



**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**



# Проектирование комплексных систем наблюдения

Ким Николай Владимирович

2022-23 г.

# Основные темы лекций

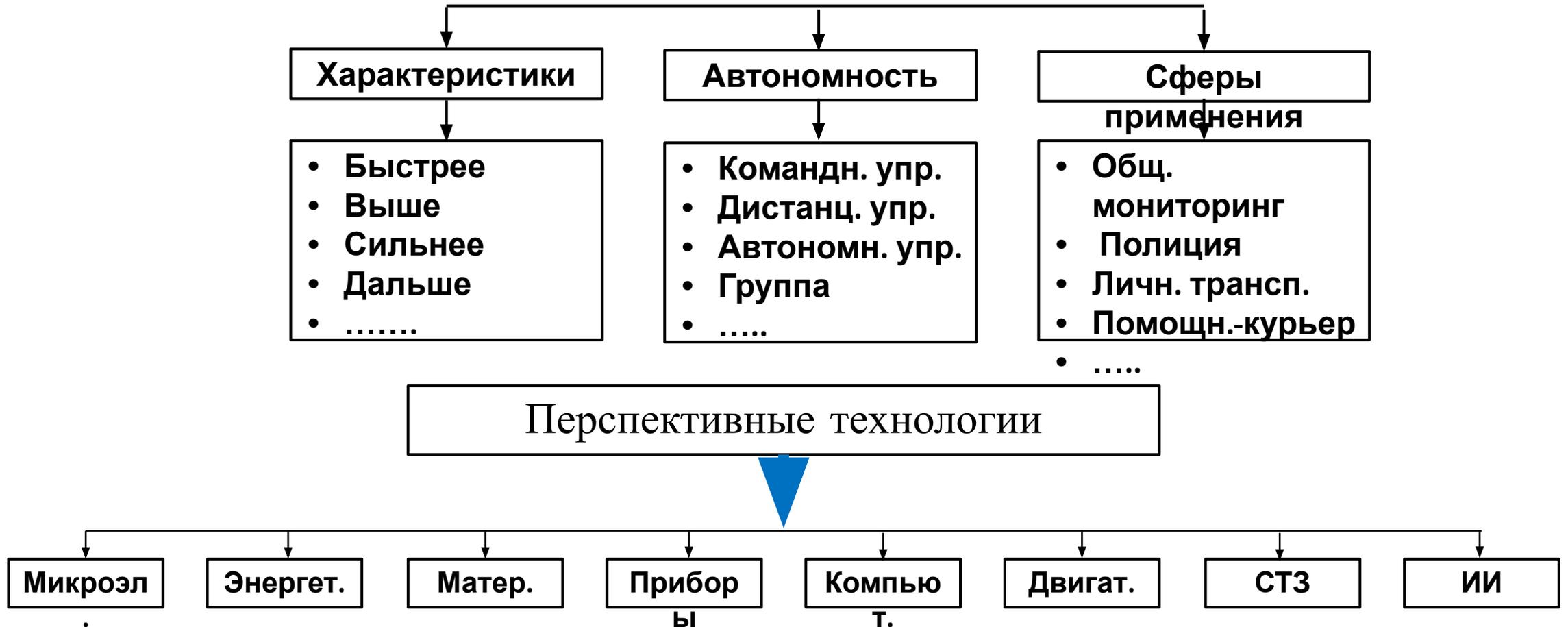
1. Проектирование технических систем (ТС) – формирование облика (состав, структура, параметры). СН и носители. Системный подход к проектированию ТС. Этапы проектирования. Уровни сложности. Метод ветвей и границ (выбор вариантов)
2. Показатели качества (ПК). Критерии и ограничения. Аддитивный критерий. Мультипликативный и аддитивно-мультипликативный критерии. Векторные критерии
3. Производительность. Быстродействие. Обеспечение производительности (увеличение мощности и/или скорости, параллельные процессы, иерархические методы). Примеры
4. Надежность. Основные понятия теории надежности. Поиск неисправностей. Оптимальный маршрут поиска неисправностей (дихотомия). Методы повышения надежности. Резервирование.
5. Обеспечение точности изготовления. Детали. Направляющие движения. Обеспечение точности сборки (взаимозаменяемость, компенсация)
6. Точность: измерения, управления процессами. ЛАФЧХ. Элементарные звенья. Обратная связь. Контур.
7. Точность-устойчивость. Требования. Переходные процессы. Запасы по амплитуде и фазе. Обеспечение устойчивости. ПИД-регулятор
8. Схемы СН с носителями. Расчет основных параметров СН. Энергетический расчет. Поле зрения и разрешение. Частота кадров
9. Человеко-машинные системы (ЧМС). Автоматизация управления в ЧМС. Схемы. Требуемая производительность при выполнении ЦЗ
10. Характеристики человека-оператора (статические, динамические). Визуальные, тактильные характеристики. Надежность оператора, алгоритм работы оператор, помощь оператору
11. – 14 ЛК – примеры проектов

## **Примеры проектов с СТЗ:**

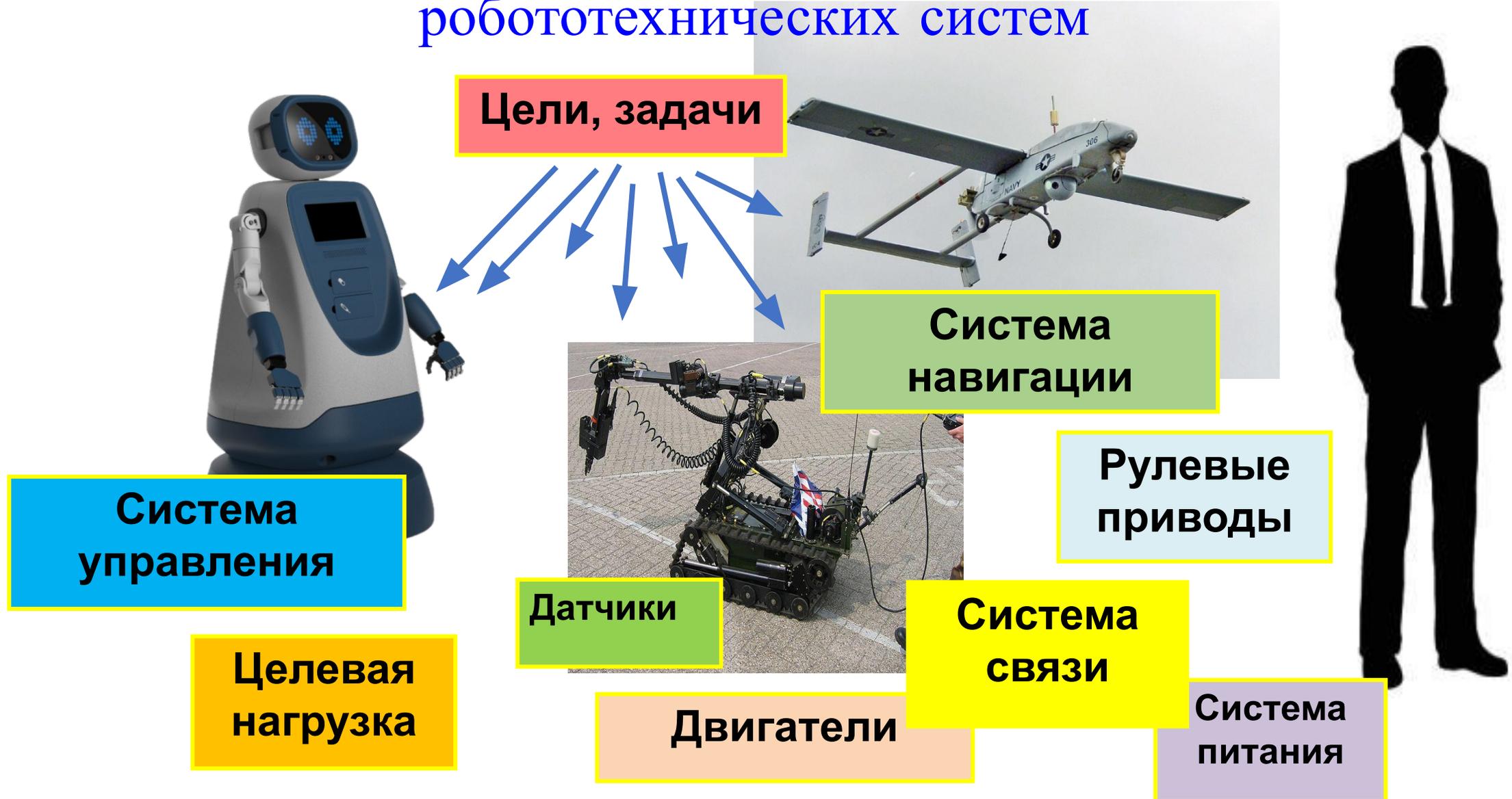
1. Посадка на необорудованный аэродром. Формирование облика СН на базе исследований (состав, параметры)
2. Комплексование ТВ и ТПВ датчиков. Формирование облика комбинированной СН
3. Обнаружение БЛА
4. Поиск группой БЛА
5. Измерение положение лопастей вертолета
6. Оптимизация высоты полета БЛА при мониторинге пожаров

# Развитие БЛА и роботов – носителей КСН

Потребности – Спрос - Возможности – Разработка – Развитие



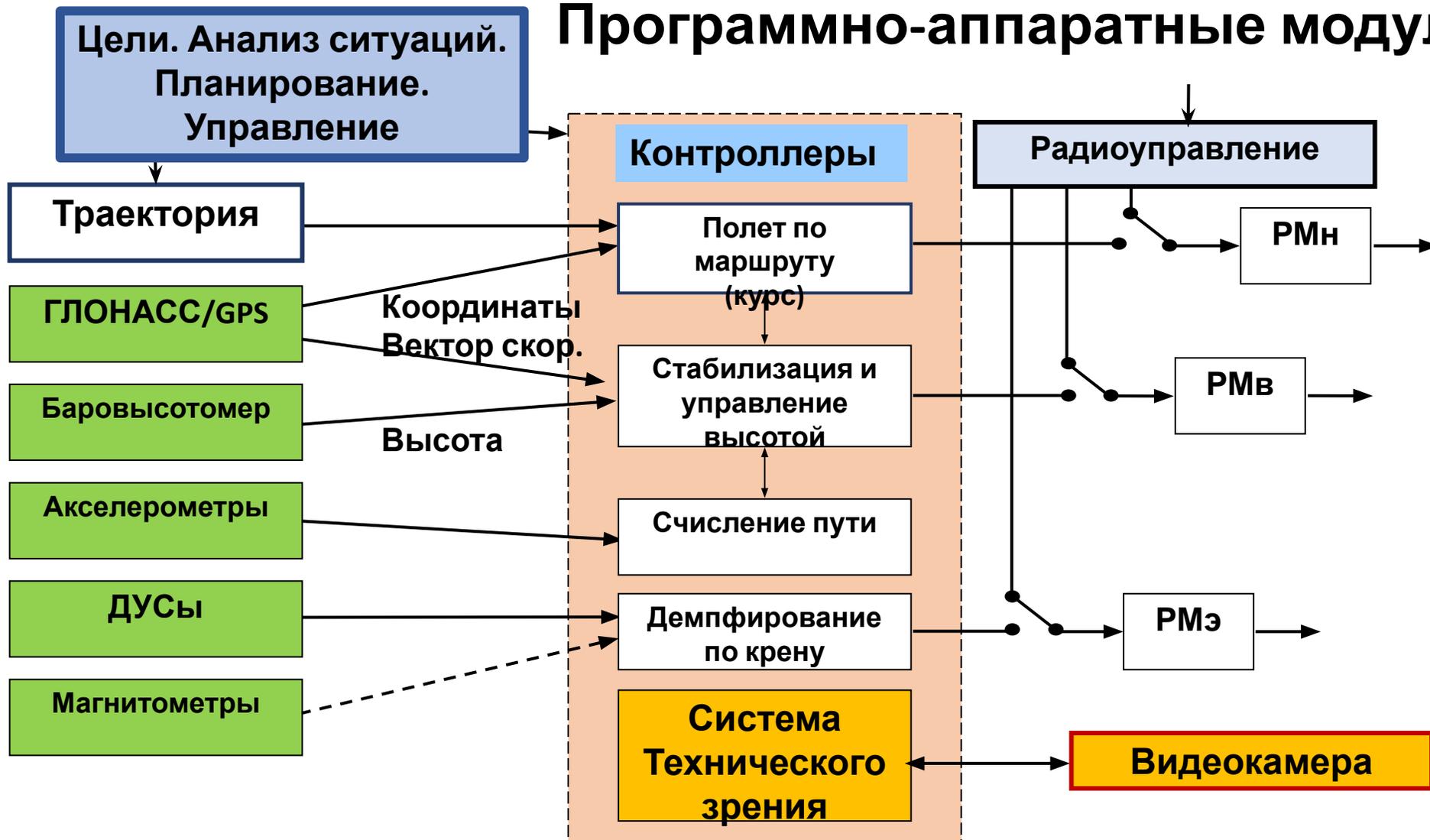
# Основные подсистемы БЛА и робототехнических систем



