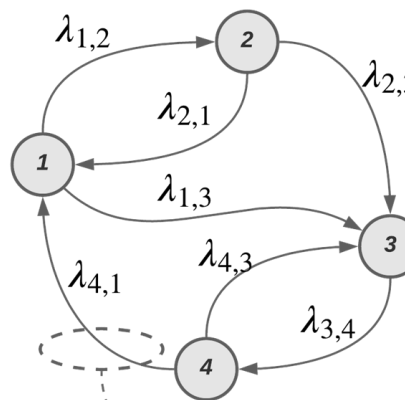
Нужно найти:

- Стационарные распределения числа пакетов в системе, буфере, на приборах
- Задержки пакетов
- Вероятности потерь



Что такое ММАР-поток?

Мультиклассовый марковский поток (Marked Markovian Arrival Process, ММАР) - разновидность коррелированных марковских потоков, в которых при каждом переходе могут создаваться заявки разных типов.



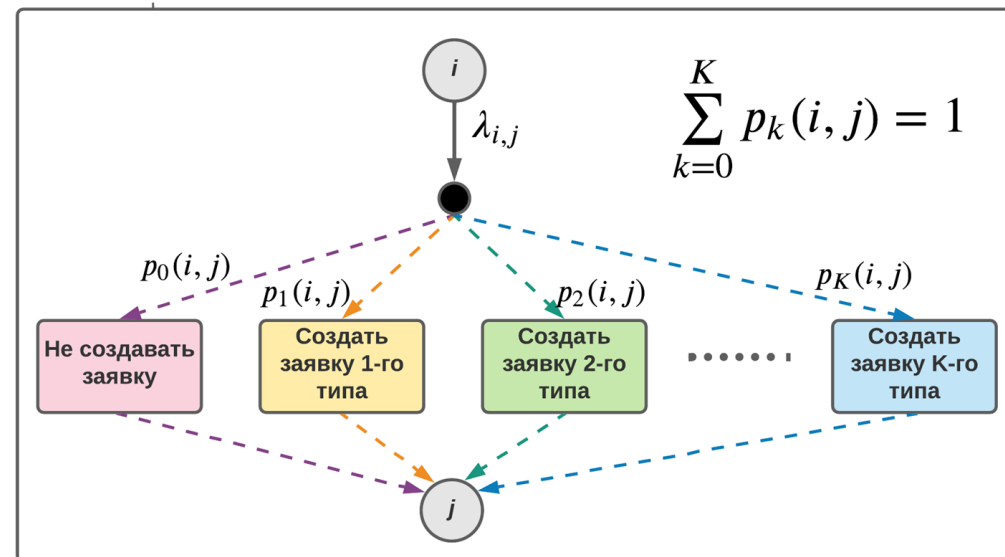
Всю информацию о ММАР - потоке удобно хранить в виде матриц D_k

$$(D_k)_{v,v'} = \lambda_v p_k(v, v'), \quad v, v' = \overline{0, W}, k = \overline{1, K},$$

$$(D_0)_{v,v'} = \begin{cases} -\lambda_v, & v = v' = \overline{0, W}, \\ \lambda_v p_0(v, v'), & v \neq v', v, v' = \overline{0, W}. \end{cases}$$

W - количество состояний

K - приоритет генерируемой заявки



Решение для двухприоритетной системы

$$Q = \begin{pmatrix} T & Q_{0,1} & O & \dots & O & O \\ Q_{1,0} & Q_{1,1} & Q_{1,2} & \dots & O & O \\ O & Q_{2,1} & Q_{2,2} & \dots & O & O \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ O & O & O & \dots & Q_{R-1,R-1} & Q_{R-1,R} \\ O & O & O & \dots & Q_{R,R-1} & Q_{R,R} \end{pmatrix}$$

- инфинитезимальный генератор

матрицы T , Q - трёхдиагональные матрицы

Генератор имеет блочную структуру. В работе найдено аналитическое решение, найдены формулы для вероятности потерь пакетов каждого класса, среднее число заявок в системе, а также среднее количество занятых приборов. На языке Python реализован расчёт модели для различных входных параметров двухприоритетной системы.

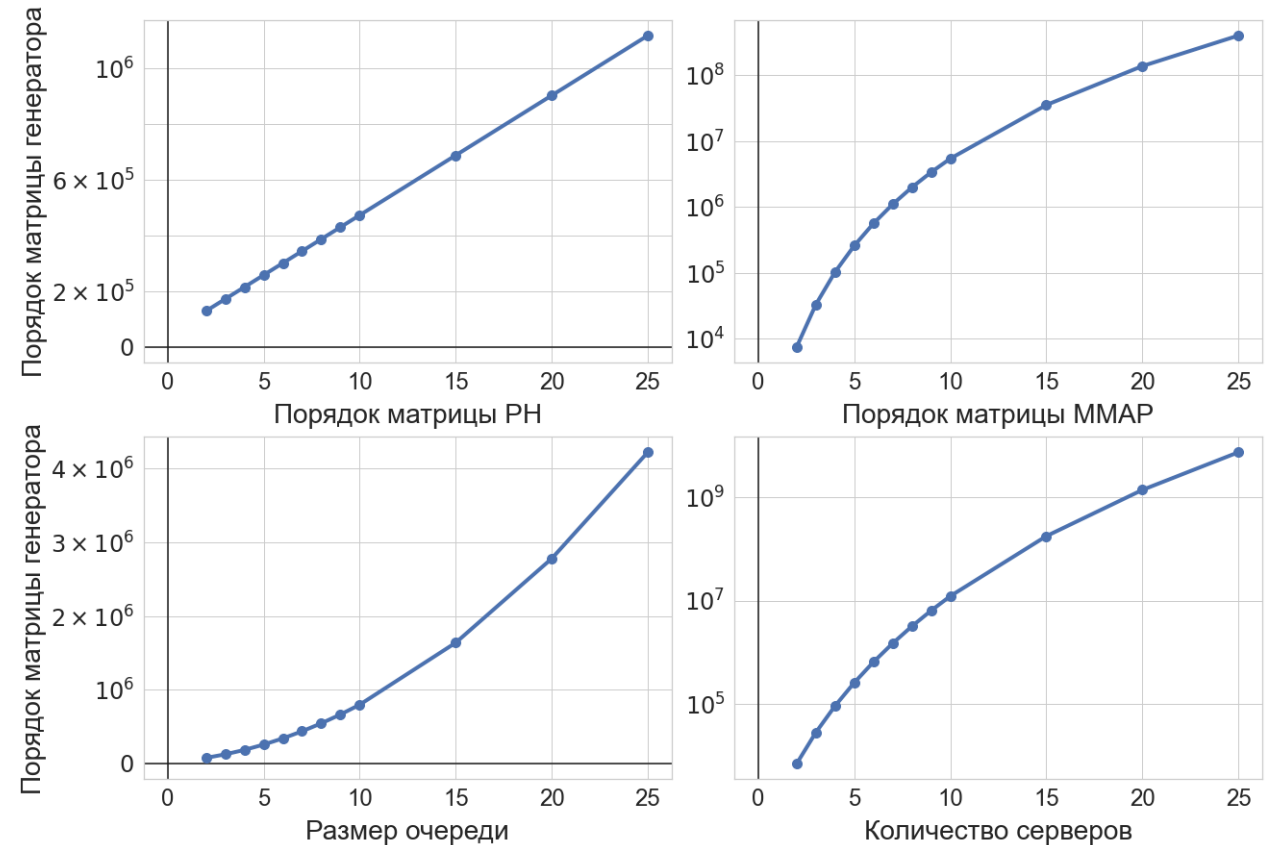
Аналитическое решение и его ограничения

Аналитическое решение:

- Строим инфинитезимальный генератор
- Находим стационарное распределение вероятностей
- Рассчитываем характеристики системы

Ограничения аналитики:

- Экспоненциальный рост размера матрицы генератора от порядка ММАР и числа приборов
- Текущая аналитическая модель предполагает только два типа заявок (обычные и приоритетные)



Время расчёта аналитической модели

Число приборов	Время построения генератора, сек.
1	0.027
2	1.184
3	34.485
4	1155.581
5	Недостаточно памяти

Пример: время для построения генератора при ММАР порядка 5, емкости буфера $R = 5$ и порядке $PH = 5$. Расчет проводился на ноутбуке со следующими характеристиками:

- процессор i7-9750H, 2.4 GHz, буст до 4.5 GHz
- 16 Гб оперативной памяти
- UNIX-like OS (MacOS)

Комбинированный метод с использованием методов машинного обучения

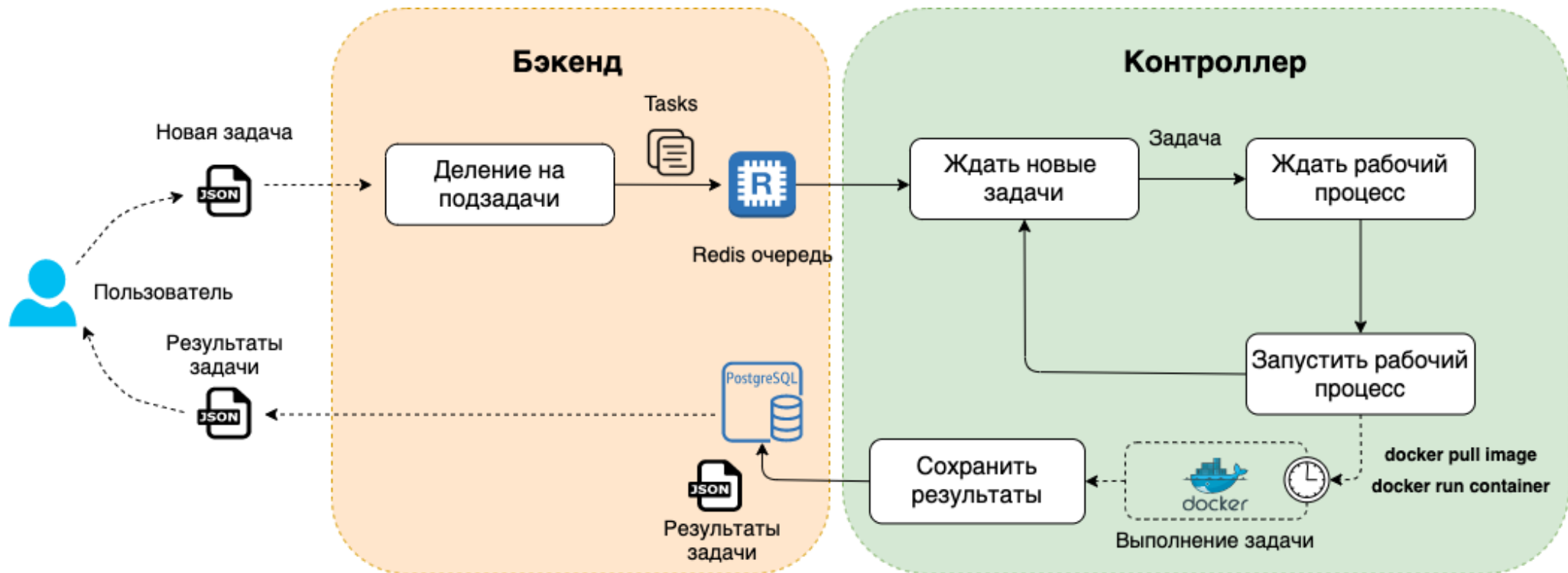
- Разрабатываем имитационную модель с помощью аналитической модели валидируем для случая 2 заявок на различных входных данных.
- С помощью имитационной модели генерируем большой датасет для различных входных данных.
- По синтетически сгенерированному датасету строится модель машинного обучения

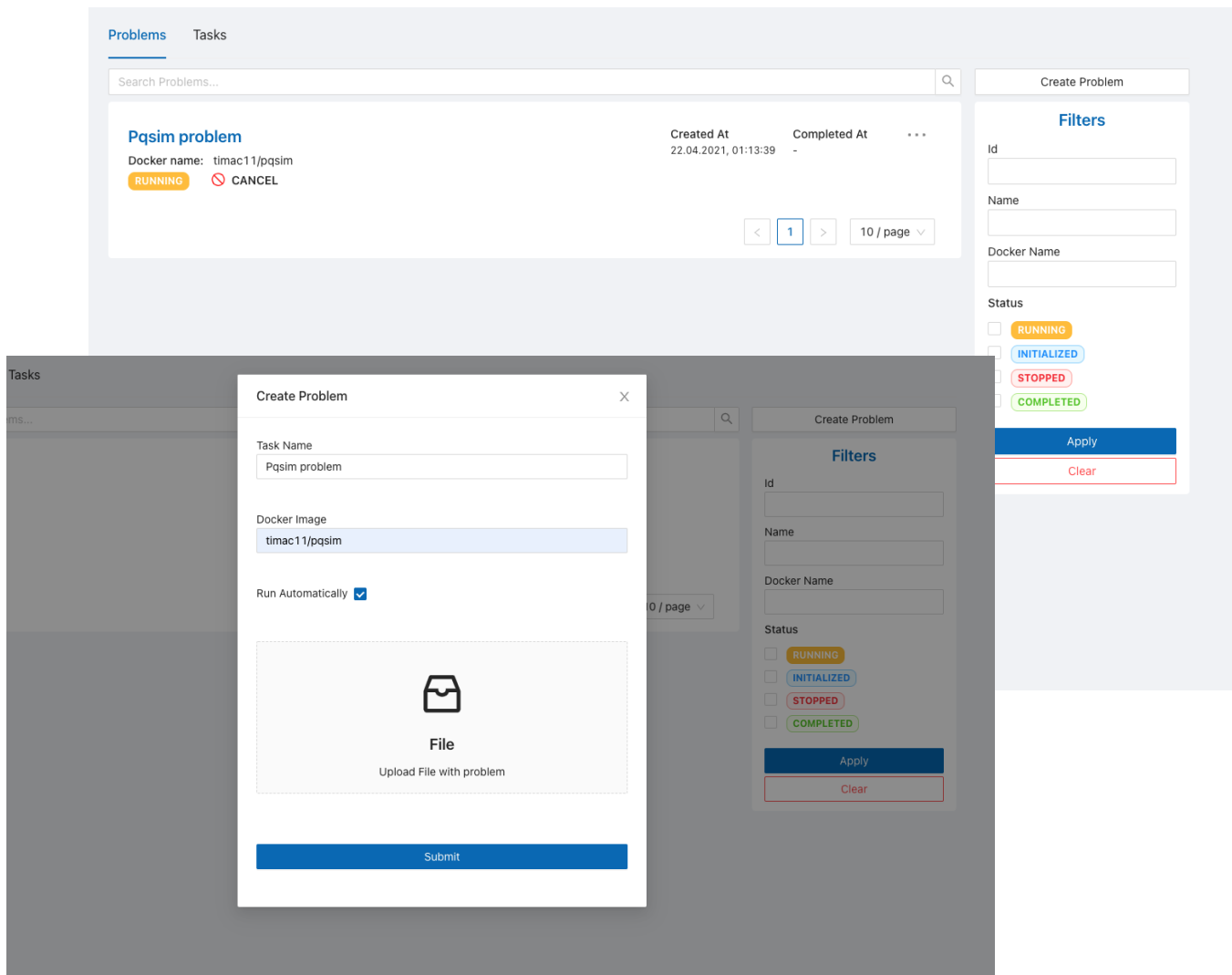
Параметры для генерации датасета и построения моделей машинного обучения

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Количество классов трафика	1	5
Количество приборов	1	10
Размер очереди	0	10
Скорость генерации пакетов	0.1	10
Коэффициент вариации генерации пакетов	0.1	10
Коэффициент асимметрии генерации пакетов	-	100
Скорость обработки пакетов	0.1	10
Коэффициент вариации обработки пакетов	0.1	10
Коэффициент асимметрии обработки пакетов	-	100

По входным параметрам, сгенерированным в пределах, показанных в таблице, был сгенерирован датасет с помощью метода Монте-Карло. Параметры ММАР и РН восстанавливались по алгоритму Джонсона в имитационной модели.