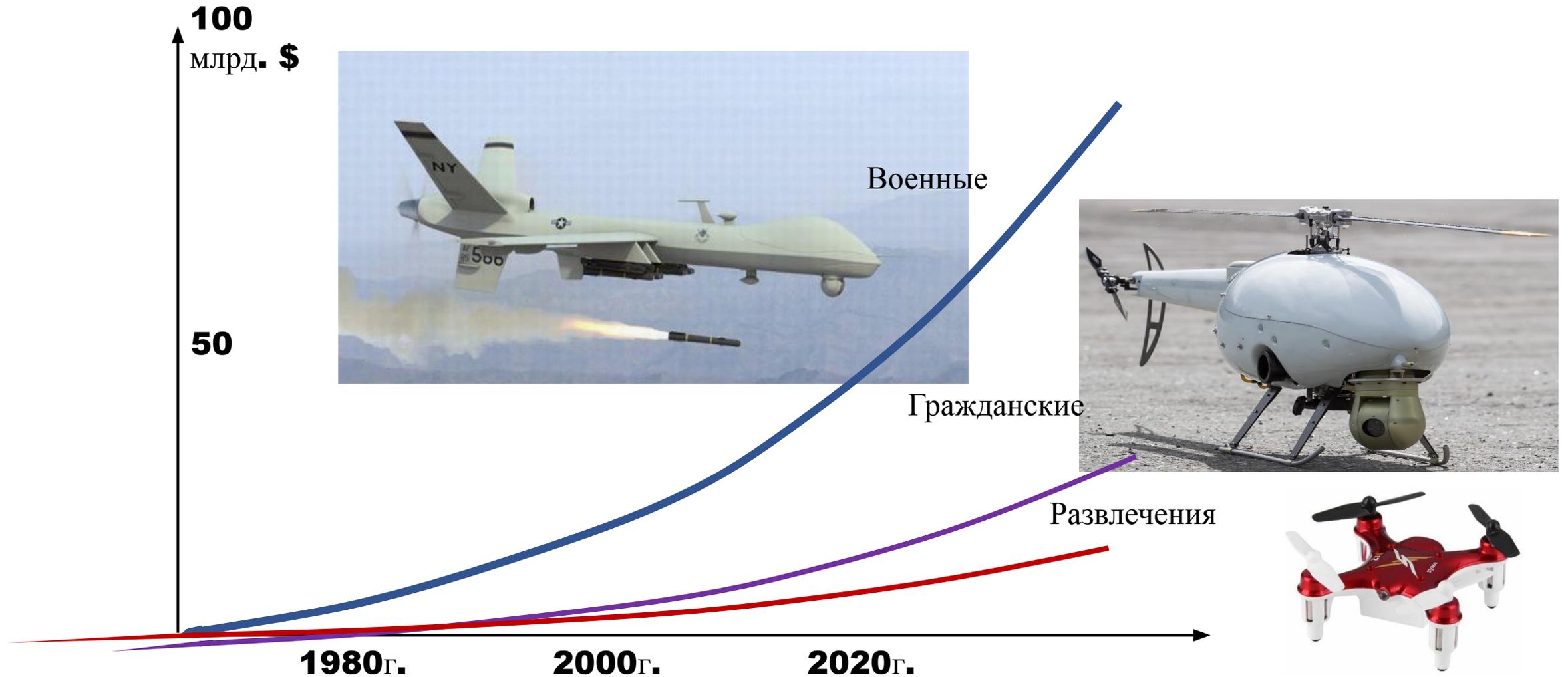


# Система управления и навигации БЛА

## Программно-аппаратные модули



# Эволюция рынка БЛА



# НЕМНОГО ИСТОРИИ БЛА

## ФАУ-1 (V-1) (1942-44гг.)



Длина, м: 7,75  
Диаметр фюзеляжа, м: 0,85  
Снаряжённая масса, кг : 2160  
Максимальная скорость полёта:  
656 (800) км/ч – 0,53 (0,65)М  
Максимальная дальность, км : 286  
Масса боевой части, кг : 700-1000

## MQ-1 Predator (США 1994 г.)



Размах крыла, м: 14,84  
Снаряжённая масса, кг : 1020  
Максимальная скорость полёта: 217км/ч  
Максимальная дальность, км : 340

## MQ-9 Reaper (США 2001 г.)

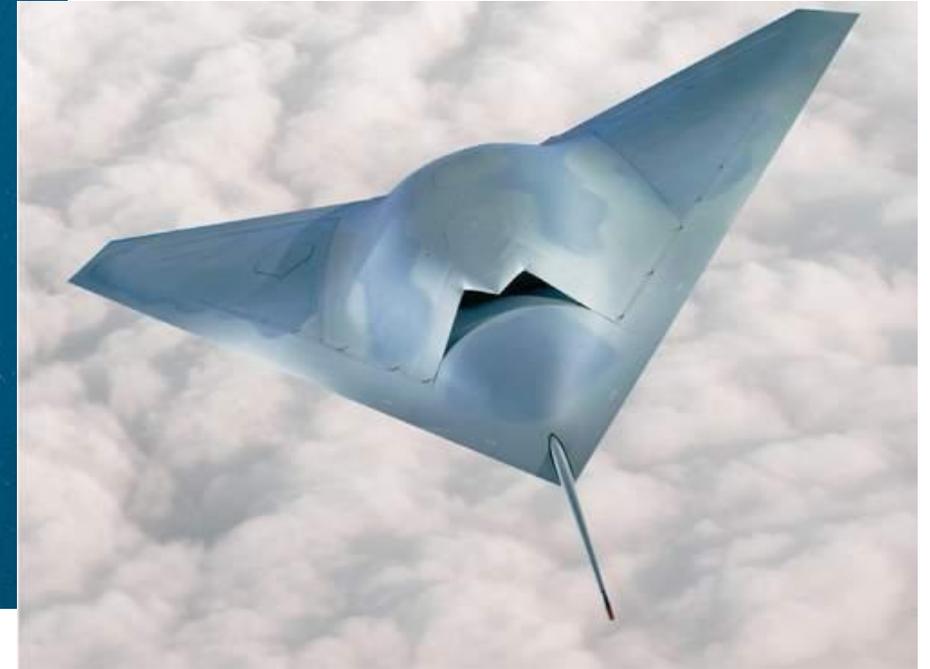


- Потолок: 15 км
- Автономность: 14 часов при полной загрузке<sup>[24]</sup>
- Дальность: 1900 км
- Длина: 11 метров
- Грузоподъёмность: 1700 кг
- Вес: 2223 кг (пустой); 4760 кг (максимальный)
- Размах крыла: 20 м
- Крейсерская скорость: 250 км/ч
- БРЭО Радиолокационная станция AN/APY-8 Lynx II с синтезированной апертурой, комбинированная электронно-оптическая и тепловизионная станция — на сферическом подвесе под фюзеляжем с [лазерным дальномером-целеуказателем](#)
- Имеет шесть точек подвески.

## **X47B Northrop Grumman** (США, 2014 г.)



- Максимальный взлётный вес: 16 556 кг
- Крейсерская скорость: 988 км/ч
- Диапазон действий: 2,414 км
- Потолок: 12 192 м



## **Boeing Phantom Ray** (США, 2011 г.)

- максимальный взлетный вес 20 тонн;
- масса боезапаса 2 тонны;
- средняя скорость полета 530 км/ч;
- максимальная скорость более 900 км/ч;
- практический потолок 12 километров.

## Беспилотные аппараты США

### RQ-4 Global Hawk (Нортроп Грумман)



Характеристики	RQ-4A	RQ-4B
Назначение	Разведывательный	Разведывательный
Дальность действия, км	25015	22780
Стартовая масса, кг	12133	14628
Масса полезной нагрузки, кг	907	1360
Скорость, км/ч	644	637
Продолжительность полета, ч	36	36
Высота полета (практический потолок), км	19,8	19,8

Характеристики	Hermes 450
Назначение	Разведывательный
Дальность действия, км	200
Стартовая масса, кг	450
Масса полезной нагрузки, кг	250
Скорость, км/ч	176
Продолжительность полета, ч	до 20
Высота полета (практический потолок), км	6,1



## Беспилотные аппараты Израиля

### Elbit Hermes 450

# Отечественные разработки БЛА

## РЕКОРДЫ СССР

1957 г. - Первый искусственный спутник Земли

1959 г. - Первый аппарат на Луне

1961 г. - Первый человек в космосе Юрий Гагарин

1965 г. - Первый человек в открытом космосе Алексей Леонов

1966 г. - Первый в мире перелёт на другую планету (Венера - 3)

Мягкая посадка на Луну

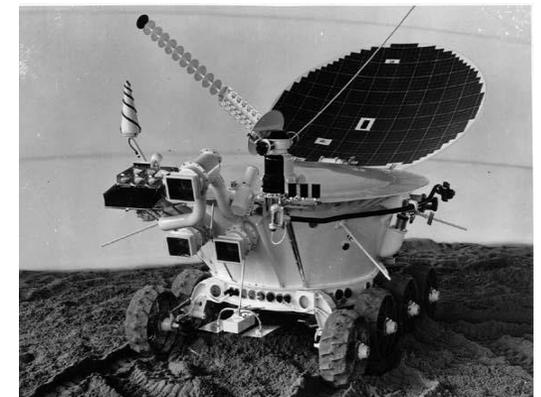
1970 г. – Посадка на Луну (Луна - 16) и возвращение на Землю

Дистанционно управляемый Луноход-1

Впервые переданы данные с другой планеты (Венера-7)

1971 г. - Станция «Марс-2» впервые на поверхности Марса

Первая мягкая посадка на Марс (Марс-3)



# Российские БЛА первого поколения



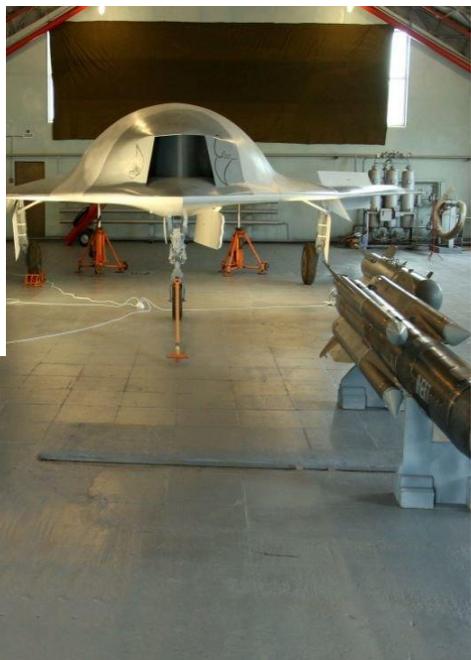
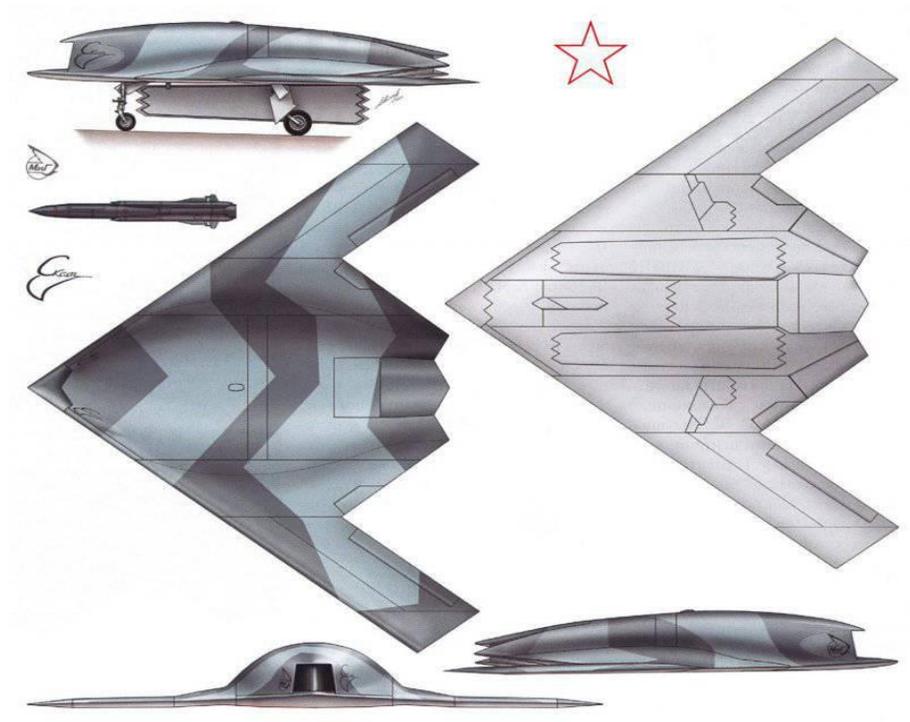
Иркут-200



Типчак

(c) КБ "Луч"  
(c) MISSILES.RU

# «Скат» (МиГ) ударный



Характеристики	«Скат»
Назначение	Ударный
Дальность действия, км	4000
Стартовая масса, кг	10000
Масса полезной нагрузки, кг	до 2000
Скорость, км/ч	850
Продолжительность полета, ч	-
Высота полета (практический потолок), км	12

# «ОХОТНИК» (Су) ударный



  
Министерство обороны  
Российской Федерации

Характеристики	«Охотник»
Назначение	Ударный
Дальность действия, км	6000
Стартовая масса, кг	25000
Масса полезной нагрузки, кг	2800
Скорость, км/ч	1000
Продолжительность полета, ч	-
Высота полета (практический потолок), км	18

# «Альтаир»



# «Альтиус-У»

## разведывательно-ударный

Характеристики	«Альтиус-У»
Назначение	Разведывательно-ударный
Дальность действия, км	10000
Стартовая масса, кг	до 7000
Масса полезной нагрузки, кг	до 2000
Скорость, км/ч	до 250
Продолжительность полета, ч	48
Высота полета (практический потолок), км	12

## «Дозор-600» (Транзас)



Характеристики	«Дозор-600»
Назначение	Ударный
Дальность действия, км	3700
Стартовая масса, кг	712..720
Масса полезной нагрузки, кг	до 150
Скорость, км/ч	215
Продолжительность полета, ч	24
Высота полета (практический потолок), км	7,5

# «Орион»

**Для разведки и наблюдения за местностью на борту БПЛА «Орион» устанавливается:**

1. Обзорно-прицельная оптико-электронная система.  
Установлена на гиростабилизированной платформе, размещаемой в носовом внутреннем отсеке фюзеляжа. В состав этой системы входят два тепловизора, широкоугольная телекамера и лазерный дальномер-целеуказатель.
2. Обзорная радиолокационная станция. Устанавливается в центральном внутреннем отсеке фюзеляжа и закрывается снизу радиопрозрачным колпаком.
3. Система аэрофотосъемки высокого разрешения.  
Устанавливается вместо обзорной РЛС и состоит из набора цифровых фото- и видеокамер, размещенных на гиростабилизированной платформе.
4. Система сбора информации о радарх ПВО противника.  
Принимает радиоволны и определяет местонахождение их источников. Устанавливается в центральный внутренний отсек фюзеляжа.
5. Аппаратура радиоэлектронной борьбы.



Длина БПЛА	8 м
Высота	3,2 м
Размах крыльев	16,3 м
Взлетный вес с полной нагрузкой	1 тонна
Масса полезной нагрузки	До 200 кг
Боевой радиус	250 км
Максимальная длительность полета	24 часа (по другим данным, 27 часов)
Эксплуатационный потолок	7 500 м
Крейсерская скорость	От 120 до 200 км/ч (по разным данным)



## «Орлан-10»

Многофункциональный беспилотный комплекс



Разработан  
предприятием  
«Специальный  
технологический  
центр»



Скорость  
90-150 км/ч



Высота полета  
5000 м



Продолжительность  
полета 16 ч



Взлетная масса  
14 кг

Масса полезной  
нагрузки  
5 кг



Способ старта —  
с разборной  
катапульты



Способ посадки —  
на парашюте



Дальность  
120 км (от наземной  
станции управления)

600 км  
(в автономном  
режиме)



Диапазон рабочих температур  
у поверхности земли  
от -30 до +40 °С

# Использование роботов в мире

1000 тыс. ПР

Россия занимает второе место в мировом рейтинге производителей **сервисных роботов** (отчет международной федерации робототехники (IFR) за 2019 год.

Согласно оценкам IFR, в мире 889 производителей сервисных роботов: США – 223 компании, в России – 73, Германия (69), Китай (64), Франция (52) и Япония (50).

500 тыс. ПР

ПР

Китай

Япония

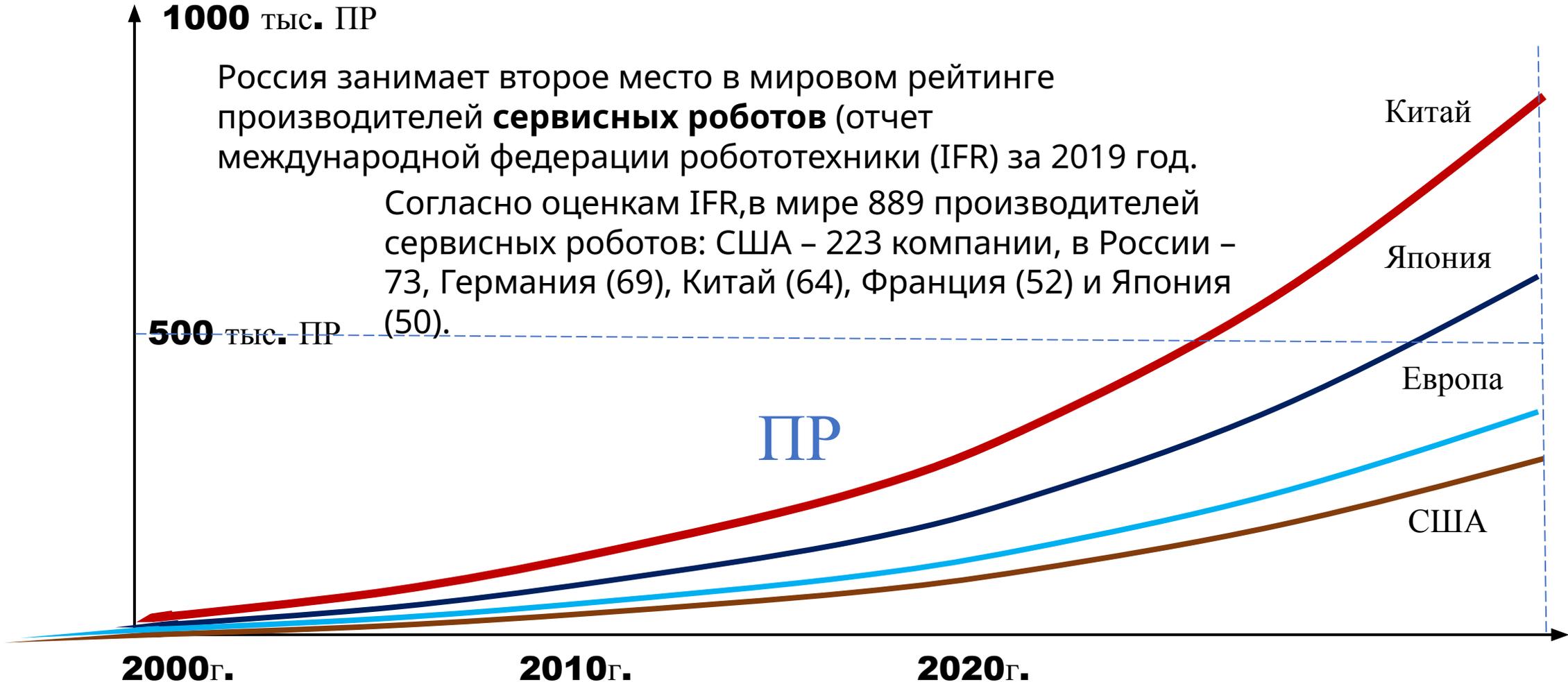
Европа

США

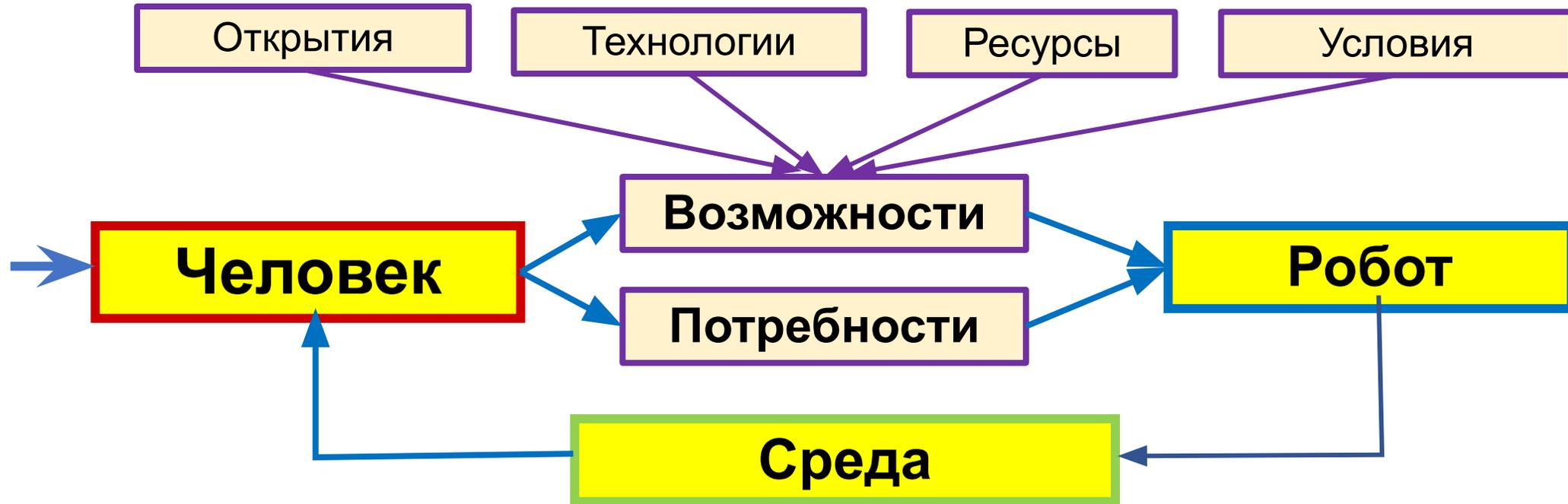
2000г.

2010г.

2020г.



# Эволюция роботов



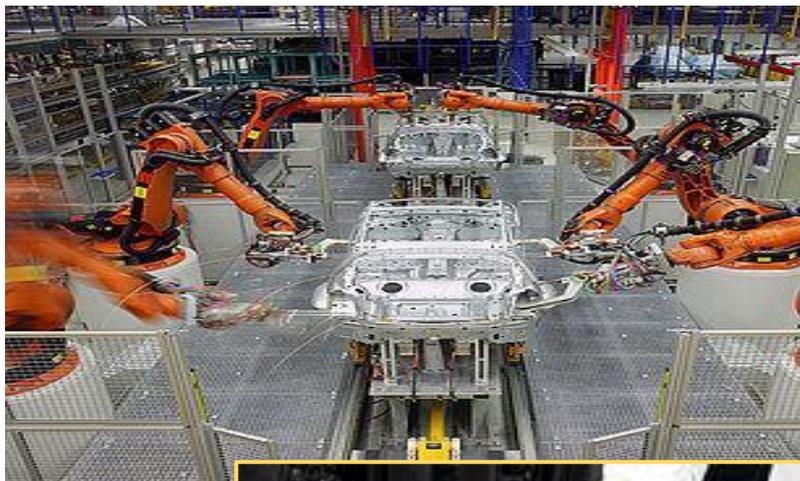
**Мы изменяем роботов и среду, а они меняют нас.**

**У человека, среды и роботов могут возникнуть или уже существуют антагонистические противоречия.**

**Роботы захватывают мир и мы им помогаем.**

# Промышленные роботы (ПР)

Стационарные роботы –  
манипуляторы



Мобильный  
манипулятор



# Сервисный Робот – информационный ассистент



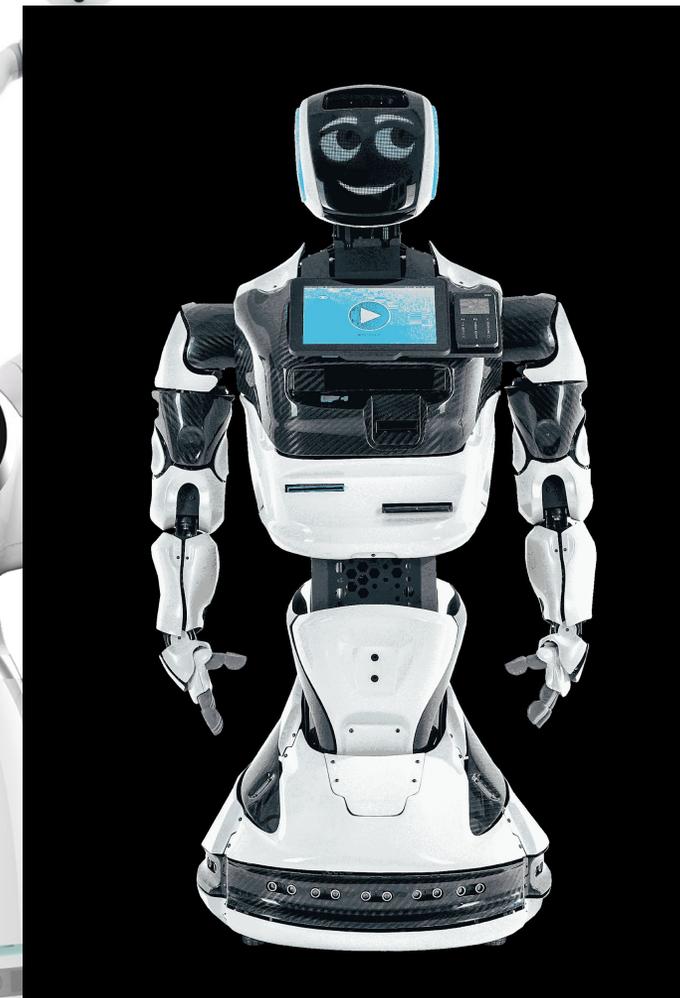
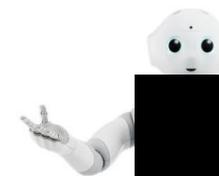
# Мобильные помощники

## Мобильность

Передвижение по  
комнате

## Расширяемость функций

Физическое взаимодействие с человеком  
Оценка состояния человека  
Помощь в бытовых задачах  
Развлечение, PR, информационная помощь



# Сервисные роботы Робот-”игрушка”

Для детей, малоподвижных пациентов,  
одиноких, пожилых людей.



## Тактильное общение

Восприятие прикосновений  
Рефлексы «стимул - реакция»

## Эмоции

Психологическая помощь в домашних условиях.  
Информационная помощь (напоминания, поиск).  
Развлечение, общение, обучение.

## Речевое общение

Распознавание речи  
Понимание смысла  
Ведение диалогов  
Информация, команды



# Робот «Маша» (МАИ, 2020г.)



## Система зрения

Обнаружение и распознавание лиц  
Поиск и распознавание предметов  
Визуальная навигация