Вычисление методом Монте-Карло занимает порядка 3 секунд, в работе сгенерирован датасет из 300 тысяч записей. Если вычислять все последовательно, это займёт примерно 11 дней. С целью ускорения вычислений была разработана система для параллельных расчетов.





Мы использовали сервер с 24 vCPU 24 GB RAM, время для генерации датасета - 10 часов.

Значения метрик для моделей предсказания вероятности потери

Модель	Корреляция	Среднеквадратичная ошибка	Время обучения (сек)
Решающее дерево	0.944	0.135	0.00005
Случайный лес	0.980	0.047	556
Градиентный бустинг	0.980	0.047	1086
Нейронная сеть	0.987	0.031	1201

Наилучший результат показывает нейронная сеть. Алгоритмы на деревьях также показывают высокую точность.


Выигрыш по времени

Метод	Время (сек)
Аналитический	35
Монте-Карло	3
Решающее дерево	0.0000002
Случайный лес	0.00007
Градиентный бустинг	0.00002
Нейронная сеть	0.000001

Как видно из таблицы использование методов машинного обучения даёт большой выигрыш в скорости при сравнительно большой точности

Публикации

1. Vishnevsky, V.; Klimenok, V.; Sokolov, A.; Larionov, A. Performance Evaluation of the Priority Multi-Server System MMAP/PH/M/N Using Machine Learning Methods. *Mathematics* **2021**, 9, 3236.
<https://doi.org/10.3390/math9243236>
2. Sokolov A., Larionov A. Architecture of a distributed system for parallel execution of numerical experiments on large data sets / *Материалы Всероссийской конференции с международным участием "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем"* (Москва, 2021). М.: РУДН, 2021. С. 474-480.
3. Sokolov A., Larionov. A. (2021). About an architecture and performance of calculations of a distributed system for parallel execution of numerical experiments. *ARMIRP-2021*, 84–85, 2021



Исследование многофазной стохастической системы большой размерности с использованием алгоритмов машинного обучения

Мухтаров А.А.

н.с. лаб. 69

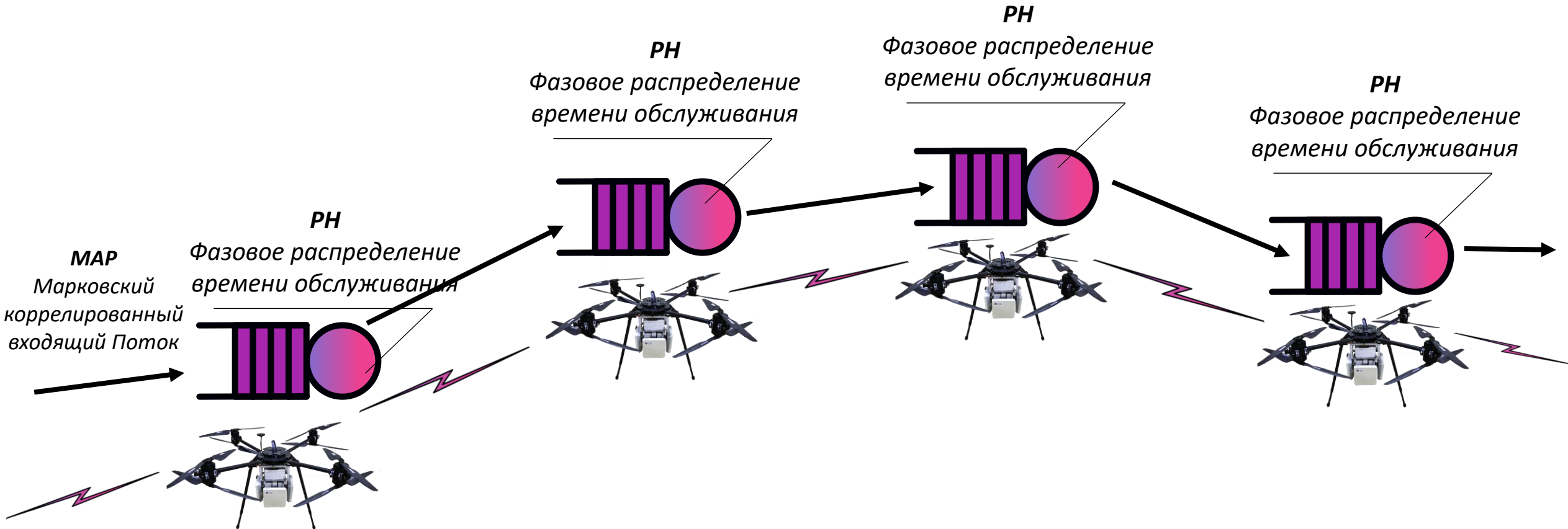
Беспроводной мост на базе БПЛА



При организации беспроводной сети связи с помощью БПЛА важно обеспечить быстрое время и надежность передачи пакетов до адресата

Для оценок времени передачи и вероятности доставки пакетов применяется аппарат **теории массового обслуживания.**

Многофазная сеть массового обслуживания



Многофазная сеть массового обслуживания с марковским коррелированным входящим потоком (MAR) и с фазовыми распределениями времени обслуживания (PH) на узлах.

PH распределение является обобщением экспоненциального распределения.

Случайная величина – время, проведенное в непрерывной цепи Маркова с генератором \tilde{S} , до поглощающего состояния.

$$\tilde{S} = \begin{bmatrix} S & -S\mathbf{1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, S \in \mathbb{R}^{V \times V};$$

$$0 \leq \tau_i \leq 1, \quad \forall i = \overline{1, V}, \quad \sum_{i=1}^V \tau_i = 1.$$

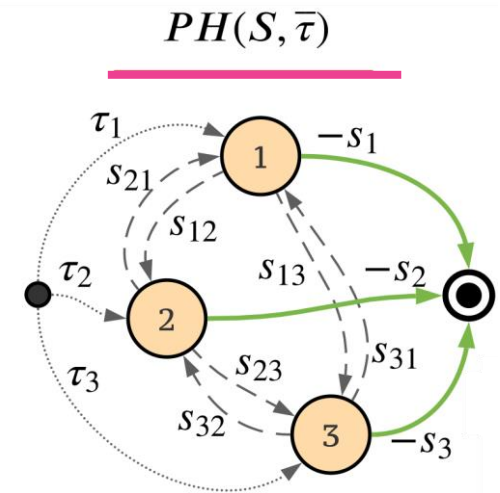
Марковский входной поток (МАР) является обобщением PH-распределений и позволяет учесть корреляцию между значениями с лагом k . Распределения интервалов между событиями в МАР-потоке описываются PH-распределениями с одинаковыми матрицами $\tilde{S} = D_0$, но меняющимися начальными векторами τ_i , зависящими от того, в каком состоянии находился процесс при появлении предыдущего события.

Поток $МАР(D_0, D_1)$ определяется с помощью двух матриц, сумма которых $D = D_0 + D_1$ – инфинитезимальный генератор марковской цепи с непрерывным временем, управляющей переходами между состояниями процесса.

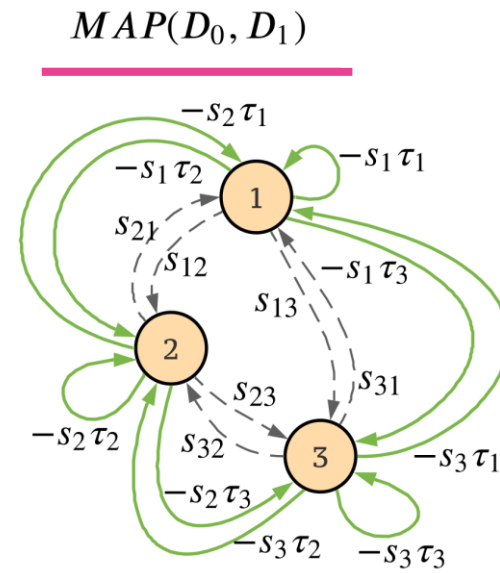
D_0 – интенсивности переходов из состояния в состояние без наступления события;

D_1 – интенсивности переходов из состояния в состояние с наступлением событий;

$$\forall i, j: \{D_1\}_{ij} \geq 0, \forall i \neq j: \{D_0\}_{ij} \geq 0, \forall i: \{D_0\}_{ii} \leq 0$$

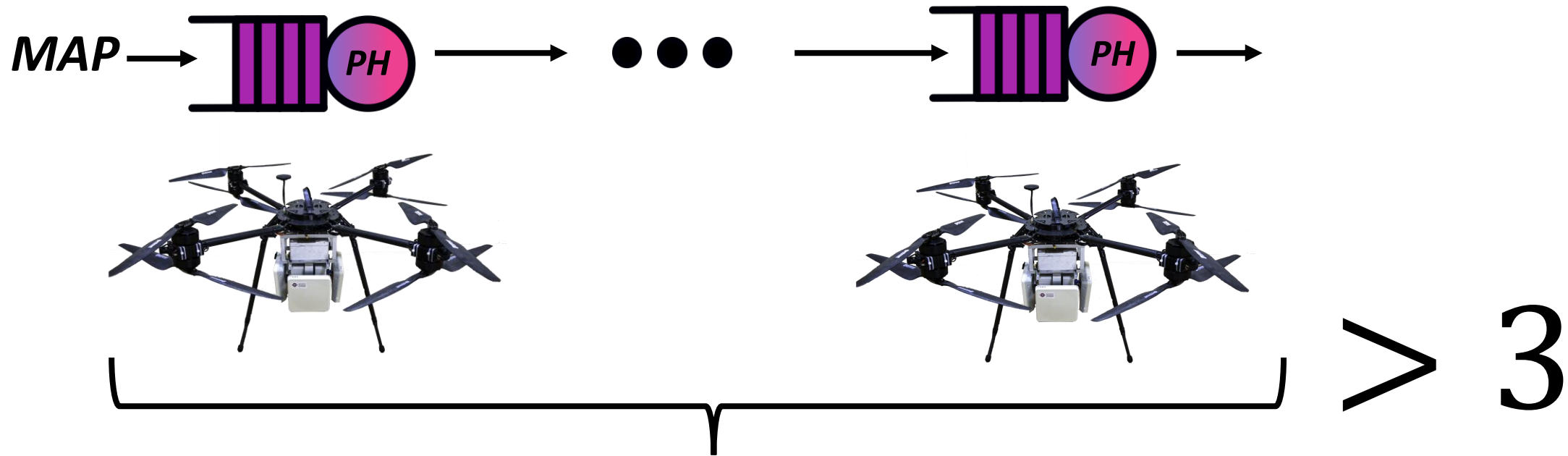


Пример PH-распределения с тремя состояниями управляющей цепи.



Пример МАР-потока с тремя состояниями управляющей цепи.

Многофазная сеть массового обслуживания



Точный аналитический расчет может быть невозможен из-за экспоненциального роста сложности решения с ростом числа фаз в сети.

Решение:

Использование регрессионных моделей, полученных с помощью методов машинного обучения на данных имитационной модели.

Имитационное моделирование

Входные данные:

- Среднее значение случайного времени между поступлениями пакетов;
- Коэффициент вариации случайного времени между поступлениями пакетов;
- Коэффициент асимметрии случайного времени между поступлениями пакетов;
- Лаг случайного времени между поступлениями пакетов;
- Среднее значение случайного времени обслуживания пакетов;
- Коэффициент вариации случайного времени обслуживания пакетов;
- Коэффициент асимметрии случайного времени обслуживания пакетов;
- Размер буфера очередей на фазах;
- Количество фаз в сети.

Была сгенерирована выборка объемом **100 000** строк. Для каждого элемента такой строки методом Монте-Карло разыгрывалось 1 000 000 пакетов.

Тренировочная выборка: 67 %
Тренировочная выборка: 33 %

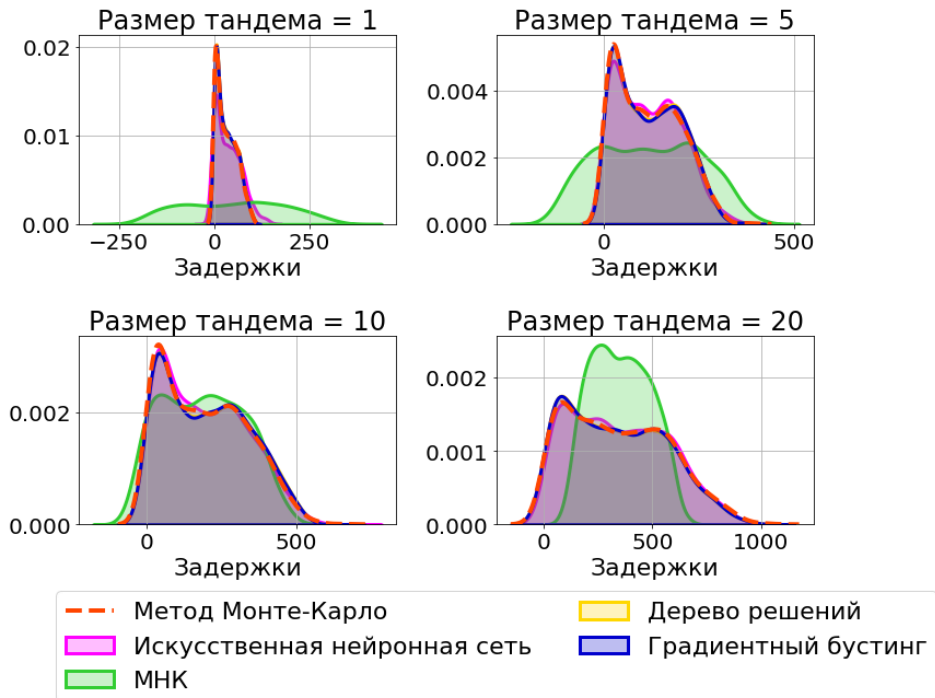
Выходные данные:

- межконцевая задержка в сети;
- вероятность доставки пакетов.

Оценка межконцевой задержки

Для построения регрессионной модели оценки **средней межконцевой задержки** использовались методы:

Методы	R	STD
МНК	0,925	66.541
Дерево решений	0,991	23,462
Градиентный бустинг	0,991	23,447
Искусственная нейронная сеть	0,998	11,936



Распределения полученных оценок

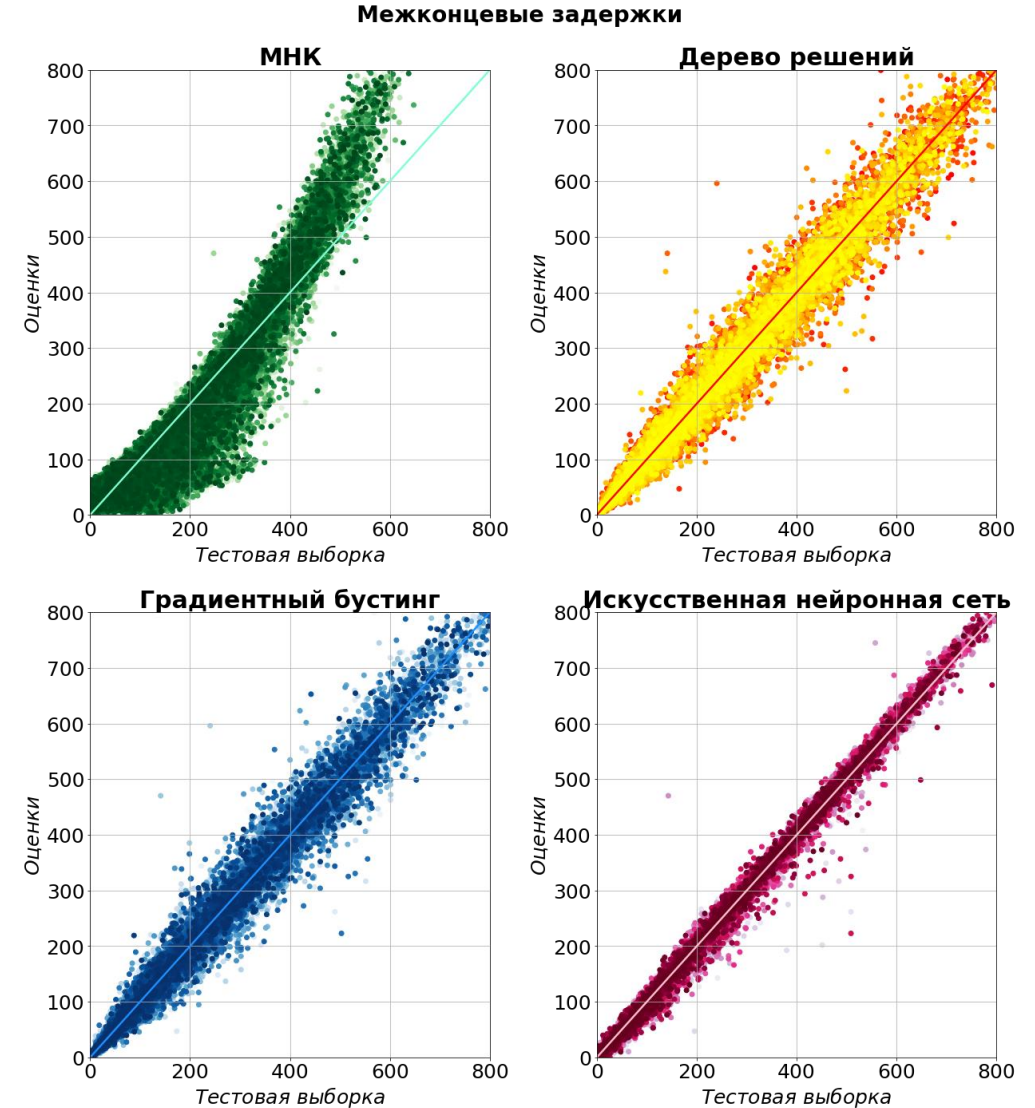


Диаграмма рассеивания

Оценка вероятности успешной доставки

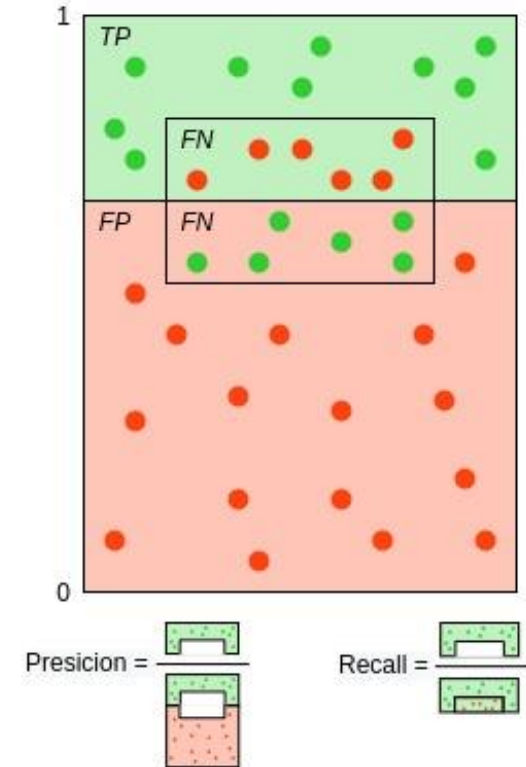
Для построения модели классификации оценки вероятности успешной доставки пакетов использовались методы:

Модель
Логистическая регрессия
Дерево решений
Градиентный бустинг
Искусственная нейронная сеть

Точность (precision) системы можно интерпретировать как долю успешных доставок, названных классификатором успешными (> 0.9) и при этом действительно являющимися успешными доставками пакетов.

Полнота (recall) системы показывает какую долю объектов класса успешной доставки из всех объектов положительного класса нашел алгоритм.

F-мера (F1) системы показывает среднее гармоническое точности и полноты



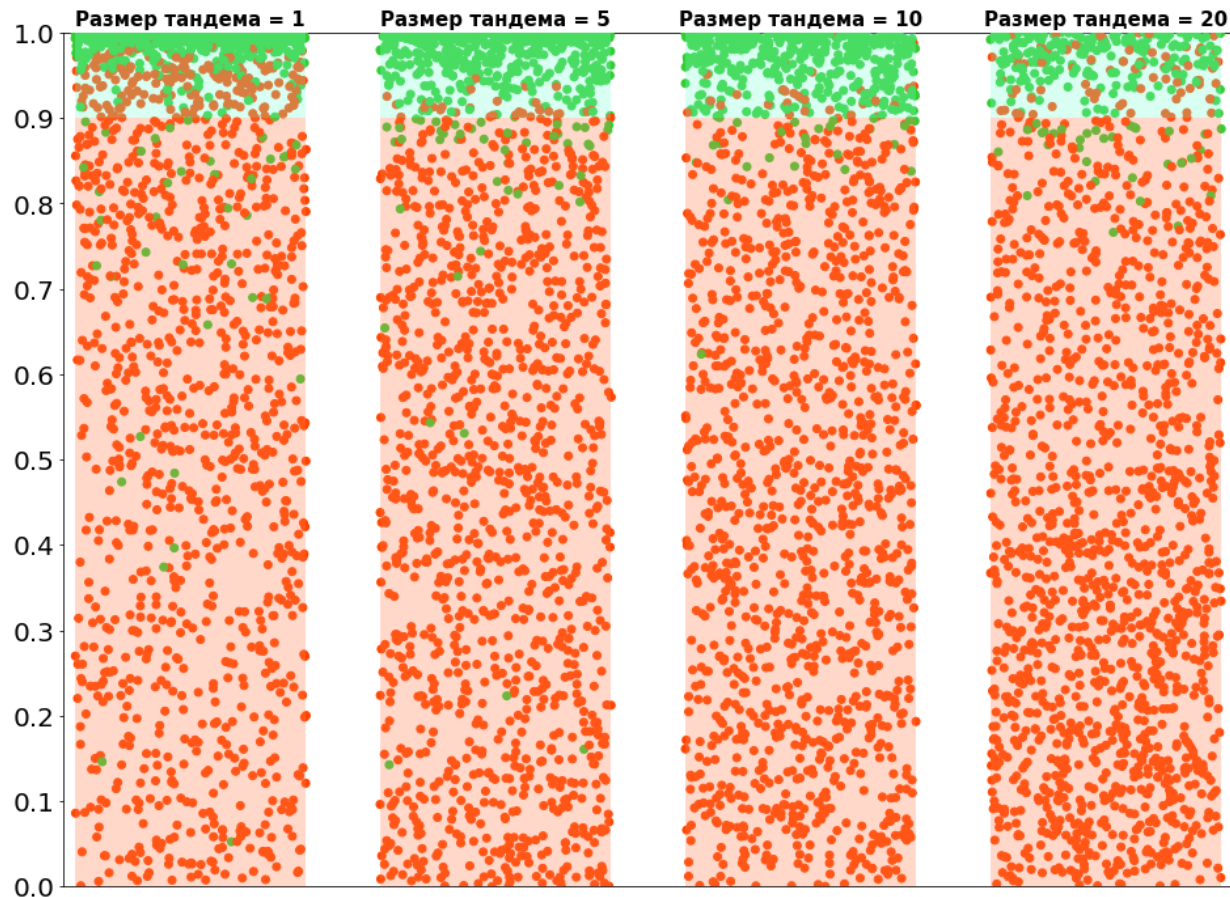
$$1. \text{ Precision} = \frac{TP}{TP+FP};$$

$$2. \text{ Recall} = \frac{TP}{TP+FN};$$

$$3. F_1 = \frac{\text{Precision} * \text{Precision}}{\text{Precision} + \text{Precision}}.$$

Оценка вероятности успешной доставки

Логистическая регрессия Оценки вероятности доставки пакетов

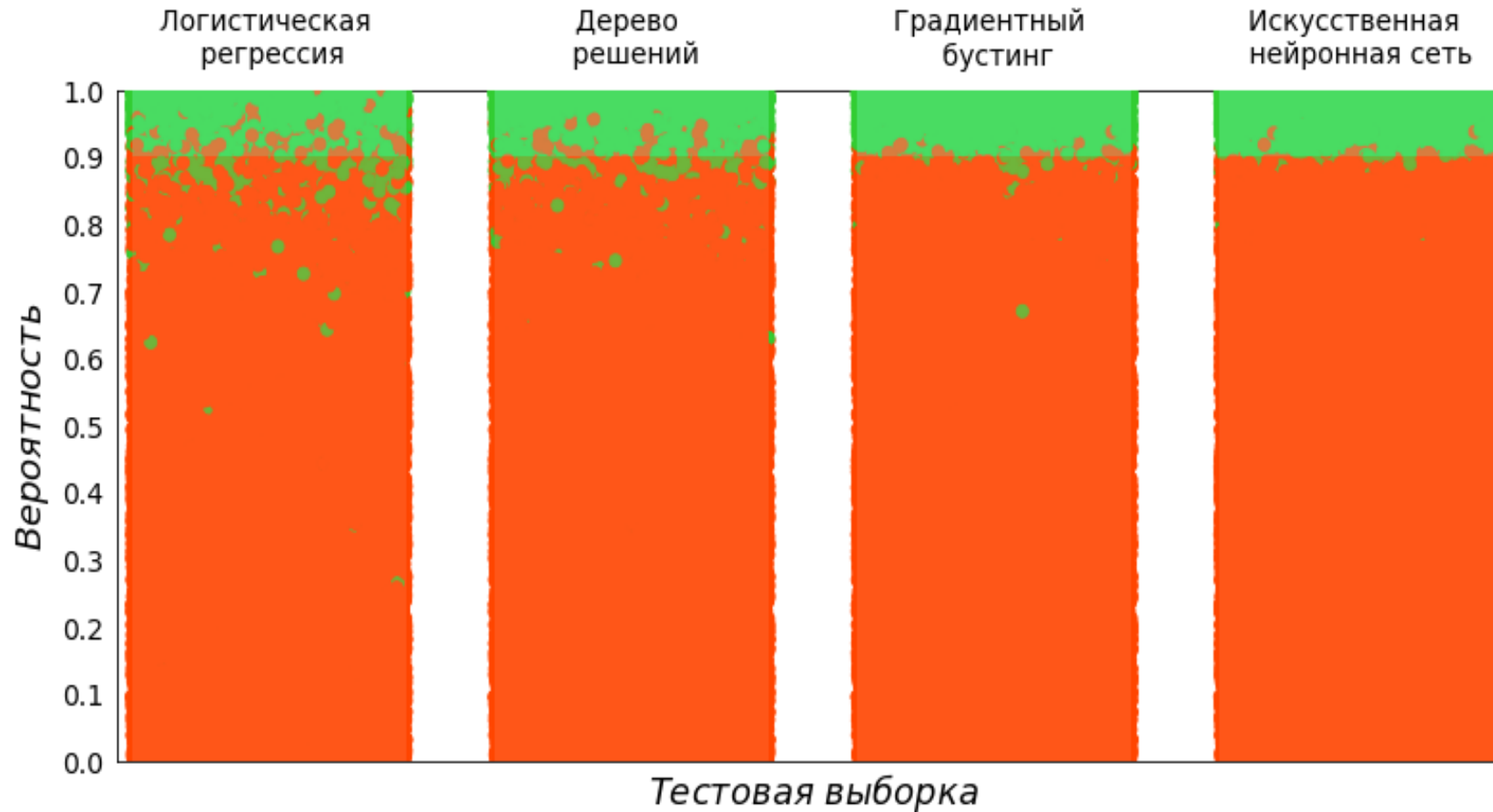


Тестовая выборка

Вероятность успешной доставки $P_L > 0,9$

- - прогноз успешной доставки
- - прогноз неуспешной доставки
- - диапазон успешной доставки пакетов
- - диапазон неуспешной доставки пакетов

Оценка вероятности успешной доставки

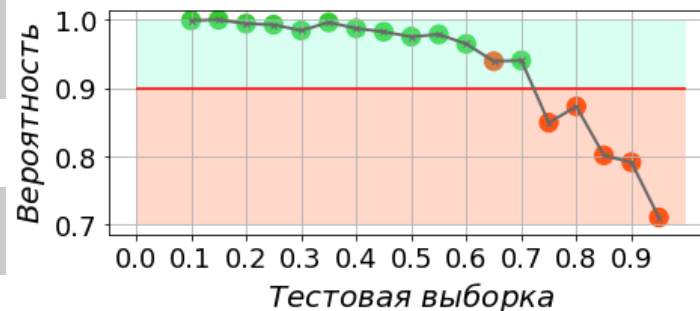


Модели вероятности успешной доставки

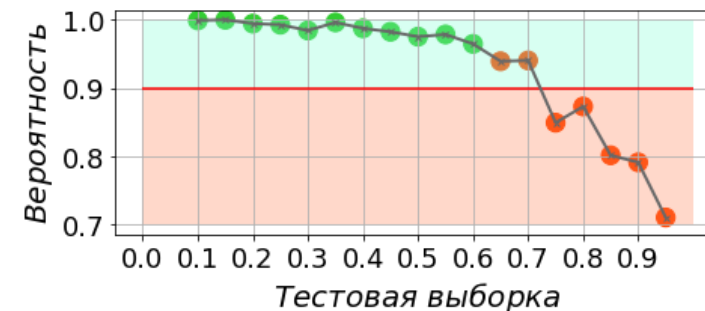
Размер тандема = 10

Модель	Точность	Полнота	F ₁ -мера
Логистическая регрессия	0.804	0.821	0.813
Дерево решений	0.962	0.905	0.912
Градиентный бустинг	0.966	0.966	0.968
Искусственная нейронная сеть	0.977	0.951	0.964

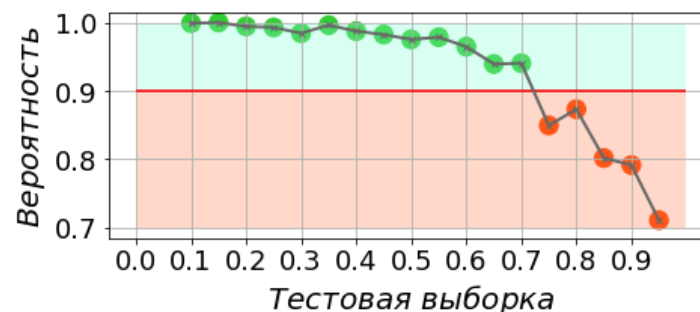
Логистическая регрессия



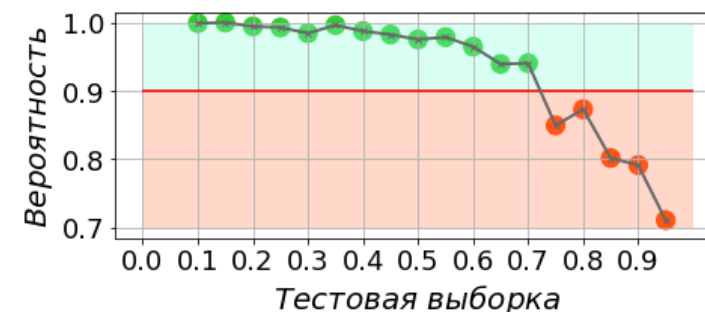
Дерево решений



Градиентный бустинг



Искусственная нейронная сеть



—*— Метод Монте-Карло ● Прогноз

Зависимость оценки вероятности успешной доставки от коэффициента загрузки для сети с 10 фазами.