## Манипулятор

Взятие, переноска и передача  
предметов

## Мобильная платформа

Навигация в помещениях  
Планирование маршрутов  
Управление движением

## Лицо

Выражение эмоций

## Речевой интерфейс

Распознавание речи  
Понимание смысла  
Ведение диалогов  
Информация, команды

## Информационный экран

### Требования

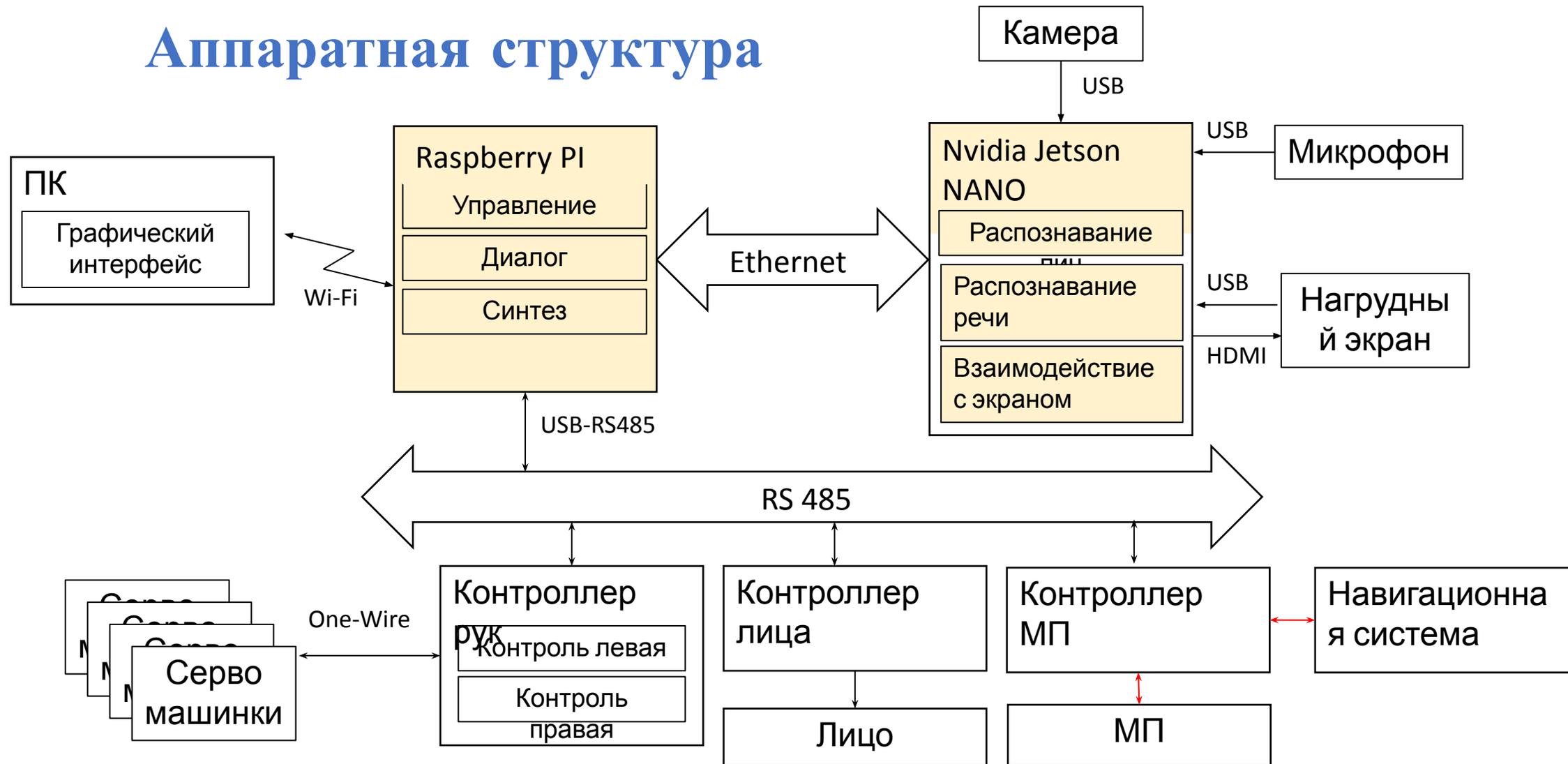
Автономность

Функциональность

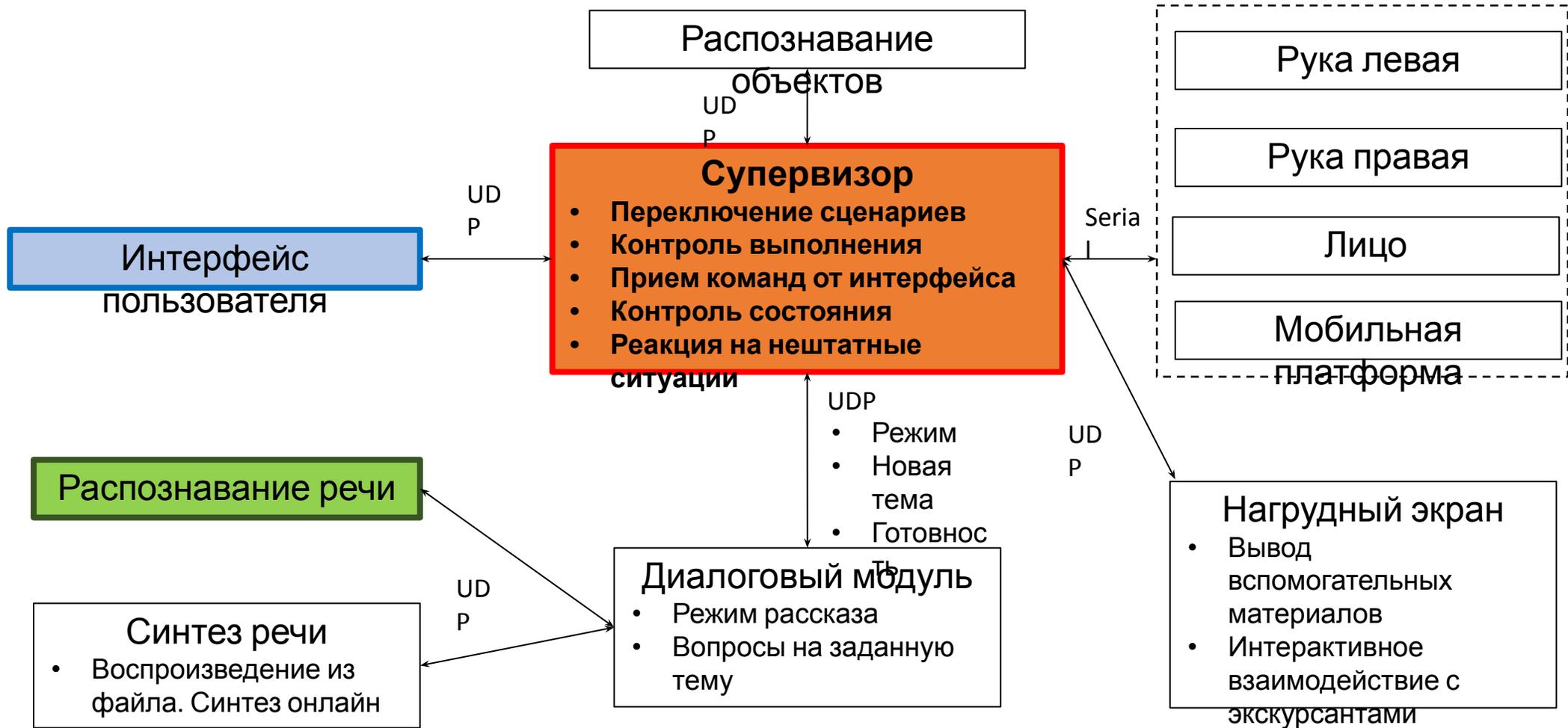
Безопасность

# Как устроен робот

## Аппаратная структура



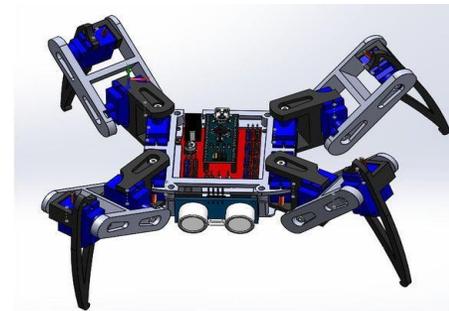
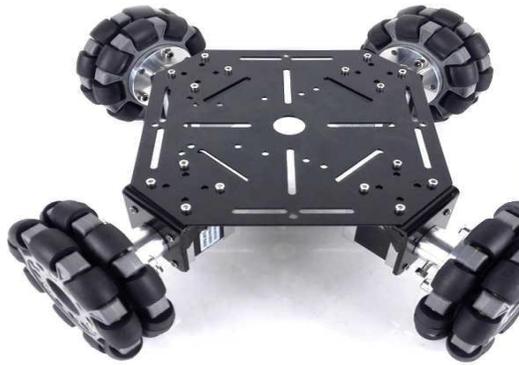
# Вычислительная система



# Подсистемы мобильного робота

Скорость, проходимость, грузоподъемность, маневренность – **МОБИЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА (МП)**

## Колесн



## Гусеничн



**Шагающ  
ие**

# Навигация мобильной платформы (определение координат и ракурса)

## Инерциальная НС

- автономность,
- помехозащищенность,
- высокая скорость.

Необходима коррекция из-за накопления ошибки

## Глобальная НС

- Спутниковая навигация  
(не работает в помещениях)

## Визуальная НС

- Ориентиры: объекты, углы линии,
  - Метки: QR, ARUCO и т.п.,
  - SLAM
  - ИК метки
- Требуется установка меток или сложные вычисления

## Фильтр Калмана Data Fusion

Оценки положения и ориентации

## Локальные НС

- Ультразвуковые маяки,
- Радио маяки,
- Световые маяки «LiFi».

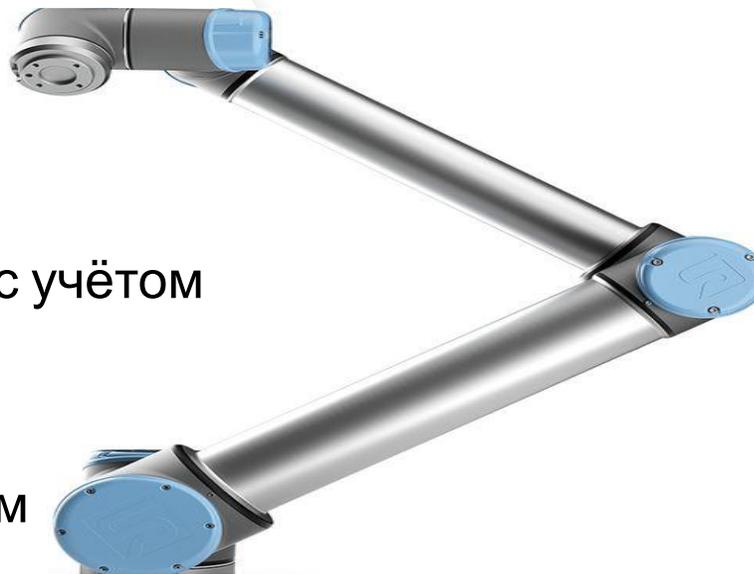
Требуется установка маяков

Основная проблема - навигация

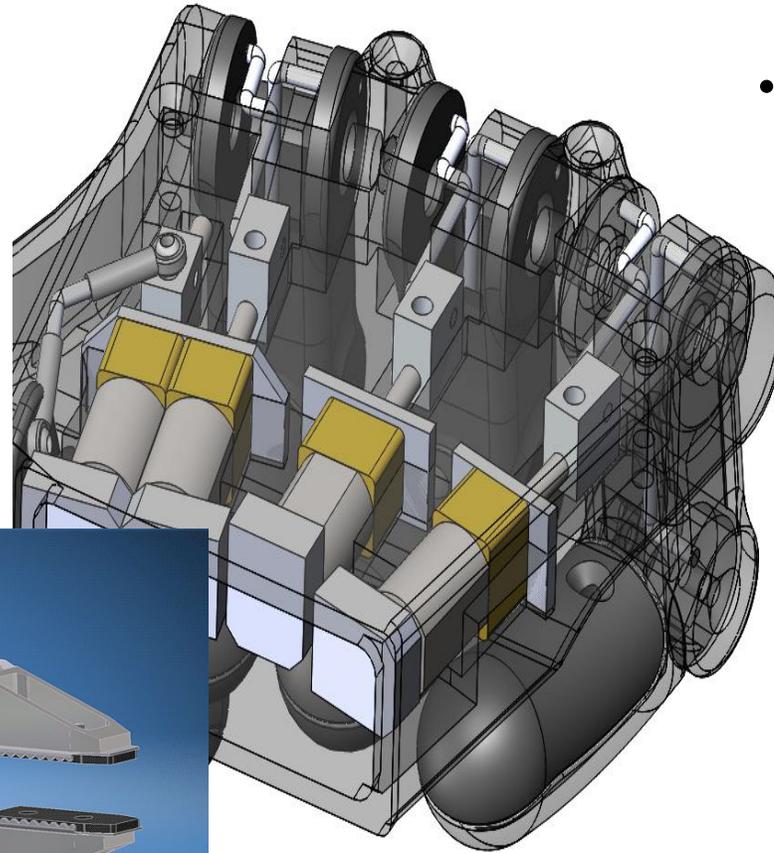


# Манипулятор

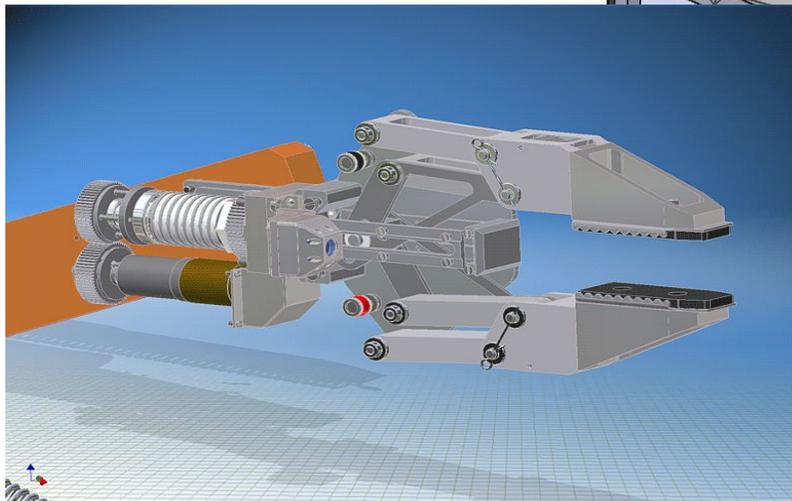
- Разработка манипулятора с учётом грузоподъёмности
- Разработка схвата
- Управление манипулятором
- Очувствление манипулятора



# Варианты захвата

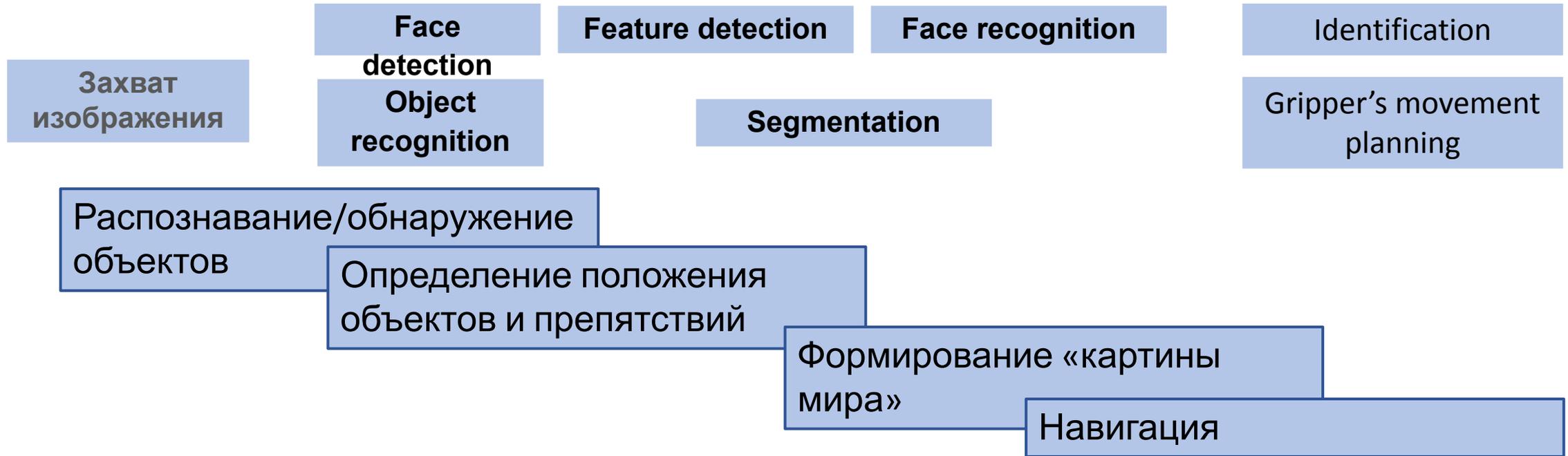
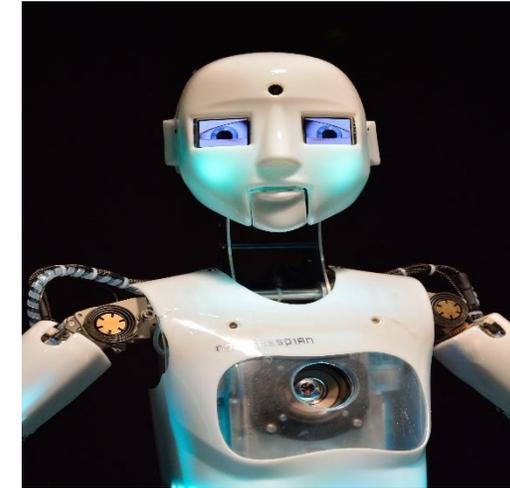