Вывод

Предложен подход использования моделей предсказания, построенных на данных имитационного моделирования с помощью методов машинного обучения.

Эффективность использования предложенных моделей в практических случаях обуславливается выигрышем во времени счета на 8 порядков.



Список публикаций

Web of Science/Scopus


Ларионов А.А., **Мухтаров А.А.**, Соколов А.М. The calibration method of a tandem queueing model with PH service time using NS-3 simulation of a multihop wireless network / Journal of Physics: Conference Series. Astrakhan: IOP Publishing, 2021. Volume 2091. С. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2091/1/012030/pdf>.

ВАК

Першин О.Ю., Вишневский В.М., **Мухтаров А.А.**, Ларионов А.А. ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В РАМКАХ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ // ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. 2022. №1. С. 12-25.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

Мухтаров А. А. Программный комплекс для расчета задачи оптимального размещения базовых станций: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613213 РФ; Зарег. 01.03.2022.



Разработка методов повышения надежности системы электропитания привязной высотной беспилотной платформы

Аликин К.А.

н.с. лаб. 69

Привязная высотная беспилотная платформа

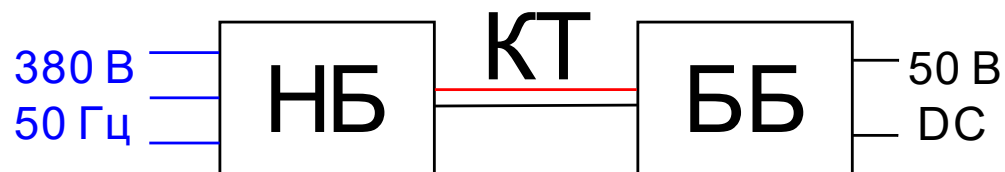
Привязные высотные платформы на основе мультироторных БПЛА могут применяться для решения различных практических задач: быстрое развертывание телекоммуникационной инфраструктуры на местности, создание систем охраны и видеонаблюдения и т. д.

Электропитание бортовой аппаратуры с земли позволяет привязной платформе функционировать непрерывно в течение длительного времени.

В рамках данного доклада будут рассмотрены вопросы, связанные с повышением надежности функционирования электропитания и системы безаварийной посадки.



Структура системы передачи энергии

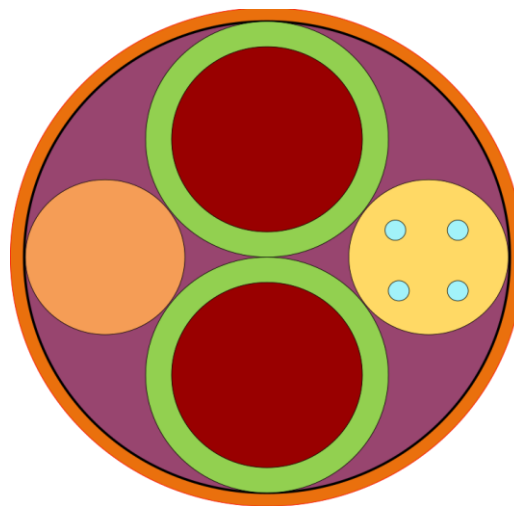


НБ — наземный блок

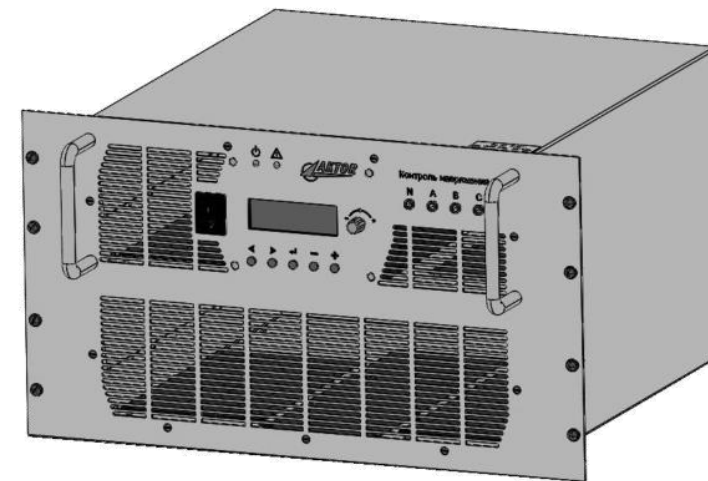
КТ — кабель-трос

ББ — бортовой блок

Кабель-трос имеет в своем составе две медных токоведущих жилы, волоконно-оптическую линию связи и кевларовую нить, обеспечивающую механическую прочность



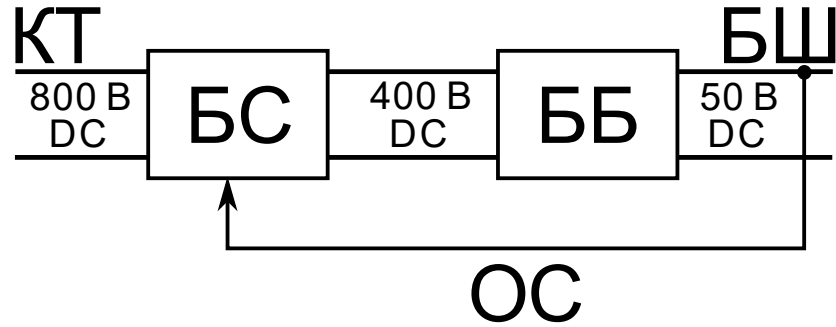
Кабель-трос



Наземный блок

Максимальная выходная мощность: не менее 10 кВт
Регулируемое выходное напряжение: 400-1000 В

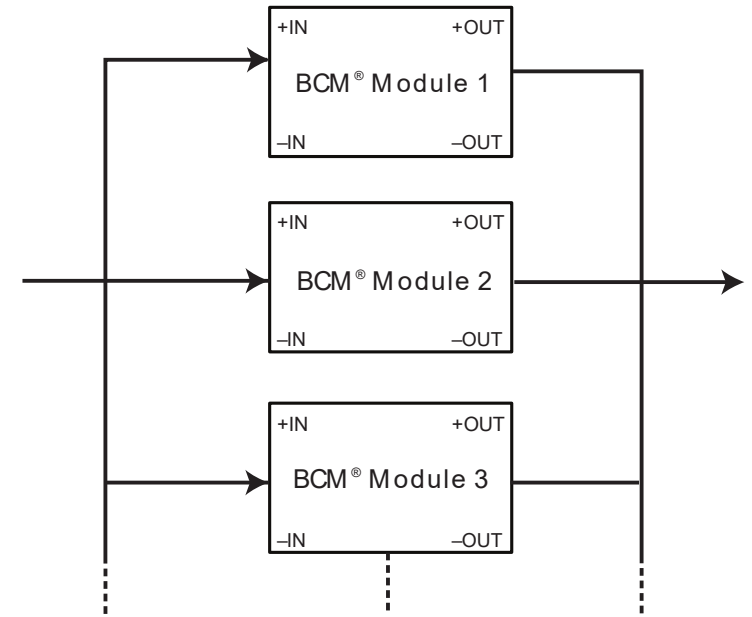
Бортовой блок системы электроснабжения



На борту привязной высотной платформы осуществляется двухступенчатое преобразование напряжения:

Блок стабилизации преобразует напряжение 800 В в стабилизированное напряжение 400 В.

Бортовой блок преобразует 400 В в напряжение бортовой шины 50 В и содержит гальваническую развязку, а также системы защиты от низкого и высокого входного напряжения (UVP/OVP), от короткого замыкания (ОСР) и от перегрева (ОТР).



Бортовой блок состоит из подключенных параллельно резонансных DC-DC преобразователей мощностью 1,6 кВт

$U_{\text{вх}} = 260-410 \text{ В}$, $U_{\text{вых}} = 32,5-51,3 \text{ В}$

КПД: ~97%

Масса: 140,5 г

ДхШхВ: 110,5х35,5х9,4 мм

Стабилизация напряжения на борту

В отсутствие стабилизации, напряжение на бортовой шине снижается при росте потребляемой на борту мощности. Составляющую падения напряжения, связанную с потерями на сопротивлении кабель-троса можно рассчитать по формуле:

$$\Delta U = \frac{P}{U} \frac{2\rho L}{S} [1 + \alpha\Delta T] \frac{1}{K}$$

U — напряжение на кабель-тросе, 400 или 800 В

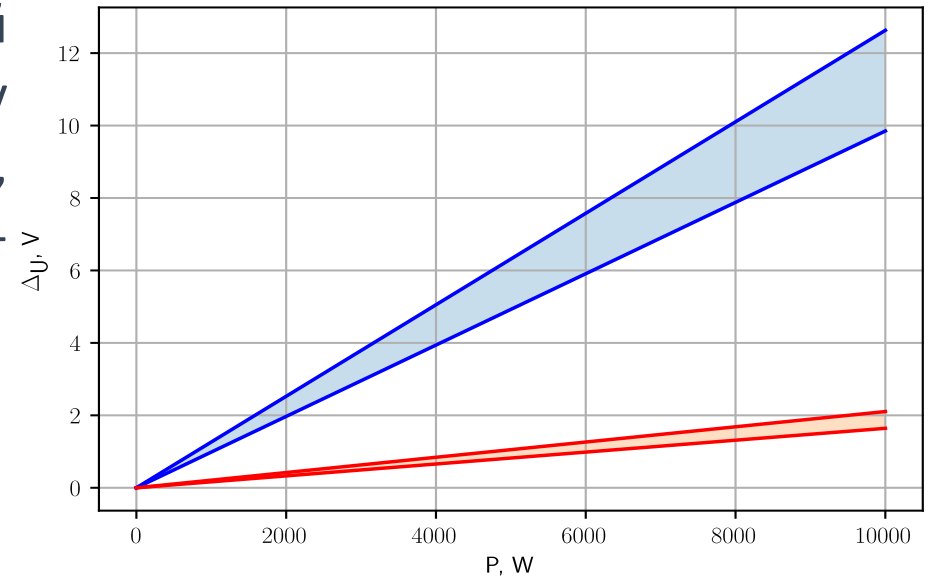
P — потребляемая мощность

L — длина кабель-троса, 100 м

S — площадь сечения КТ, 1 мм²

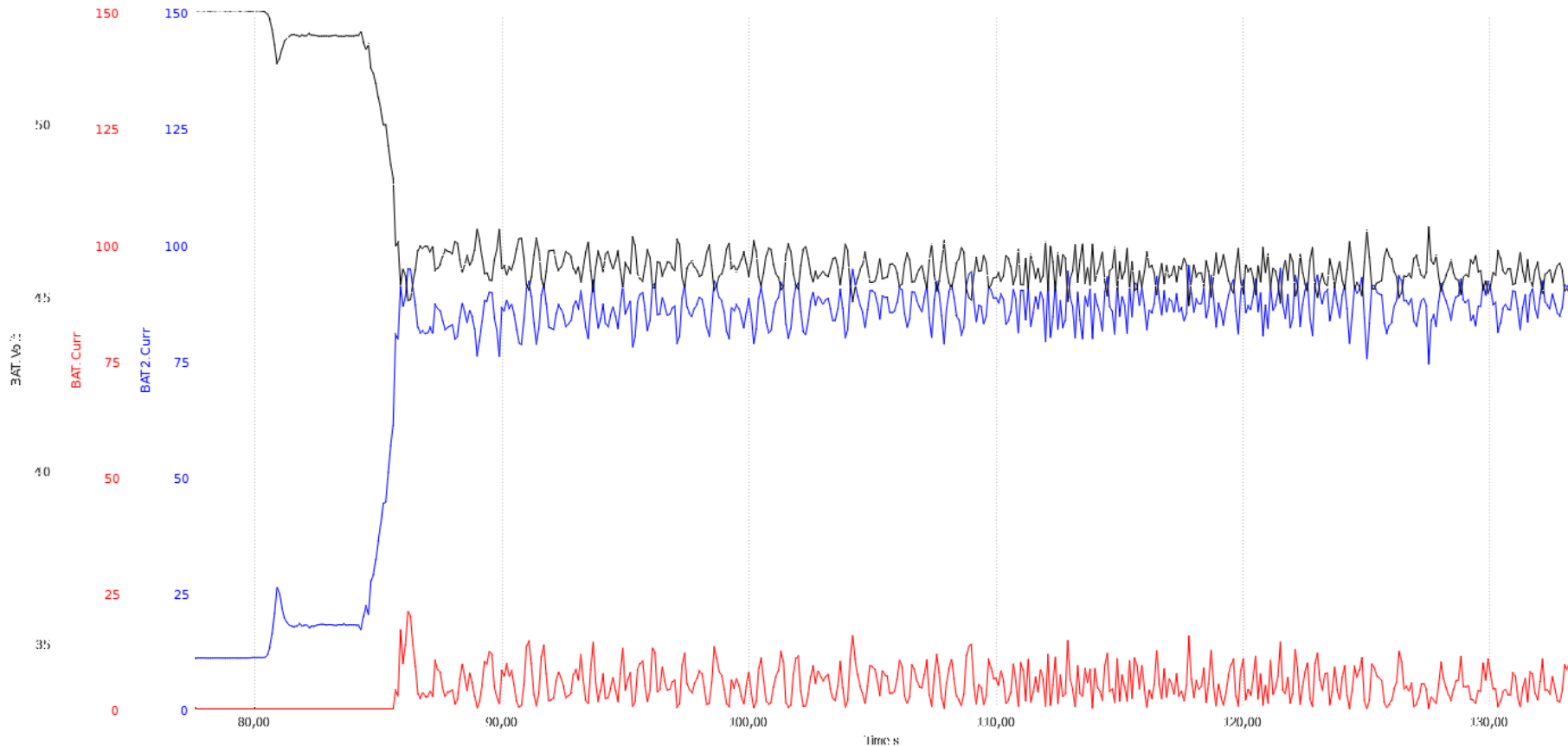
K — коэффициент преобразования напряжения на борту, 1/8 для 400 В и 1/16 для 800 В

T — температура кабеля, диапазон от 0 до 60°C



Зависимость падения напряжения на бортовой шине от потребляемой мощности (без стабилизации) при напряжении на кабель-тросе **400 В** и **800 В**

Экспериментальные данные (в отсутствие стабилизации)