- Высокоточные приводы,
- Системы параллельного, согласованного управления,
- Датчики положения,
- Очувствление



# Зрение робота

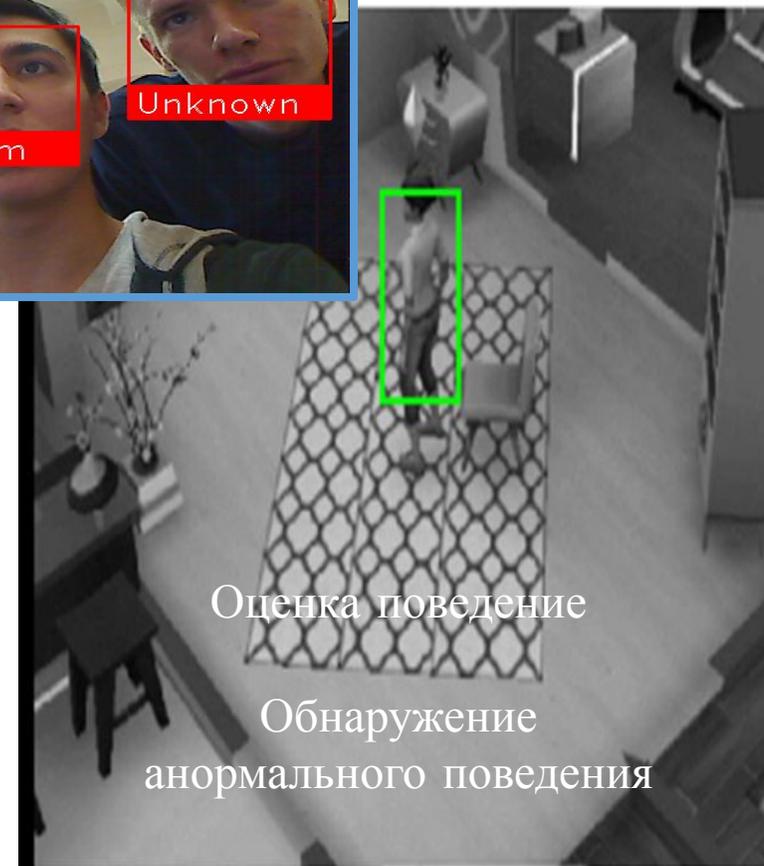
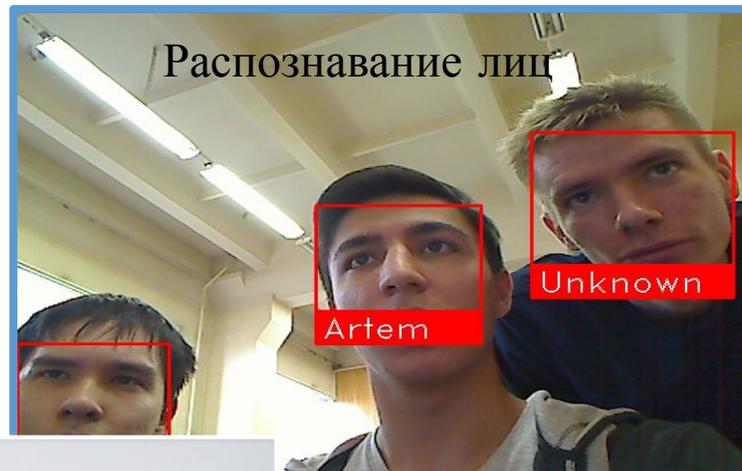
- Видео/мультиспектральные камеры
- Сенсоры глубины
- Лазерные сканеры
- Прочие датчики



# Система компьютерного зрения

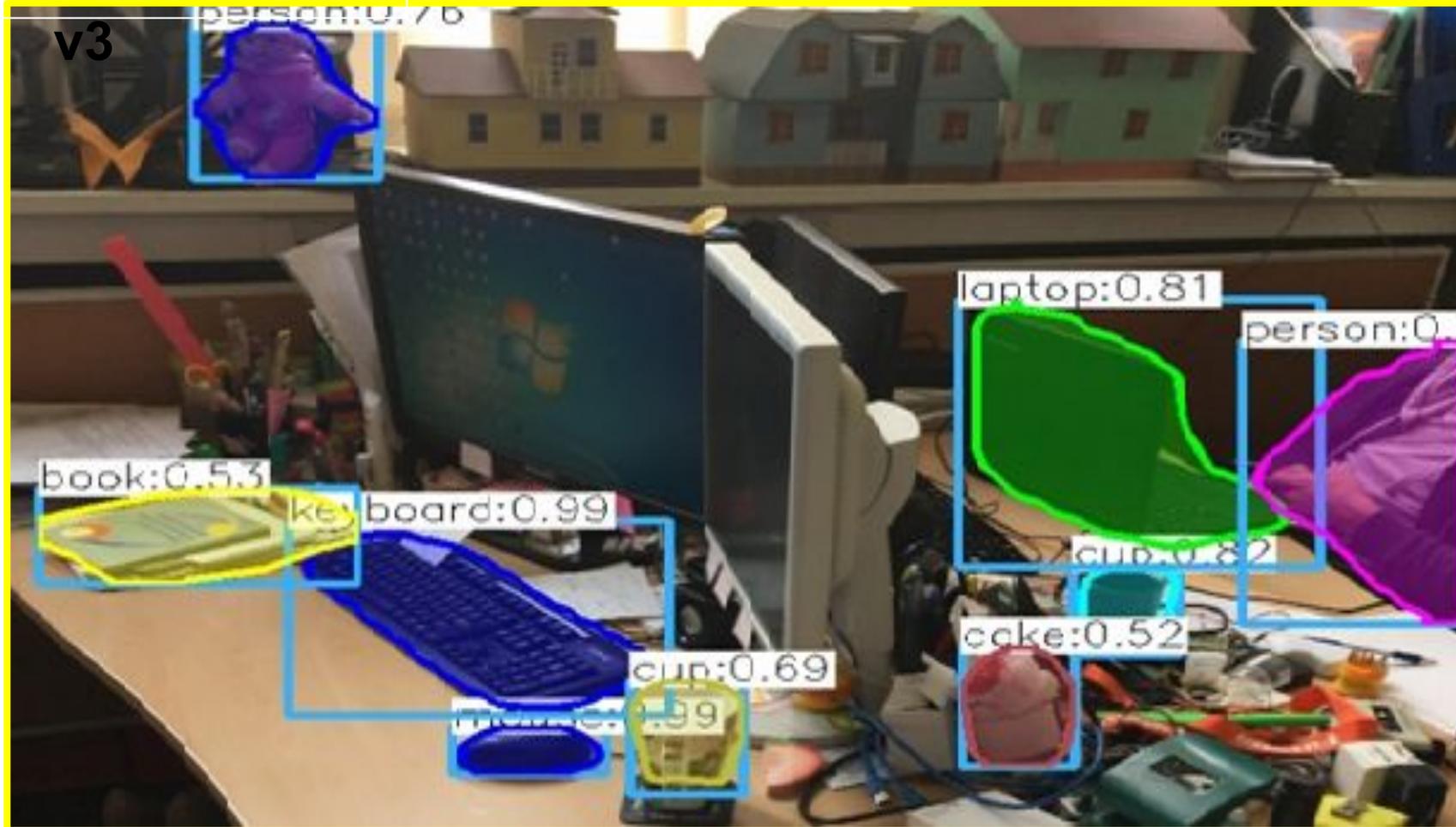


Системы доступа



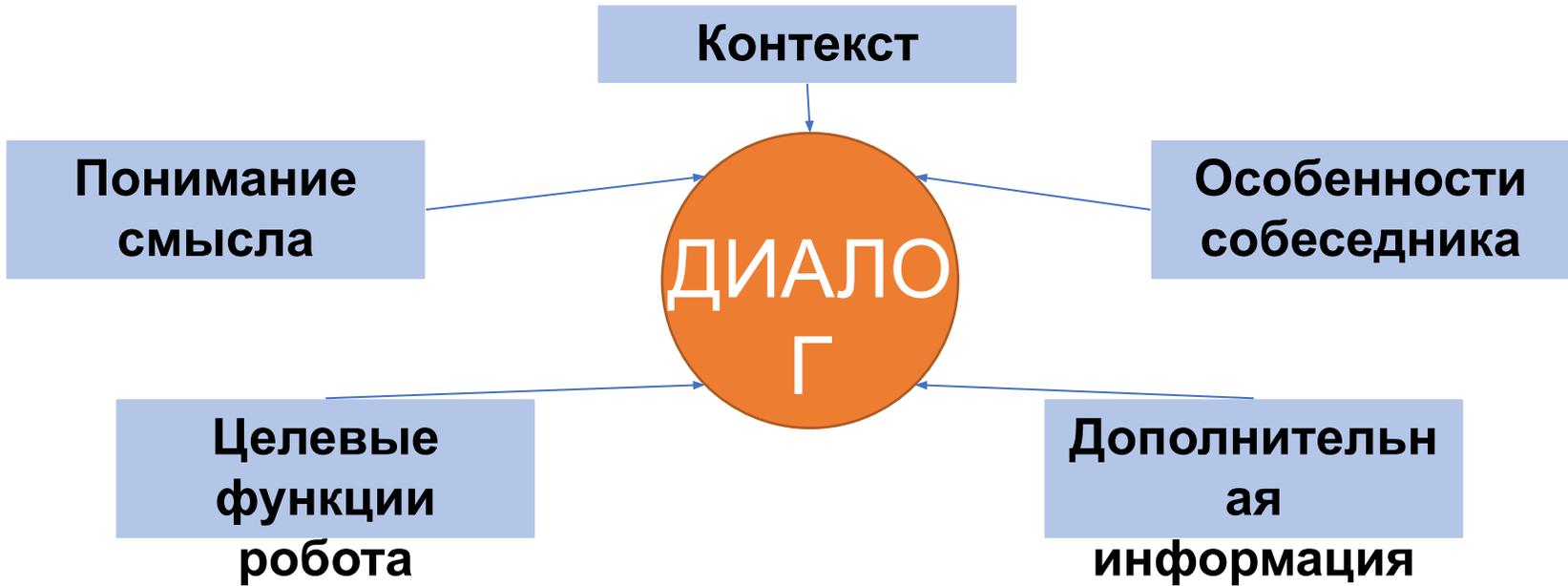
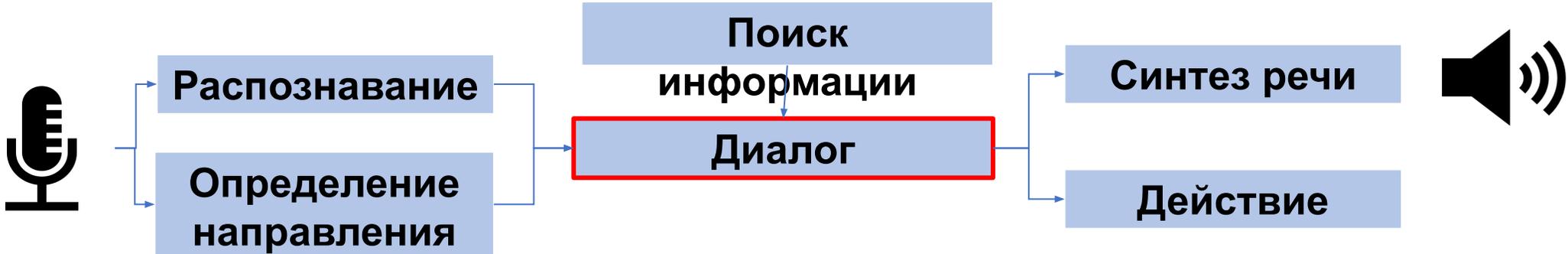
# Распознавание объектов

## Nets- Mask RCNN/Yolo



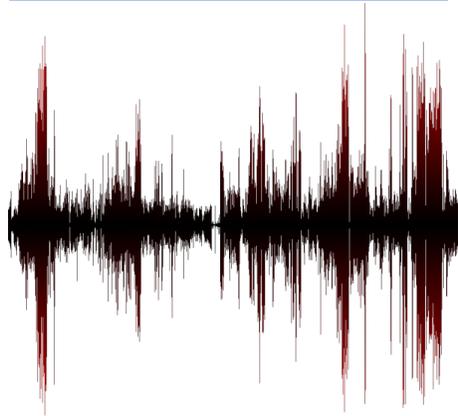
- For correct object grab planning it's contour should be detected