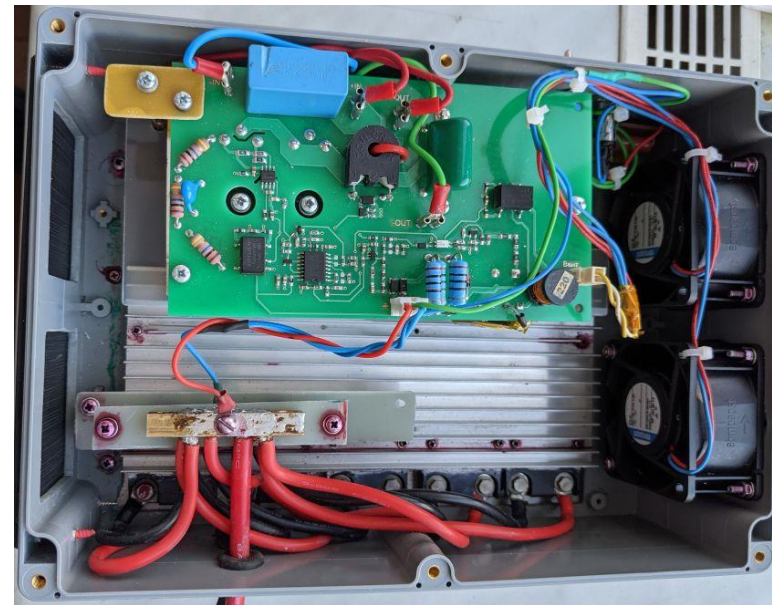
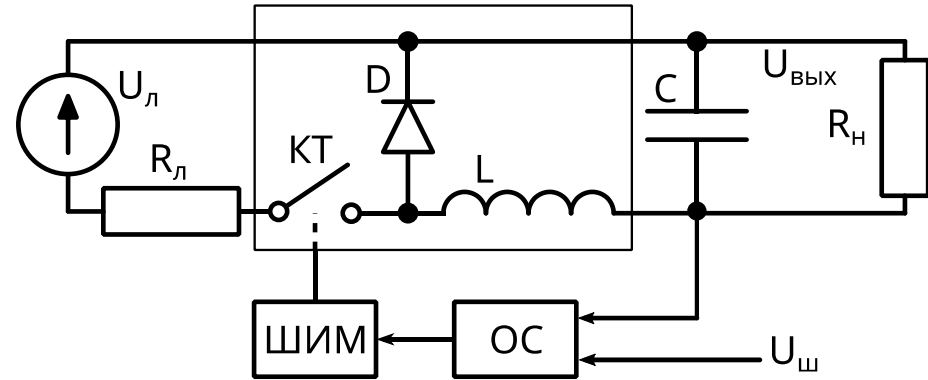


напряжение на бортовой шине БПЛА $U_{\text{ш}}$
ток, потребляемый от наземного источника
ток, потребляемый от резервного аккумулятора

Блок стабилизации бортового напряжения

Блок стабилизации представляет из себя неизолированный асинхронный понижающий DC-DC преобразователь. Управление преобразователем осуществляется с помощью микросхемы ШИМ UC2825, реализующей управление по току.

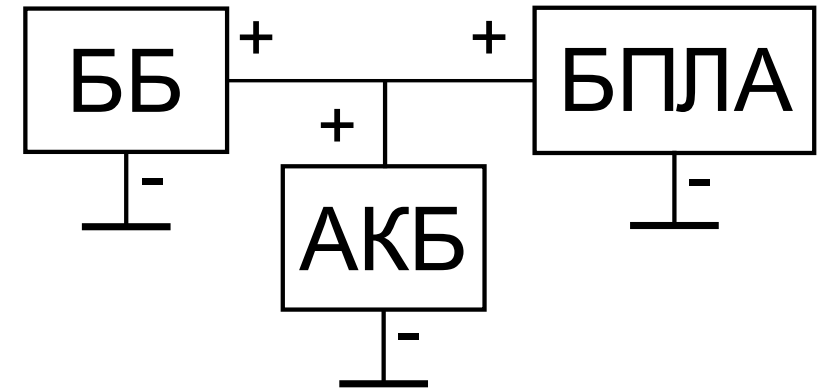
Для формирования сигнала ошибки используется две обратных связи: одна по напряжению выхода $U_{\text{ВЫХ}} = 400 \text{ В}$, вторая по напряжению бортовой шины $U_{\text{Ш}} = 50 \text{ В}$, подключенных через схему выборки минимума.



Система аварийного резервирования электропитания

Наличие резервной аккумуляторной батареи (АКБ) является необходимым условием надежного функционирования привязной высотной платформы.

АКБ обеспечивает безопасность функционирования БПЛА при кратковременных нарушениях подачи электропитания от внешнего источника, а также возможность безаварийной экстренной посадки при возникновении неисправностей в системе электропитания.



ББ — бортовой блок

АКБ — аккумуляторная батарея

БПЛА — потребители

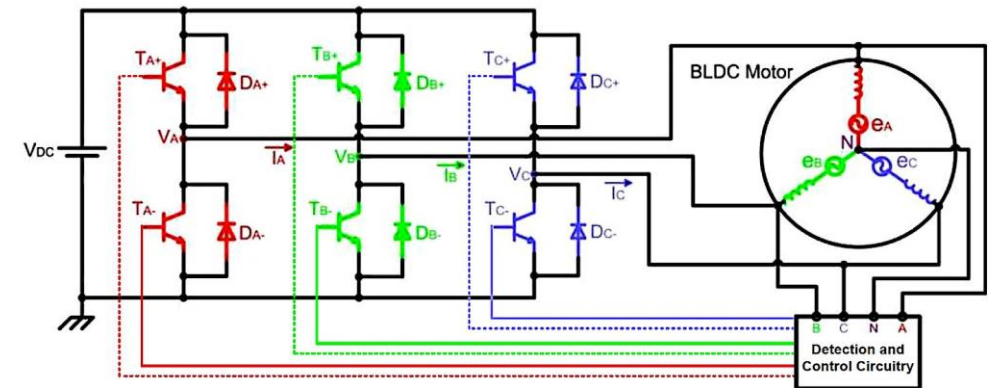
электроэнергии на борту

Защита бортового оборудования БПЛА от скачков напряжения на бортовой шине

В БПЛА мультикоптерного типа как правило используются бесколлекторные двигатели постоянного тока, получающие электроэнергию от бортовой сети, и управляемые с помощью электронных регуляторов скорости вращения (ESC).

На двигатели приходится до 95% энергопотребления БПЛА. В зависимости от режима функционирования потребляемая двигателями мощность может изменяться в широких пределах.

При торможении электродвигателей, накопленная в них энергия создает обратную ЭДС. Ток, протекающий в обратном направлении через ESC регулятор, вызывает повышение напряжения на бортовой шине. Амплитуда данных скачков напряжения может быть достаточно высокой, из-за чего они могут привести к повреждению бортовой аппаратуры БПЛА.

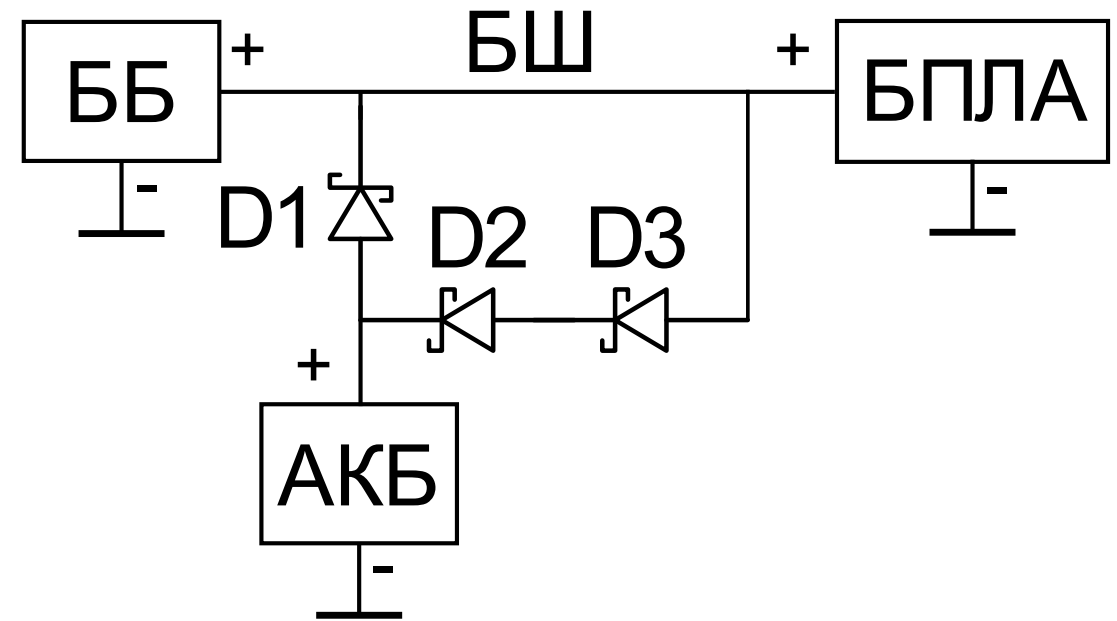


Блок-схема регулятора скорости вращения (ESC) с бесколлекторным двигателем постоянного тока (BLDC)

Схема коммутации режимов энергопотребления

Схема коммутации должна обеспечивать постоянное соединение АКБ с бортовой шиной. При этом:

- При штатном функционировании БПЛА, не должно происходить отбора энергии от АКБ.
- В аварийном режиме, при отсутствии электроснабжения по кабель-тросу, питание осуществляется от АКБ.
- Обратное напряжение, наводимое электродвигателями должно поглощаться АКБ, для предотвращения повреждения бортового оборудования.



ББ — бортовой блок
БШ — бортовая шина
АКБ — аккумуляторная батарея
БПЛА — потребители
электроэнергии на борту


Результаты работы в 2020-2022 годах

Проведены испытания разработанного блока стабилизации напряжения в составе системы электропитания привязной высотной беспилотной платформы мощностью 8 кВт.

Предложенная схема коммутации режимов энергопотребления применяется в различных вариантах привязных высотных беспилотных платформ, разрабатываемых и испытываемых в лаборатории №69.

Публикации по теме доклада

1. Аликин К.А., Морозов В.П., Целикин Ю.В. Разработка бортового источника питания для высотной привязной платформы – носителя / Труды 5-й Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST-2021, Астрахань). Астрахань: АГТУ, 2021. С. 14-18
2. V. M. Vishnevsky, V. P. Morozov and K. A. Alikin. Challenges in design of an on-board power supply system for a tethered unmanned aerial telecommunication platform / Journal of Physics: Conference Series. Bristol, UK: IOP Publishing, 2021. 2091. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2091/1/012034>



Исследование эффективности системы радиочастотной идентификации транспортных средств на автодорогах

Федотов И.А.

м.н.с. лаб. 69

аспирант 1-го года ИПУ РАН

Введение

На дорогах ежегодно происходит огромное количество ДТП.

В них погибают несколько десятков тысяч человек.

Один из способов снижения количества ДТП – фиксация нарушений ПДД.

Плохая видимость



Это определяет актуальность исследования и реализации новых систем безопасности на автодорогах, использующих альтернативные методы идентификации транспортных средств, в частности, технологию радиочастотной идентификации (RFID).

Радиочастотная идентификация

Технология RFID (**R**adio **F**requency **I**dentification) позволяет идентифицировать метки на объектах (в том числе и движущихся), посредством радиосигналов.

В данной работе рассмотрена технология УВЧ RFID, которая может считывать метки на расстоянии до 10 метров, даже при условиях плохой видимости.

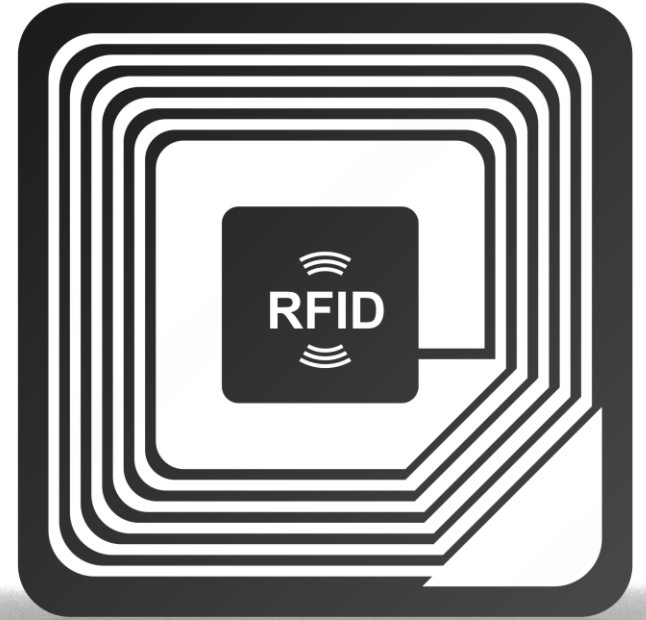
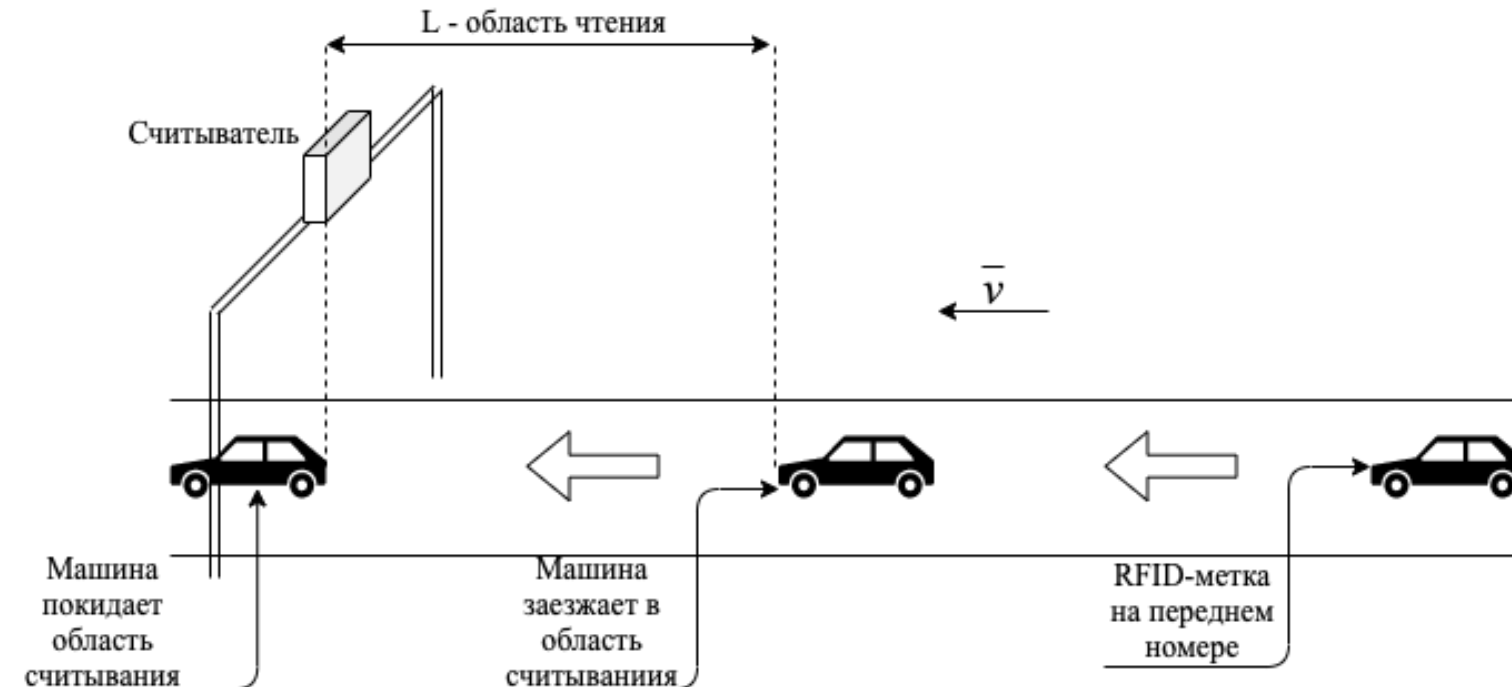


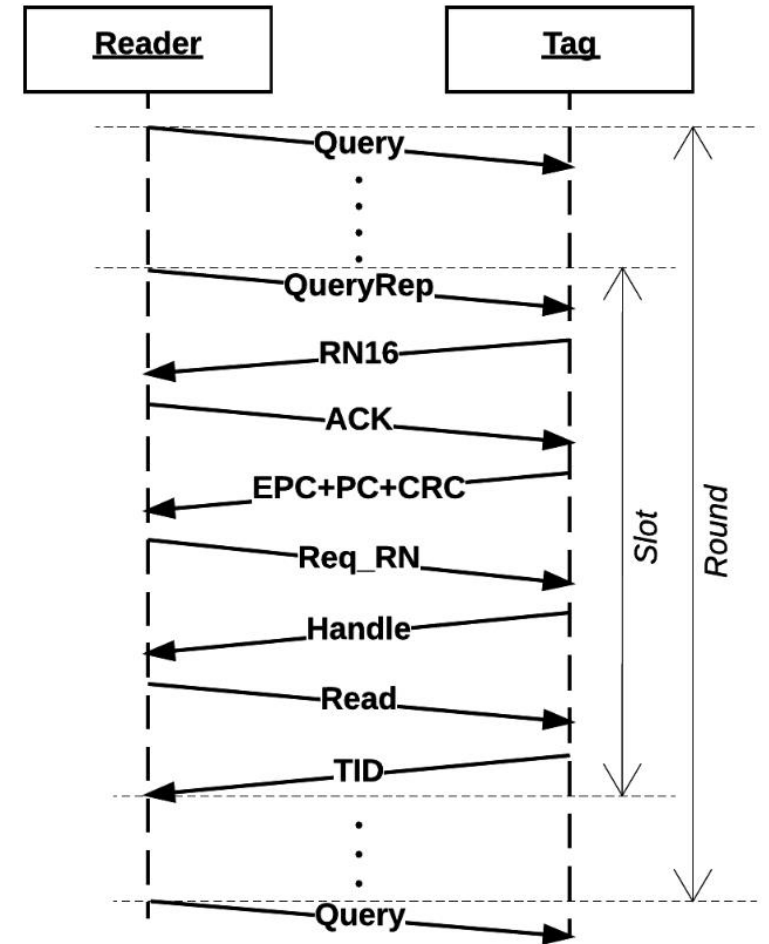
Схема установки

- RFID считыватель (reader) – активное устройство для чтение меток.
- RFID метка (tag) – пассивное устройство маленького размера, основная задача которого – передать свой идентификационный номер.



Протокол основные команды

- Query – команда приветствия
- QueryRep - уменьшает счетчик на 1
- RN16 - случайно сгенерированное число
- ACK – проверка этого числа
- EPC – пересылка идентификатора
- Req_RN – новое случайное сгенерированное число
- Handle – запрос чтения информации из банка памяти
- Read – Запрос чтения информации из банка памяти
- TID – запрос чтения информации из банка памяти
- Query – команда приветствия



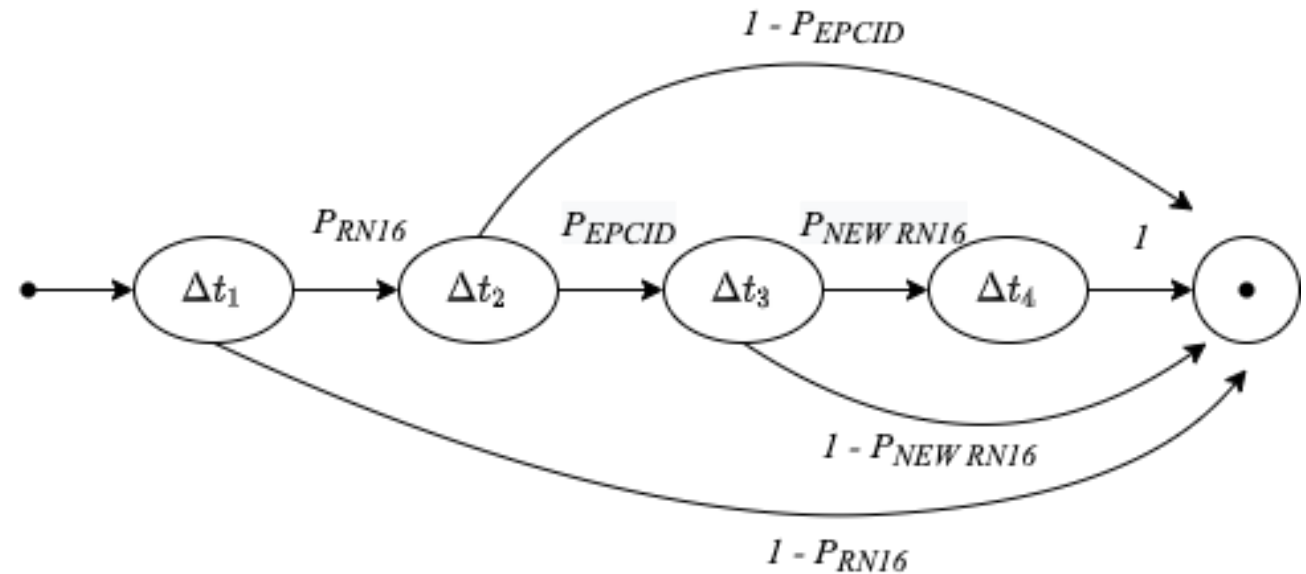
Цель работы

Оценить вероятность успешного считывание меток при различных настройках протокола и параметрах окружения

Аналитическая модель при непостоянной битовой ошибке

4 этапа:

1. Δt_1 — передача RN16
2. Δt_2 — передачи EPC ID
3. Δt_3 — передача New RN16
4. Δt_4 — передача TID



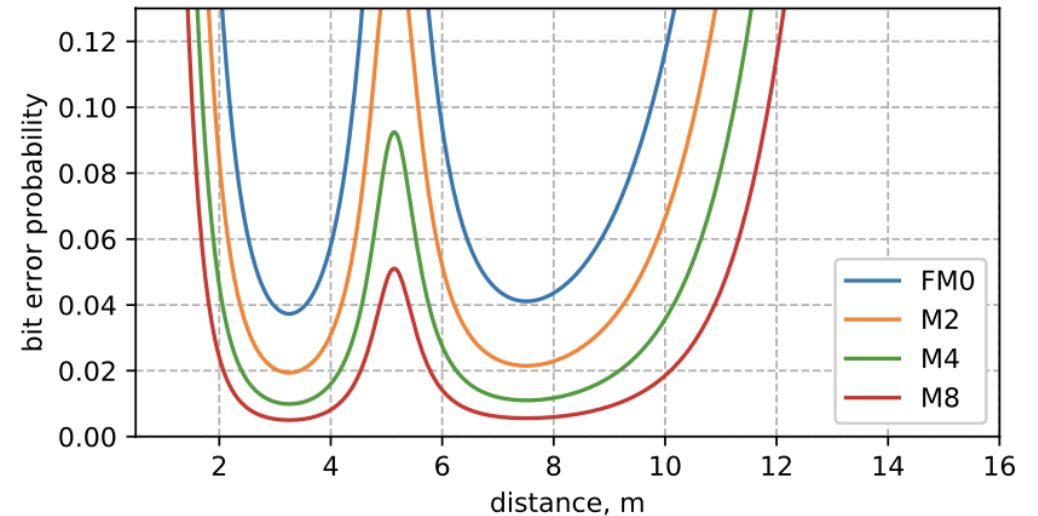
Аналитическая модель при непостоянной битовой ошибке

Вероятность успешного завершения полного обмена сообщениями будет выражаться с помощью выражения:

$$P_M(x) = (1 - B(x))^Q,$$

где $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4.$

$$P_M(x) = e^{-B(x)Q}.$$

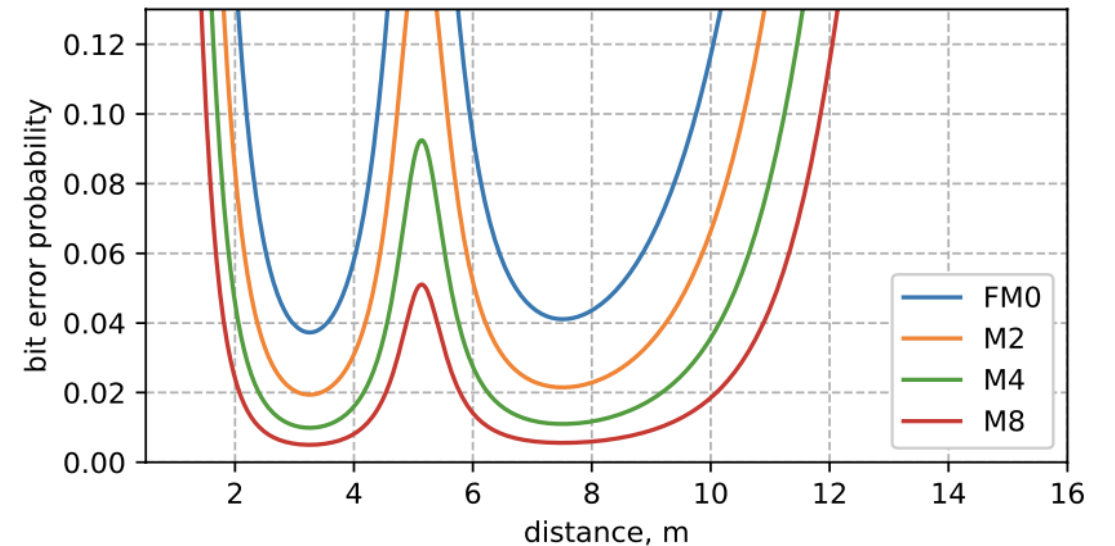
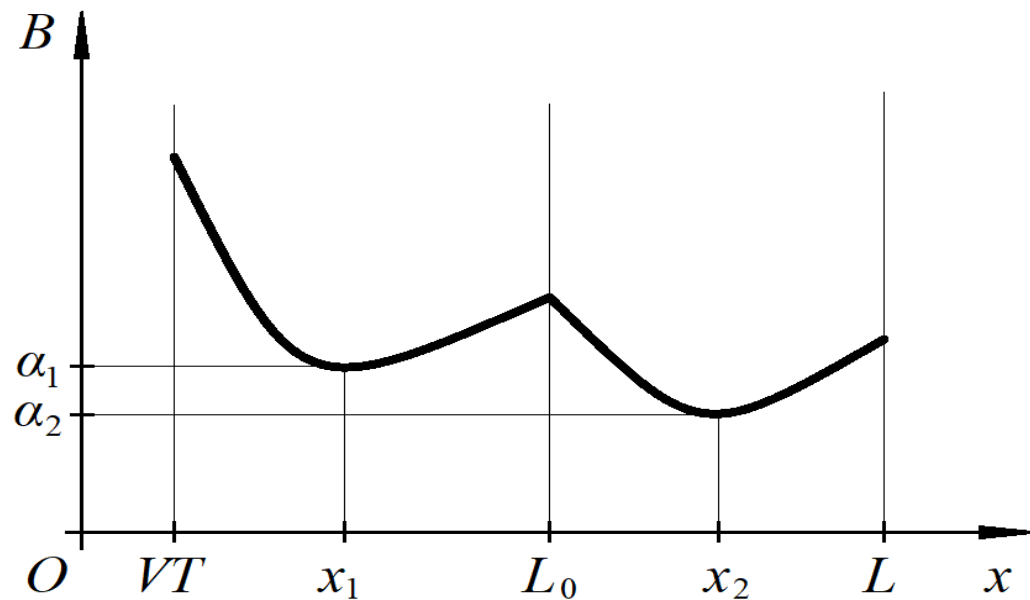


Рассмотрим вероятность неудачи на отрезке $(x, x + \Delta x)$

$$P_f(x, x + \Delta x) = (1 - P_M(x))^{\frac{\Delta x}{Vt_M(x)}} \quad P_f(x, x + \Delta x) = e^{-P_M(x) \frac{\Delta x}{Vt_M(x)}}$$

Аналитическая модель при непостоянной битовой ошибке

$$B(x) = \begin{cases} \alpha_1 + \beta_1(x - x_1)^2, & \text{при } x < L_0; \\ \alpha_2 + \beta_2(x - x_2)^2, & \text{при } x > L_0; \end{cases}$$



Аналитическая модель при непостоянной битовой ошибке

Итоговая формула для вероятности идентификации

$$\begin{aligned} \Pi = 1 - \exp \left(-\frac{1}{V\tilde{N}\delta} \left[\frac{\sqrt{\pi}e^{-a_1(L-\tilde{L})}}{2\sqrt{b_1(L-\tilde{L})}} \left[\Phi \left((L_0 - x_1)\sqrt{b_1(L-\tilde{L})} \right) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \Phi \left((x_1 - VT)\sqrt{b_1(L-\tilde{L})} \right) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{\sqrt{\pi}e^{-a_2(L-\tilde{L})}}{2\sqrt{b_2(L-\tilde{L})}} \left[\Phi \left((L - x_2)\sqrt{b_2(L-\tilde{L})} \right) + \Phi \left((x_2 - L_0)\sqrt{b_2(L-\tilde{L})} \right) \right] \right] \right) \end{aligned}$$

Имитационная модель

Считается, что если сигнал был послан считывателем, то метка обязательно его прочитает.

Если метка начала раунд инвентаризации, то он будет закончен, даже за пределами области чтения.

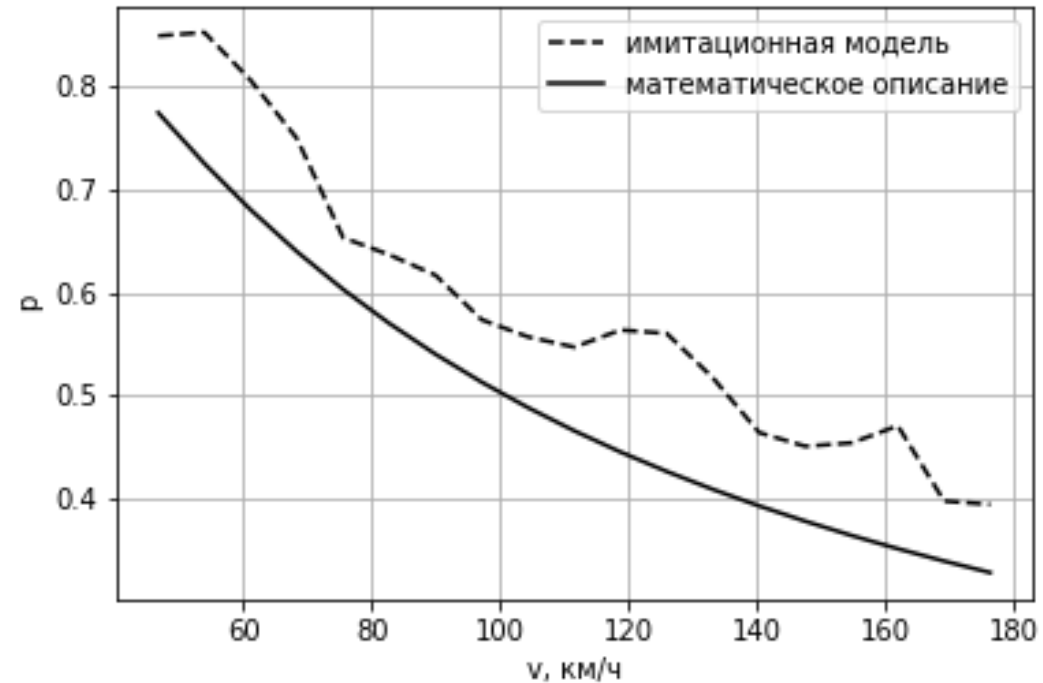
На вход подаются такие параметры, как:

- Q – параметр для метки, по которому она выбирает случайный слот
- BER – битовая ошибка
- N – количество меток
- v – скорость движения меток
- dt – интервал времени, через который метки появляются в области считывания

На выходе получаем:

- Вероятность успешной идентификации RFID метки
- Длительность раунда инвентаризации
- Количество раундов инвентаризации

Сравнение аналитической и имитационной модели про непостоянной битовой ошибке



Заключение

- С помощью имитационной и математической модели получены оценки вероятности идентификации меток при различных значениях битовой ошибки (BER), на разных скоростях движения меток и различных параметрах работы протокола.
- Показано, что при определенных условиях вероятность успешной идентификации превышает 0,9.
- Построенная аналитическая модель согласуется с имитационной
- Полученные результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований.