# Речевое общение



# Распознавание речи

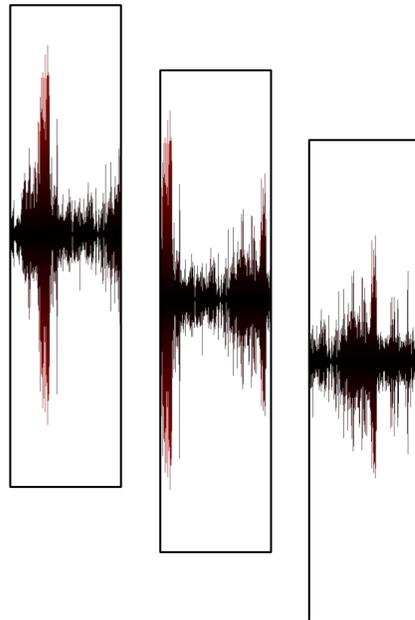
## Получение сигнала



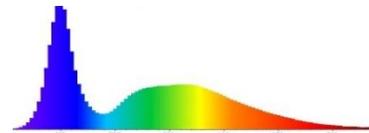
- Захват
- Оцифровка
- Фильтрация



## Разбиение на фреймы



## Выделение признаков



- Спектр
- Вектор коэффициентов

## Распознавание Фонем

[п] - 0.95  
[р'] - 0.5  
[и] - 0.8  
[в'] - 0.6  
[и] - 0.8  
[т] - 0.7

- Фонетическая модель

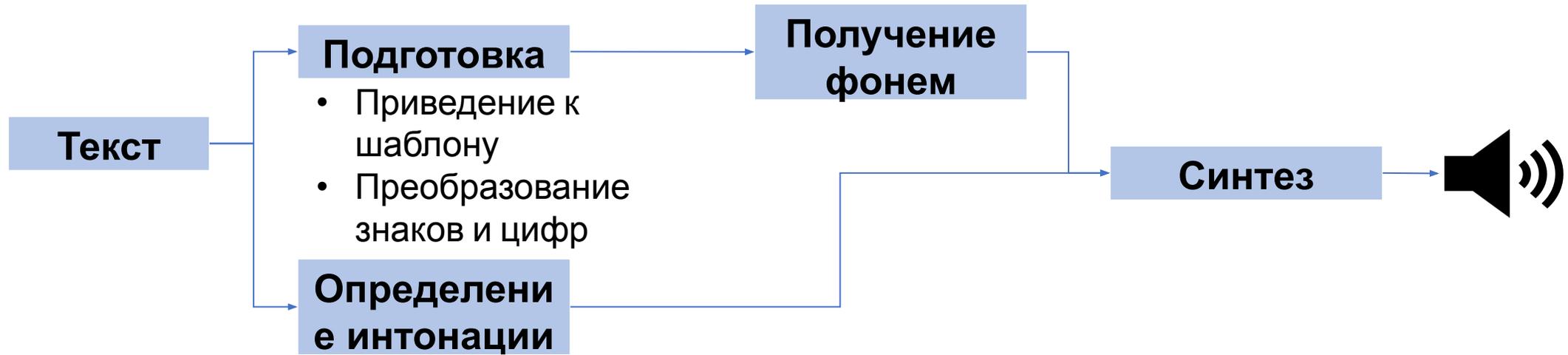
## Распознавание Слов

**Варианты слов и их вероятности:**

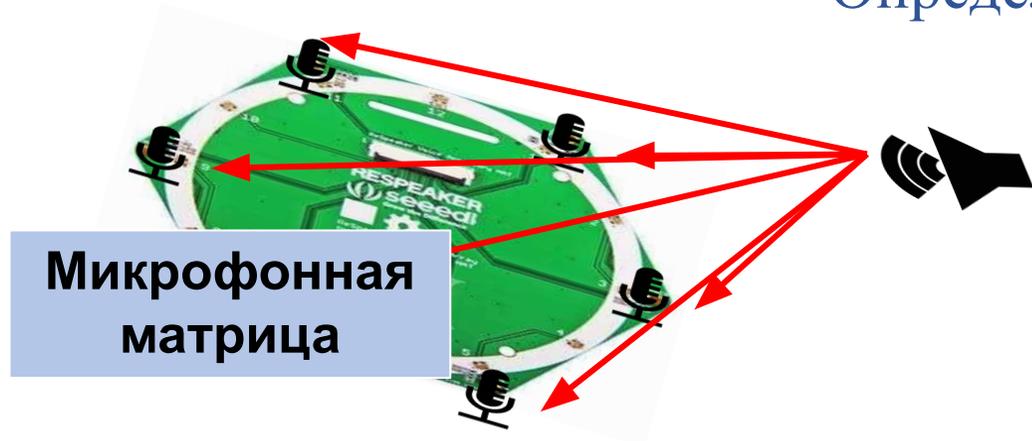
Превед - 0.1  
Прифет - 0.1  
Привет - 0.8

- Словарь
- Лингвистическая модель

# Синтез речи



# Определение направления звука

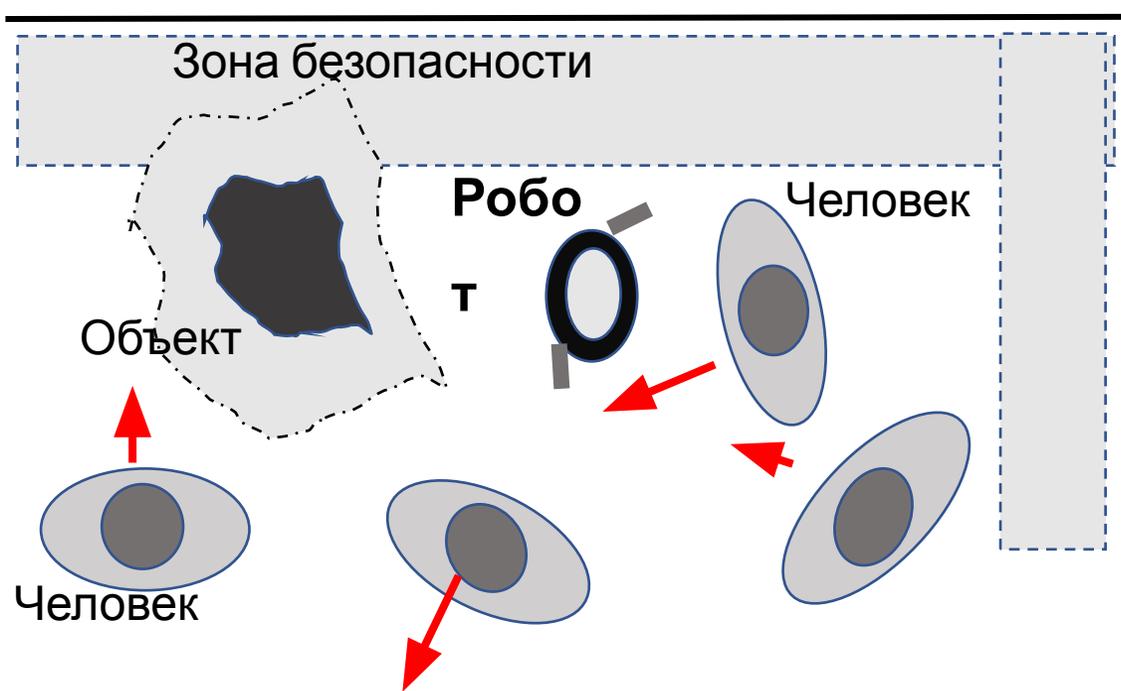


- Фильтрация шумов
- Определение нескольких источников
- Определение направления на собеседника

# Безопасность человека – основа робототехники

## Коллаборативные роботы - коботы

При проектировании автономных роботов необходимо руководствоваться указаниями международного стандарта **ISO/TS 15066 “Robot and Robotic Devices – Collaborative robots”**, предусматривающего меры по обеспечению безопасности людей при их взаимодействии с роботами.

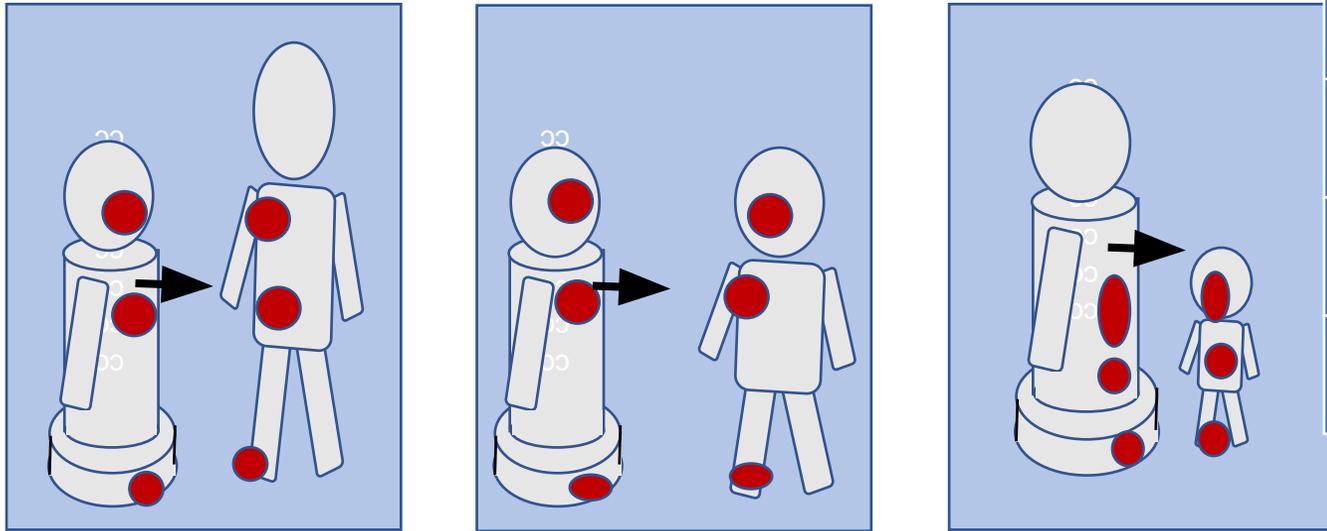


Факторы, влияющие на безопасность человека:

- допустимые усилия (силы, давление), возникающие при квази – статических контактах;
- допустимые усилия, возникающие при динамических контактах (transient contact);
- допустимая передача энергии от робота человеку.

# Контакт человек - робот

## Варианты столкновений человека и робота



Пятна на роботе, закрашенные красным цветом, показывают области возможных контактов.

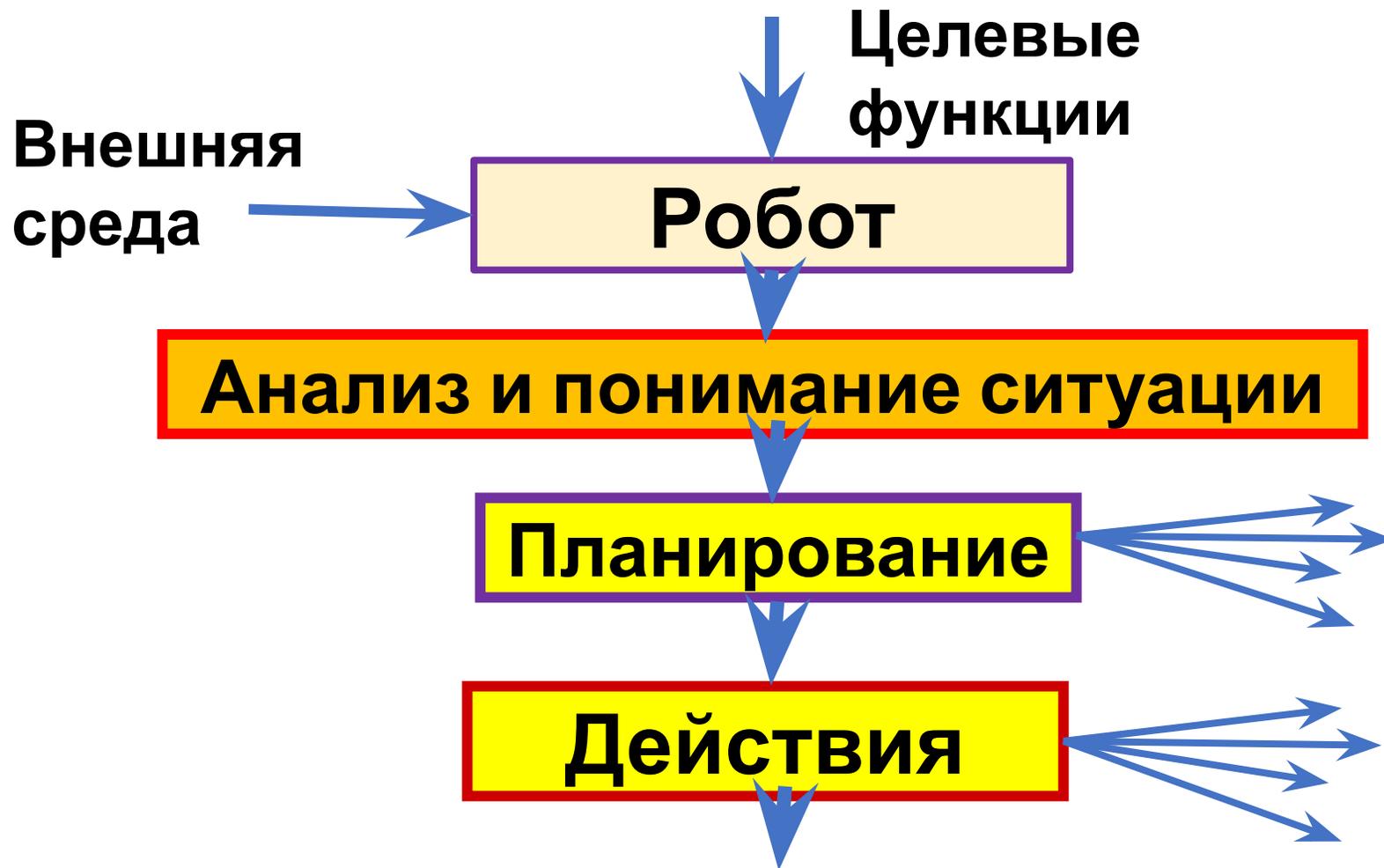
Область контакта	$m_H$ кг	$K$ н/мм	$E_{max}$ j
Лицо	4,4	75	0,11
Плечо	40	35	2,5
Живот	40	10	2,4
Нога	75	60	0,52

$m$  – масса отдельных частей тела взрослого человека,

$K$  – коэффициенты жесткости (аналог жесткости пружины),

$E$  – максимально допустимая передаваемая энергия.

# Основная проблема – понимание ситуации



# **Проблемы, которые предстоит решить в работах**

- 1. «Понимание ситуаций»**
- 2. Разработка ЭТИКИ**
- 3. Разработка ИНСТИНКТОВ и РЕФЛЕКСОВ**
- 4. Общение с человеком**
- 5. Общение робот – робот**
- 6. Совершенствование органов чувств**
- 7. Энергетика роботов, материалы, бортовое оборудование**

# 1, 2 Лк. Проектирование технических систем (ТС)

## **Формирование технического облика системы**

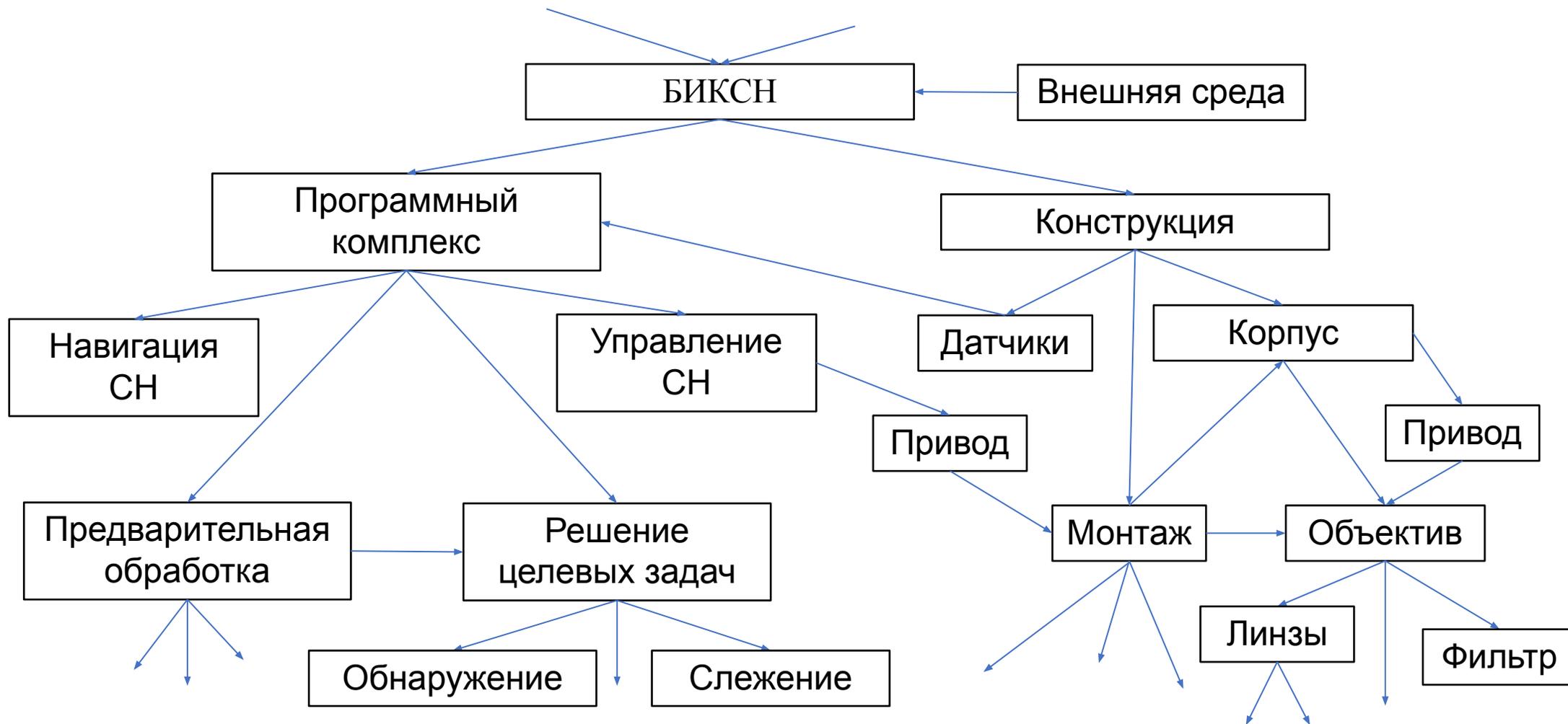
Технический облик системы – модель системы, в которой представлены перечень задач системы, ее структура и основные проектные параметры, основные характеристики функциональных подсистем.