Публикации

- *Федотов И. А., Ларионов А. А., Михайлов Е. А.* Эффективность радиочастотной идентификации транспортных средств с использованием аналитической аппроксимацией и имитационного моделирования // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2021)*. Материалы XXIV Междунар. научн. конфер, 20–24 сент. 2021 г. — ИПУ РАН Москва, 2021. — С. 336–341.



Методы исследования производительности сбора данных с сенсорного поля с использованием RFID на БПЛА

Абрамян В.Л.

инженер лаб. 69

студент 6 курса МФТИ

Цель работы

Целью данного проекта является разработка модели канала передачи данных между считывателем и меткой, а также дискретно-событийной модели, которые позволят определять вероятность успешного обмена данными в зависимости от параметров канала, условий полёта и настроек протокола RFID



[1] exponent-ts.com/

Формальная постановка задачи

Пусть $P(C, D, L)$, где P – вероятность успешного обмена данными, C – состояние канала, D – параметры полёта, L – параметры протокола.

Задача: найти такие параметры L , что

$$L: P(C, D, L) \geq P_{min} \\ v \geq v_0 \text{ или } t \leq t_0 \text{ и } h \geq h_0$$

Состояние канала: расстояние до препятствий, уровень шума, ДН антенн;

Параметры полёта: высота, скорость, расстояние от метки;

Параметры протокола: методы кодирования сообщений, мощность считывателя, объём передаваемых данных.

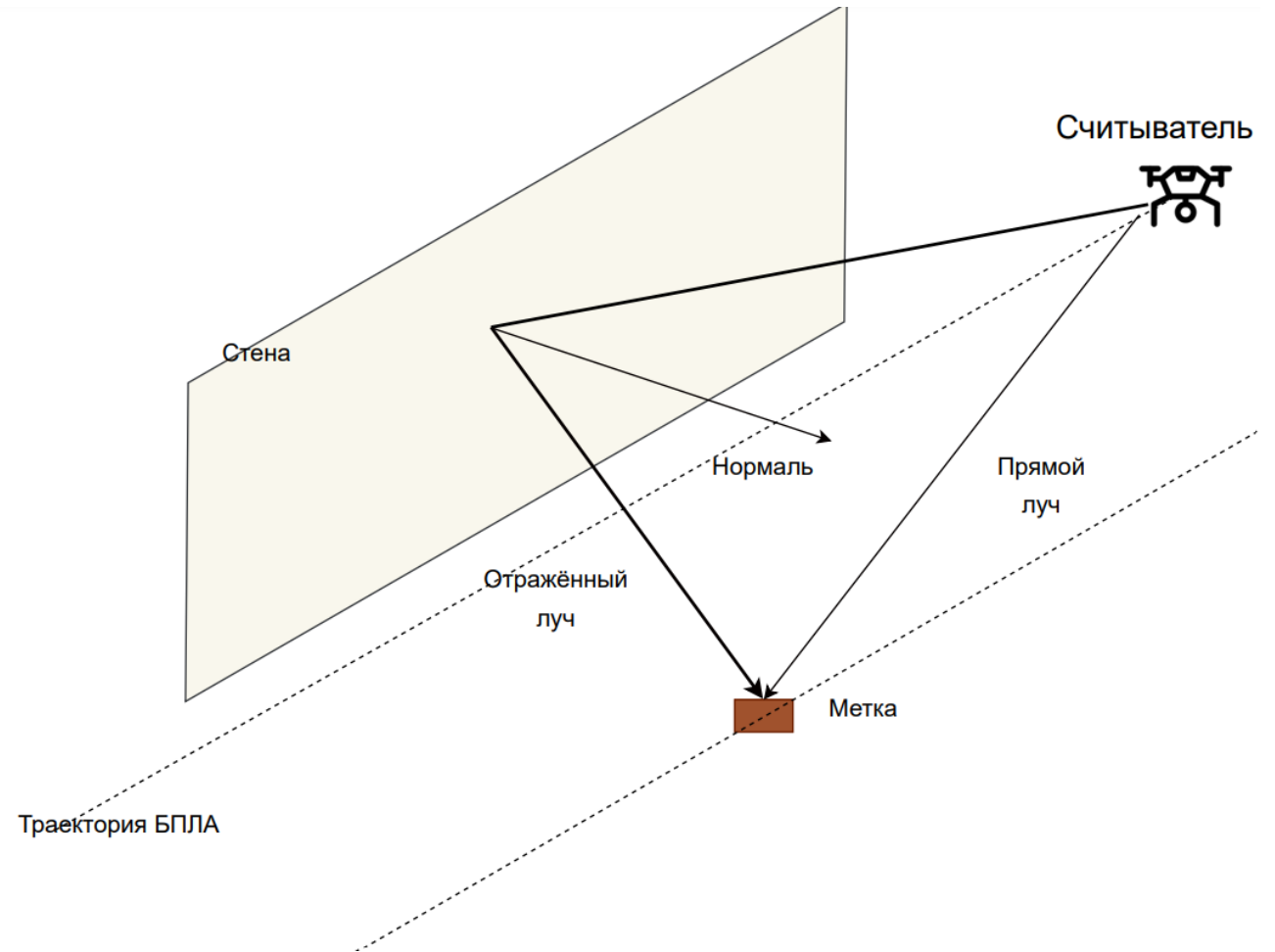
Также возможно исследовать максимальный объём передаваемых данных, при котором удовлетворяется заданная вероятность успешного обмена данными

Схема моделируемой системы

Точкой А отмечен движущийся беспилотник вдоль стены (на рисунке представлена закрашенной плоскостью YOZ)

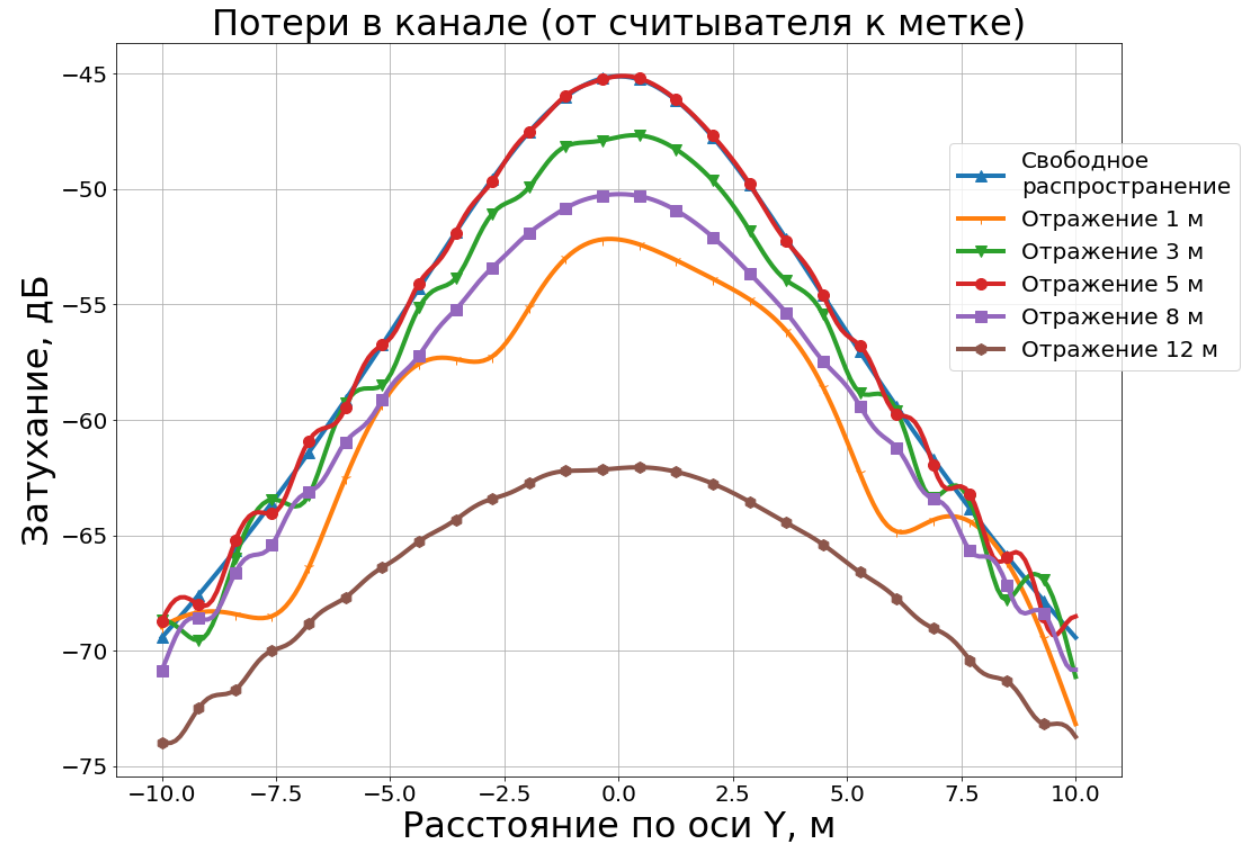
Точкой С отмечена неподвижно лежащая на земле метка

Точка D – место отражения второго луча, принимаемого меткой



Результаты моделирования потерь в канале

На данном графике изображены кривые потерь в канале, в случае пролёта БПЛА над меткой, лежащей на земле, мимо бетонной стены, от которой получается отражённый луч, также принимаемый меткой. Разные кривые соответствуют разным расстояниям БПЛА от стены



Структура дискретно-событийной имитационной модели




Ядро (планировщик, очередь событий)



Моделируемые объекты (считыватель, канал, метки, антенны)

Результаты работы будут использованы для

- Защиты магистерской диссертации на базе МФТИ
- Публикации статьи в журнале «Информационные технологии и вычислительные системы»



Модели и алгоритмы резервной системы локальной навигации БПЛА при отсутствии сигналов GPS и ГЛОНАСС

Лесив Е.А.

м.н.с. лаб. 90

аспирант ИПУ РАН

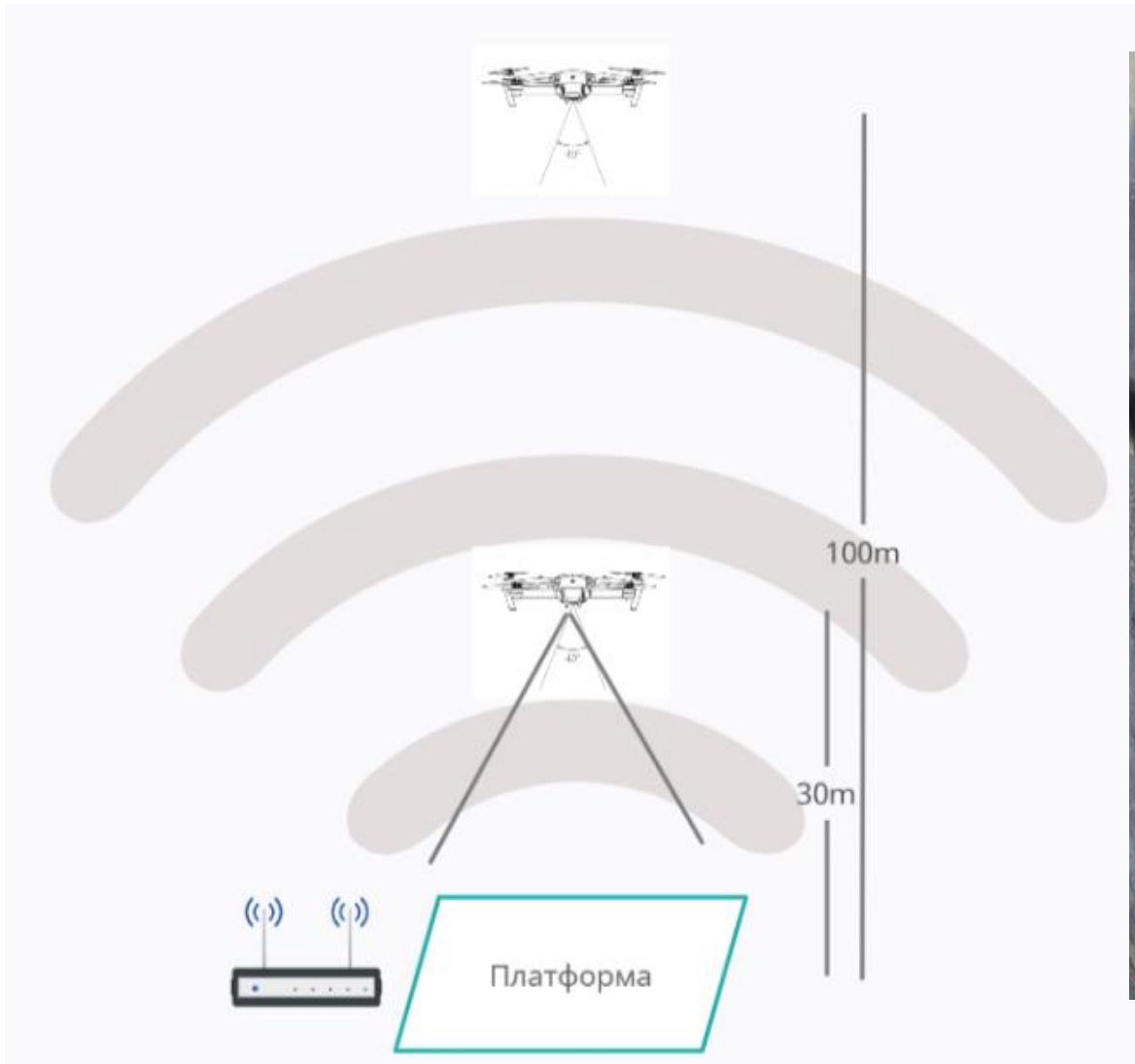
Постановка задачи

Общая задача резервной системы локальной навигации БПЛА при отсутствии сигналов GPS и ГЛОНАСС сводится к корректировке положения точки зависания мультикоптера над стационарной посадочной платформой.

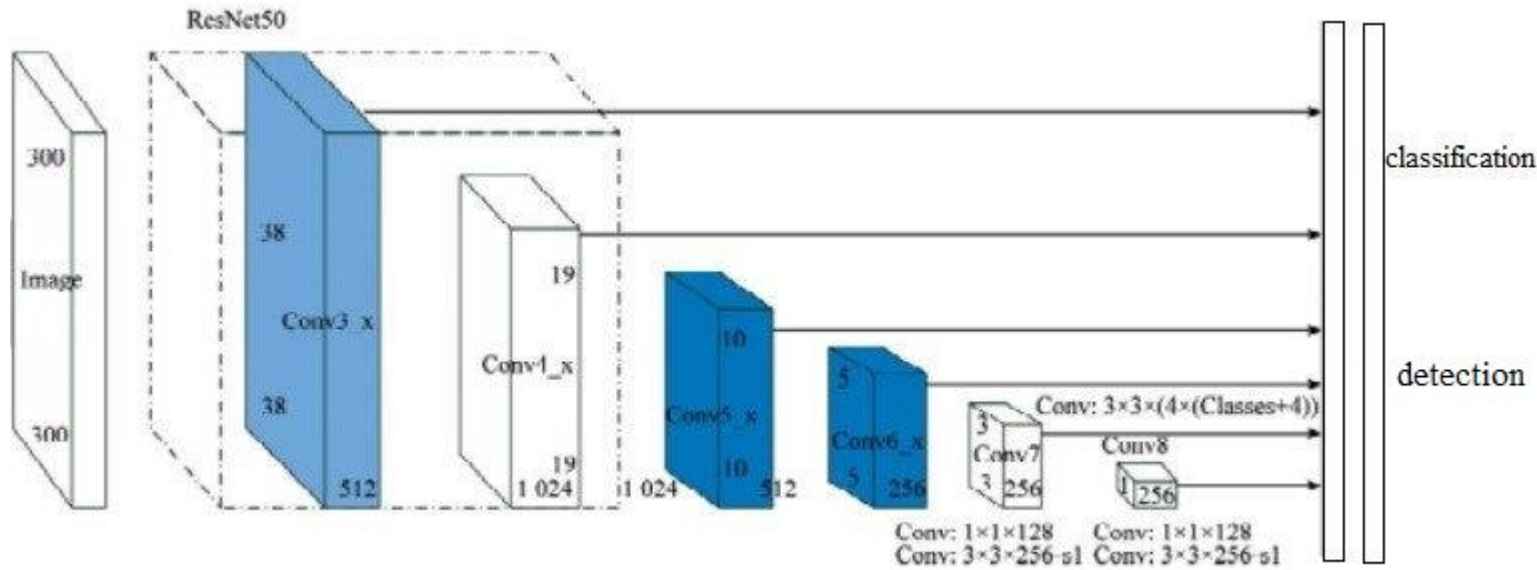
В рамках данной задачи рассматриваются вопросы стабилизации мультикоптера над целевой платформой и посадки на нее путем использования систем визуального анализа изображений для определения смещения посадочной платформы. В свою очередь, для этого целесообразно применять не только алгоритмы детекции, но и алгоритмы локальной навигации на основе анализа видеоизображения.

Таким образом, в данной работе рассматриваются вопросы определения пиксельного смещения посадочной платформы на видеоизображении. В то же время при замене системы отсчета решение задачи визуальной одометрии позволяет определить относительные смещения мультикоптера на каждом кадре. Тем самым формируется сигнал ошибки для регулятора положения БПЛА.

Описание установки



Детектирование посадочной платформы на основе нейросетевых алгоритмов



Метод	Recall (полнота)	Precision (точность)	IoU(степень пересечения)	FPS on Jetson Nano
Resnet50-SSD	99.02	96.43	96.3	26
MobleNetV2-SSD	97.33	89.54	94.7	37

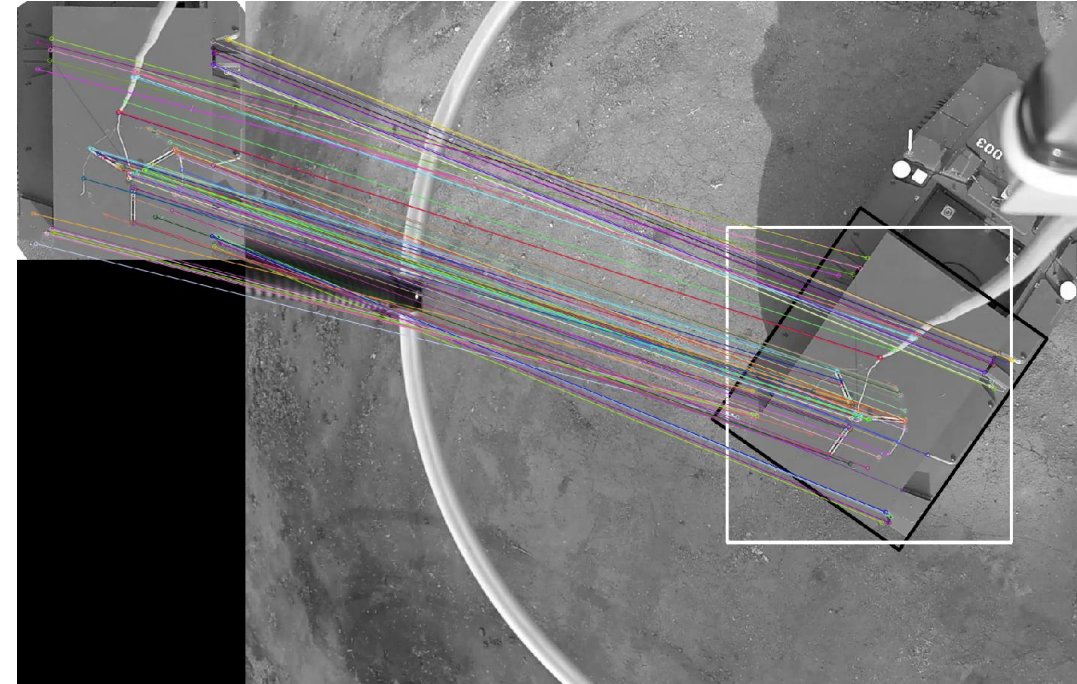
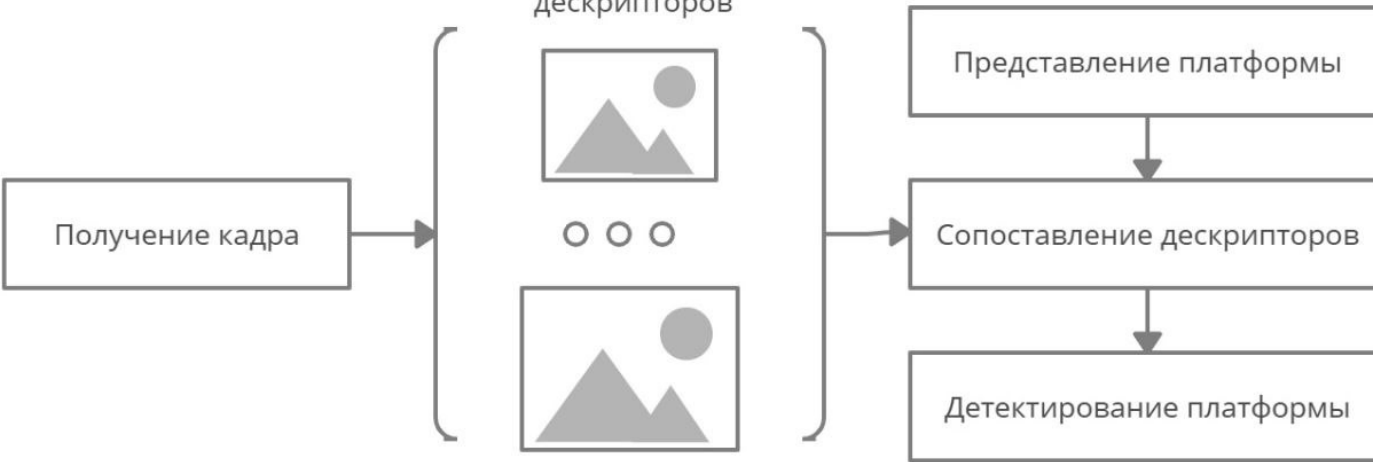
$$\text{Precision} = \frac{\text{Green Circle}}{\text{Green Circle} + \text{Red Circle}}$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{Green Circle}}{\text{Green Circle} + \text{Dark Green Circle}}$$

$$\text{IOU} = \frac{\text{Blue Square}}{\text{Green Square} + \text{Red Square}}$$

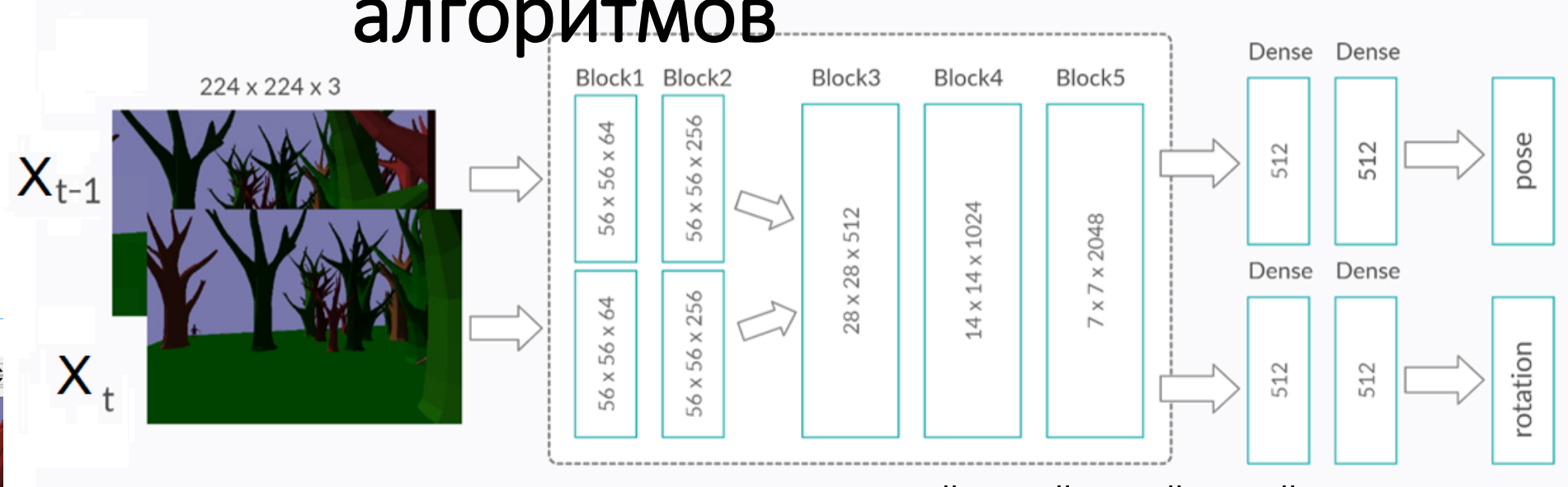
Детектирование посадочной платформы на основе каскада дескрипторов

Извлечение многомасштабных дескрипторов



Метод	Точность	IoU(степень пересечения)
SIFT	65.51	72.1
SUFR	66.045	71.73
BRISK	71.24	77.23
ORB	70.52	77.57
Cascad ORB	86.9	85.9

Визуальная одометрия на основе нейросетевых алгоритмов



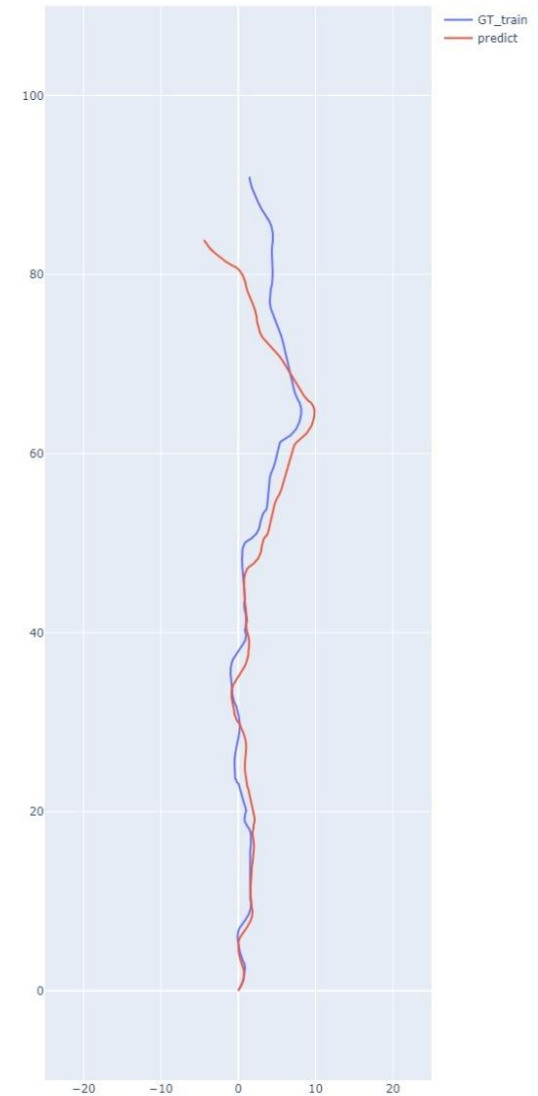
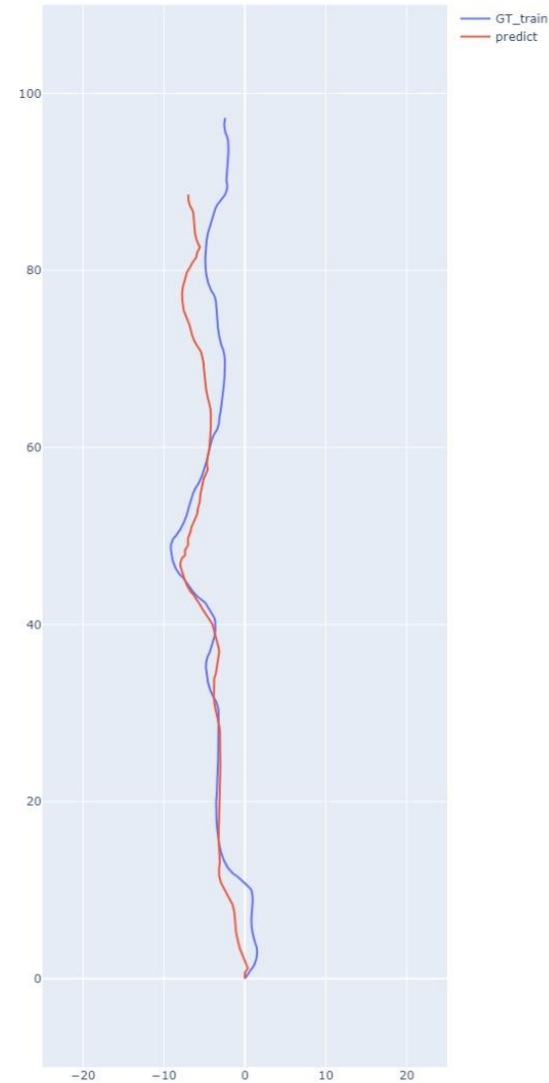
$$Loss(X_{t-1}, X_t) = \|p - \hat{p}\|_2 + \beta \|q - \hat{q}\|_2,$$

p, \hat{p} - эталонное и оцениваемое сетью изменение положения
 q, \hat{q} - эталонное и оцениваемое сетью изменение ориентации
 β - весовой коэффициент



Аппаратное обеспечение	FPS
Nvidia GeForce 1070Ti	27
Nvidia Jetson Nano	29

Визуальная одометрия на основе нейросетевых алгоритмов



Публикации

№	Название	Индексирование	Авторы
1	Neural-based Visual Odometry Trained in a Virtual Enviroment for a Mobile Robot Navigation / Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2021. С.	Scopus	Лесив Е.А., Диане С.А. К.
2	Нейросетевой алгоритм визуальной одометрии мобильного робота с обучением на синтетических данных / Труды 14-й Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем" (MLSD-2021). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 1528-1534.	РИНЦ	Лесив Е.А., Диане С.А. К.

Спасибо за внимание!