В структуре системы учитываются только основные элементы, критичные при определении соответствия системы поставленным целям и при оценке эффективности системы.

Задача выбора оптимального облика системы решается при декомпозиции ее на две задачи: структурную и параметрическую оптимизации (синтез и анализ системы).

При создании моделей сложных систем строятся две взаимосвязанные модели: структурно-параметрическую модель системы и модель функционирования системы.

# Вариант облика БИКСН



## Формирование структуры системы

- Структурно-параметрическая модель системы должна выявить разбиение системы на подсистемы, расположение подсистем, их параметры и связь между ними. Такая модель необходима для выбора структуры системы. Структурно - параметрическое описание системы может помочь созданию модели функционирования системы - создаются модели функционирования подсистем, которые затем объединяются в общую систему.
- В процессе структурного проектирования (при формировании концепции) создается единая укрупненная модель всей системы, целью которой является приближенная сравнительная оценка эффективности альтернативных вариантов концепций (структуры и состава основных компонентов) для выбора наилучшей (нескольких). При этом игнорируется детальная структура системы и анализируется только общее поведение системы как единого целого, оцениваются ее интегративные характеристики и взаимодействие ее с внешней средой.
- Структура формируется на основании сравнительного анализа альтернативных вариантов системы, обеспечивающих решение проблемы с учетом внешней среды и неопределенностей будущего функционирования.
- При анализе эффективности системы решаются прямая и обратная задачи. Прямая задача - эффективность системы оценивается для выбранных ее концепции и облика, обратная задача - оценка эффективности направлена на формирование облика системы, обеспечивающего решение поставленных задач с максимальной эффективностью.

# Системный подход в проектировании ТС

## Основные принципы системного подхода

- **Целостность**, позволяющая рассматривать одновременно систему как единое целое и в то же время как подсистему для вышестоящих уровней.
- **Иерархичность строения**, то есть наличие множества (по крайней мере, двух) элементов, расположенных на основе подчинения элементов низшего уровня элементам высшего уровня. Реализация этого принципа хорошо видна на примере любой конкретной организации. Как известно, любая организация представляет собой взаимодействие двух подсистем: управляющей и управляемой. Одна подчиняется другой.
- **Структуризация**, позволяющая анализировать элементы системы и их взаимосвязи в рамках конкретной организационной структуры. Как правило, процесс функционирования системы обусловлен не столько свойствами её отдельных элементов, сколько свойствами самой структуры.
- **Множественность**, позволяющая использовать множество кибернетических, экономических и математических моделей для описания отдельных элементов и системы в целом.
- **Системность**, свойство объекта обладать всеми признаками системы.

## Этапы проектирования ТС

- **Техническое задание (ТЗ)** является основанием для проектирования И. В нем определяются: назначение, состав И (перечисляются разрабатываемые элементы, устройства и т.д.), состав конструкторской документации (КД), документация программного обеспечения. На основе общего ТЗ разрабатываются ТЗ на конкретные устройства с уточнением технических требований (ТТ). В качестве общих ТТ указываются: условия эксплуатации, хранения, транспортировки и пр.. К частным ТТ относятся основные структурные и др. ТТ, количественные значения параметров, порядок испытаний, требования по элементной базе, материалам и пр., требования по эргономике, технической эстетике и др. требования, удовлетворяющие потребности Заказчика.
- **Техническое предложение (ПТ)**. ПТ – совокупность КД, содержащих технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки И на основании анализа ТЗ и вариантов возможных решений. На этом этапе проверяется патентная чистота вариантов решений, их конкурентоспособность, выбирается оптимальный вариант, уточняются ТТ.
- **Эскизный проект (ЭП)**. ЭП – совокупность КД, содержащих принципиальные конструкторские решения, общие представления об устройстве и принципе работы, данные по назначению и основным параметрам И. На этапе ЭП проверяются принципиальные, схемные и др. решения, разрабатываются и обосновываются ТР по обеспечению ТТ, установленных в ТЗ и ПТ, изготавливаются и испытываются макеты И, решаются предварительные вопросы упаковки, транспортировки И, техники безопасности, производственной санитарии.
- **Технический проект (ТП)**. ТП вводится для выявления окончательных конструкторских решений, когда это целесообразно сделать до разработки рабочей КД. При разработке ТП выполняются необходимые расчеты, в т.ч., подтверждающие заданные технико-экономические показатели, проводится анализ конструкции И на технологичность в условиях конкретного производства, оформляются заявки на оборудование, материалы и комплектующие, разрабатываются основные сборочные и детализовочные чертежи. Согласованный и утвержденный комплект КД служит основанием для разработки рабочей КД.
- **Рабочий проект (РП)**. На этом этапе происходит создание и отработка полного комплекта КД, необходимого для выпуска опытного образца (опытной партии), установочной серии (УС), запуска серийного или массового производства (СМП). В процессе выполнения РП проводятся соответствующие приемочные и др. испытания И.

- По окончании работ на этапах ПТ, ЭП и ТП составляются **пояснительные записки** (ПЗ), включающие в себя следующие основные разделы:
  - Введение;
  - Назначение и область применения;
  - Техническая характеристика;
  - Описание и обоснование выбранной конструкции;
  - Расчеты;
  - Описание организации работ;
  - Ожидаемые технико-экономические показатели;
  - Уровень стандартизации и унификации;
  - Приложение к ПЗ.

## Уровни сложности решаемых задач

- В задачах 1-го уровня сложности синтеза ТС структура ТС определена (задана, очевидна). В этом случае проводится параметрическая оптимизация ТС.
- В задачах 2-го уровня сложности используется конечный набор вариантов структур ТС. При этом выбор наилучшей структуры может производиться на основе метода полного перебора.
- Синтез ТС 3-го уровня отличается большим количеством возможных вариантов, при котором их полный перебор затруднен. Непосредственный поиск альтернативных вариантов для задач 3-го уровня сложности в ряде случаев целесообразно проводить с помощью так называемых алгоритмических методов поиска, например, методом морфологических (многомерных) таблиц.
- К 4-му уровню сложности относятся задачи, требующие выбора из бесконечного множества вариантов. Варианты в задачах 4-го уровня сложности находятся на основе использования алгоритмических и/или эвристических методов.
- Задачи 1-го и 2-го уровней сложности решаются с использованием традиционно используемых методов расчета.
- При решении задач 3-го и 4-го уровней сложности на первом этапе необходимо сформировать набор возможных вариантов ТР. Для этого можно использовать методы поискового конструирования.

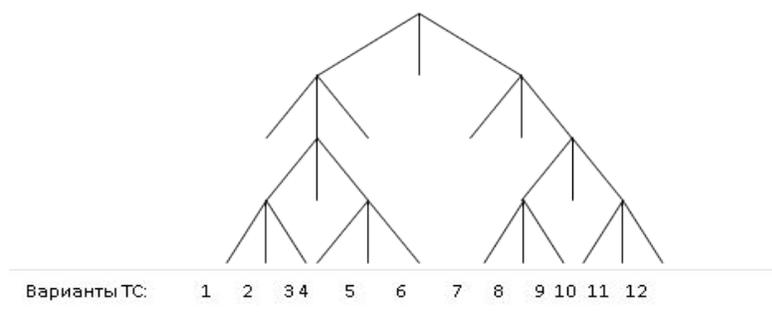
# Метод ветвей и границ

При реализации метода ветвей и границ на 1-м этапе в качестве эталонной выбирается одна полная цепь и для нее вычисляется ПК –  $Wэ$ . Далее, на 2-м этапе вычисляются оптимистические (максимально возможные) значения ПК для всех вершин 2-го уровня. Вершины и все, выходящие из нее цепи, с ПК хуже, чем  $Wэ$ , отбрасываются как бесперспективные. Аналогичные вычисления проводятся для оставшихся вариантов на более низких уровнях.

Если для какого-либо варианта пессимистическая (минимально возможная, наихудшая) оценка ПК оказалась лучше  $Wэ$ , то используемый эталон необходимо заменить на новый, взятый из рассматриваемой вершины.

Применение данного метода возможно, если удастся получить надежный алгоритм вычисления оптимистических и пессимистических оценок ПК, в противном случае существует опасность получения неоптимального решения или перехода к полному перебору вариантов.

Вершины, расположенные на различных уровнях, соответствуют проектным решениям различного уровня. Так, например, вершины на низшем уровне могут соответствовать окончательно проработанным конструкциям ТС, а на 2-м уровне – могут рассматриваться варианты в виде функциональных схем.



# Критерии, показатели качества

**Критерий ( $W_{\Sigma}$ )** – признак, основание, правило принятия решения по оценке чего-либо на соответствие предъявленным требованиям.

**Показатель качества (продукции) ( $W_i$ )** — это количественная оценка одного или нескольких свойств продукции, входящих в её качество.

Показатели *назначения* (функциональные требования). Характеризуют способность продукции эффективно выполнять свою функцию. Их можно разделить на следующие группы:

- *требования производительности*. Включают показатели необходимой мощности, грузоподъемности, развиваемой скорости и другие, которые характеризуют выполняемую функцию;
- *требования эффективности*. Характеризуют степень эффективности использования изделия по назначению, например, показатели энергетические (КПД, потери), кинематические (точность перемещения), силовые (стабильность нагрузки) и т. п.;
- *конструктивные требования*. Характеризуют достоинства выбранной конструкции.

*Например, функциональные ПК: ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, ТОЧНОСТЬ.*

**Пример общего критерия с ограничениями:**

$$W_{o\Sigma} = \max \text{ (или } \min) W_{\Sigma} (W_i) \text{ при } W_j < W_{jз} \text{ (ограничения)}$$

# Скалярные критерии

## Аддитивный критерий

Скалярные критерии - это критерии, которые позволяют сравнивать варианты в одной или нескольких измерениях. При этом критерии могут быть аддитивными, то есть суммируемыми, или неаддитивными, то есть не суммируемыми.

### Аддитивный критерий

$$\sum_{j=1}^n W_j a_{ij} = W_i$$

$a_{ij}$  - вес части критерия

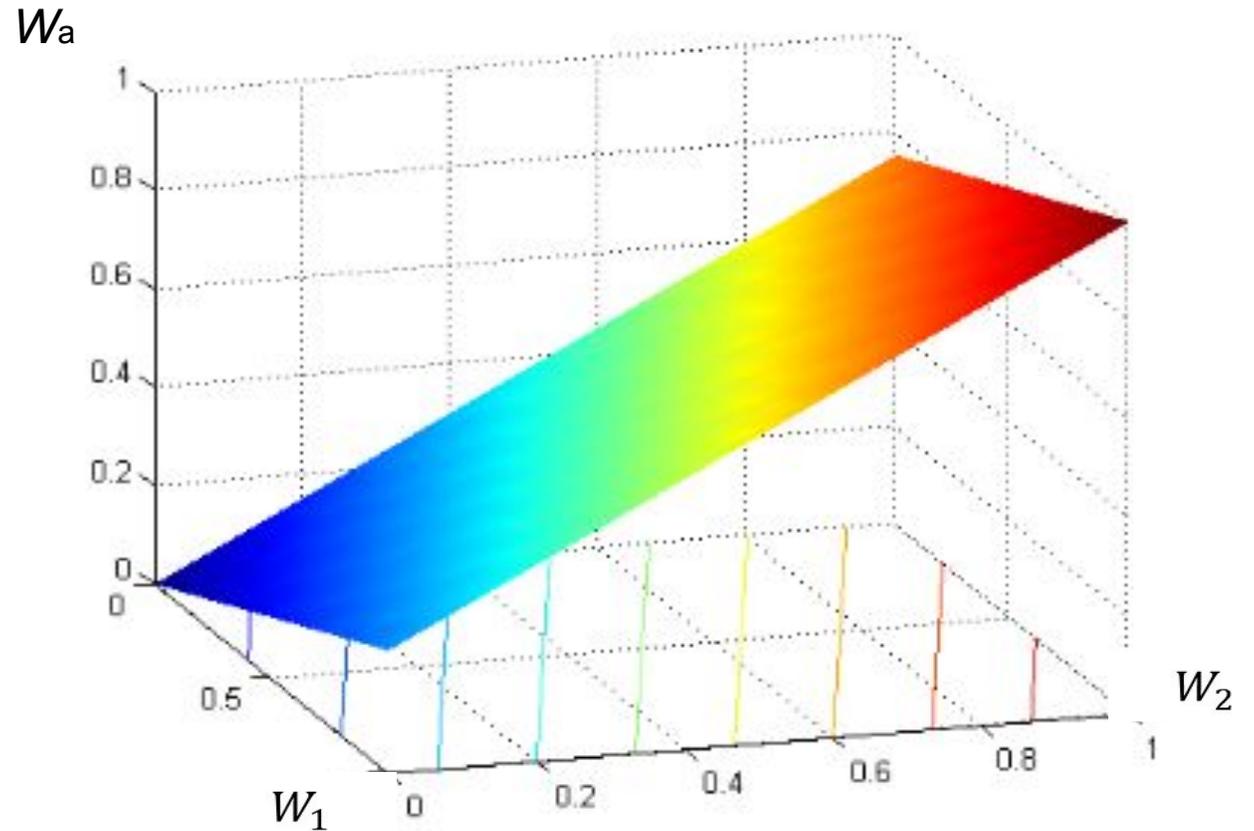
$W_j$  - значение части критерия

**Преимущества:** возможность

различия в важности критериев

**Недостатки:** субъективность

взвешивания критериев



Если повышение качества соответствует увеличению значения ПК, то критерий максимизируется.

# Скалярные критерии

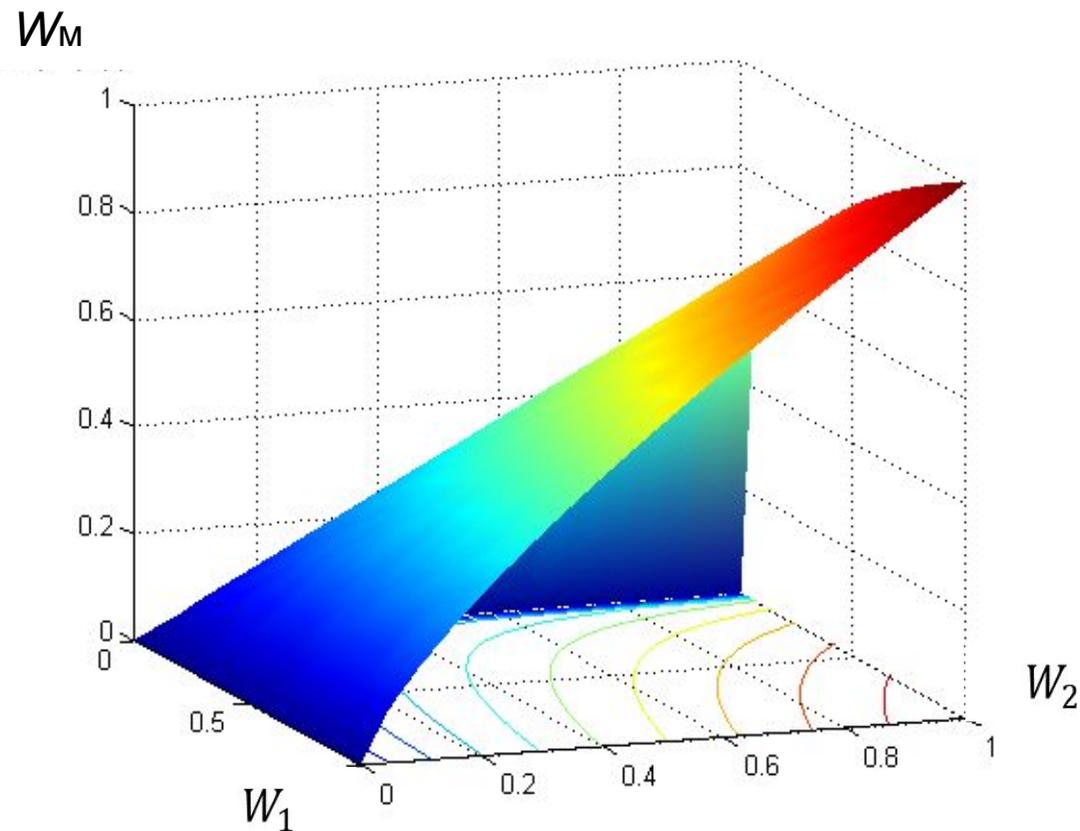
## Мультипликативный критерий

$$W_M = \prod_i W_i / \prod_j W_j \rightarrow \max$$

$W_i$  – значение частного критерия,  
 $i$  – индекс ПК, значения которых пропорциональны эффективности (надежности, точности и пр.),  
 $j$  – индекс ПК, значения которых обратно пропорциональны эффективности (надежности, точности и пр.),

**Преимущества:** используется без назначения весовых коэффициентов.

**Недостатки:** ограниченная область применения.



# Скалярные критерии

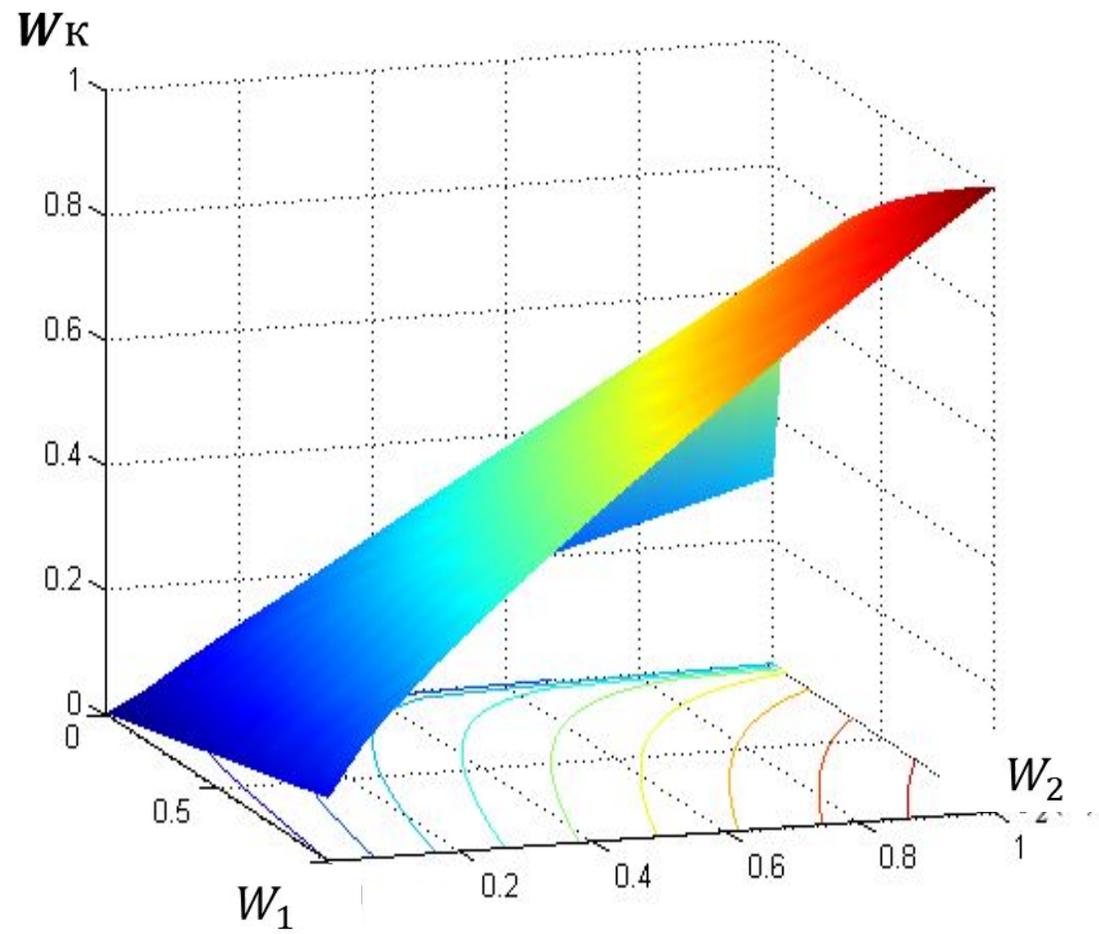
## Аддитивно - мультипликативный критерий

$$W_K = \sum_i a_i W_i + (1-\beta) \prod_i W_i$$

$a_i$  – вес частного критерия,

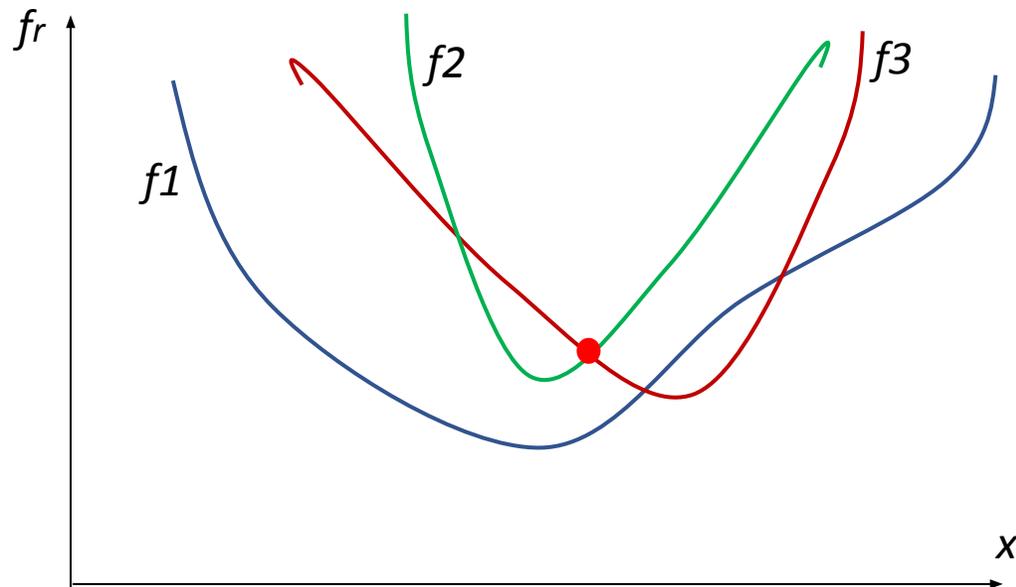
$W_i$  – значение частного критерия,

$\beta$  - адаптационный параметр.



# Векторные критерии

Использование векторных критериев позволяет выбрать веса критериев без участия оператора. Векторные критерии основаны на анализе данных полученных после проведения расчетов поиска оптимального пути с применением различных весов частных критериев. Это значит, что при использовании векторных критериев будут затрачены большие вычислительные ресурсы относительно вычисления оптимального пути на основе весов, заданных оператором.



## Методы расчета

1. Метод ограничений. Выбор одного ПК, остальные – в ограничения
2. Метод последовательных уступок. Оптимизация 1-го ПК – уступка (назначается), оптимизация 2-го – уступка, ... (возможно ранжирование)
3. Метод назначения допусков (областей допустимых решений)
4. Метод Парето

# Метод ограничений

По методу изменения ограничений одну из целевых функций оставляют в качестве целевой, а остальные превращают в ограничения. То есть, пусть  $f_r$  будет целевой, а остальные  $f_1 \dots f_{r-1}$  представим как ограничение неравенства:

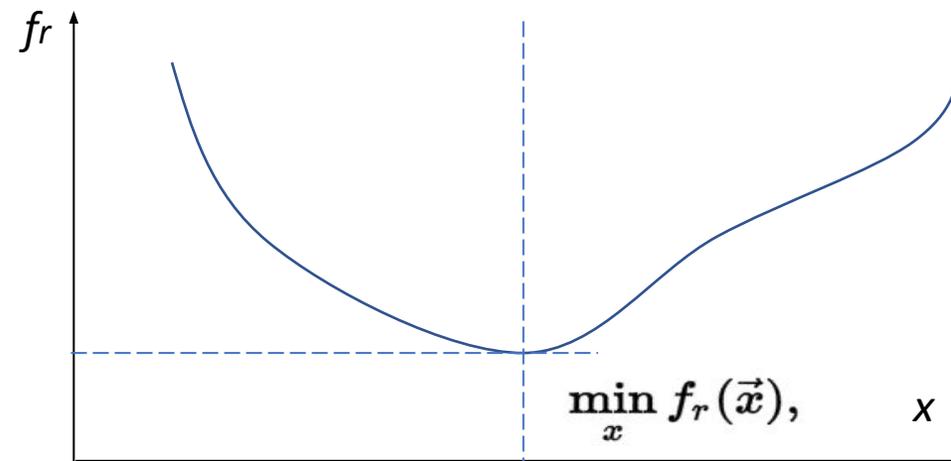
$$\min_x f_r(\vec{x}),$$

при условии:

$$f_i(\vec{x}) \leq \varepsilon_i, i = 1, \dots, r-1,$$

где  $\varepsilon_i$  – допустимые значения для  $f_1 \dots f_{r-1}$ .

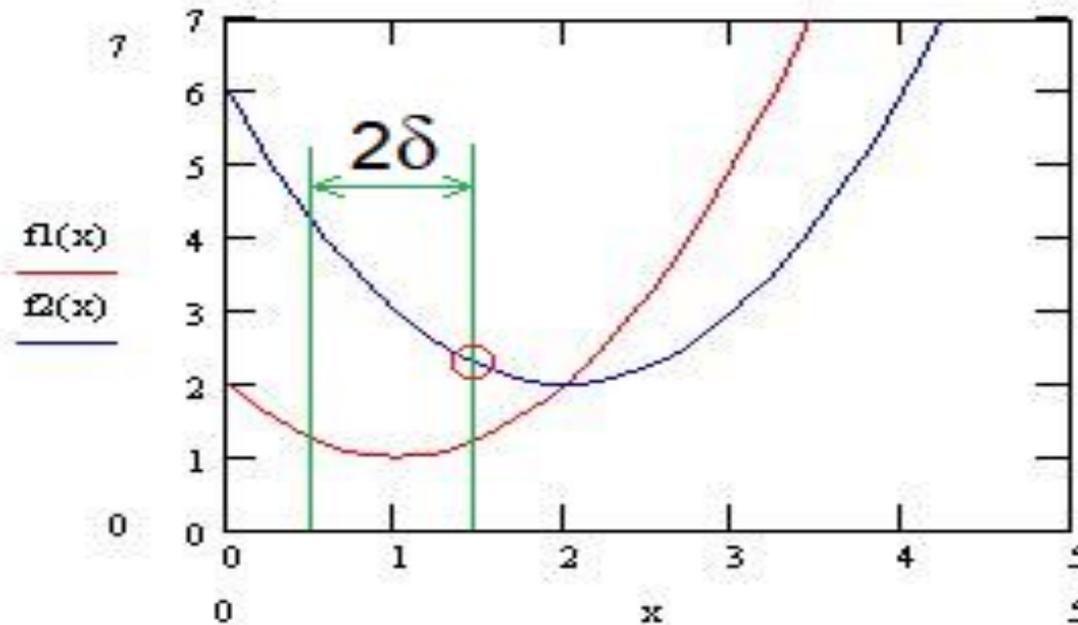
Для использования данного критерия необходимо выбрать частный критерий, который будет основным, что может не подходить по условиям поставленной задачи.



# Метод последовательных уступок

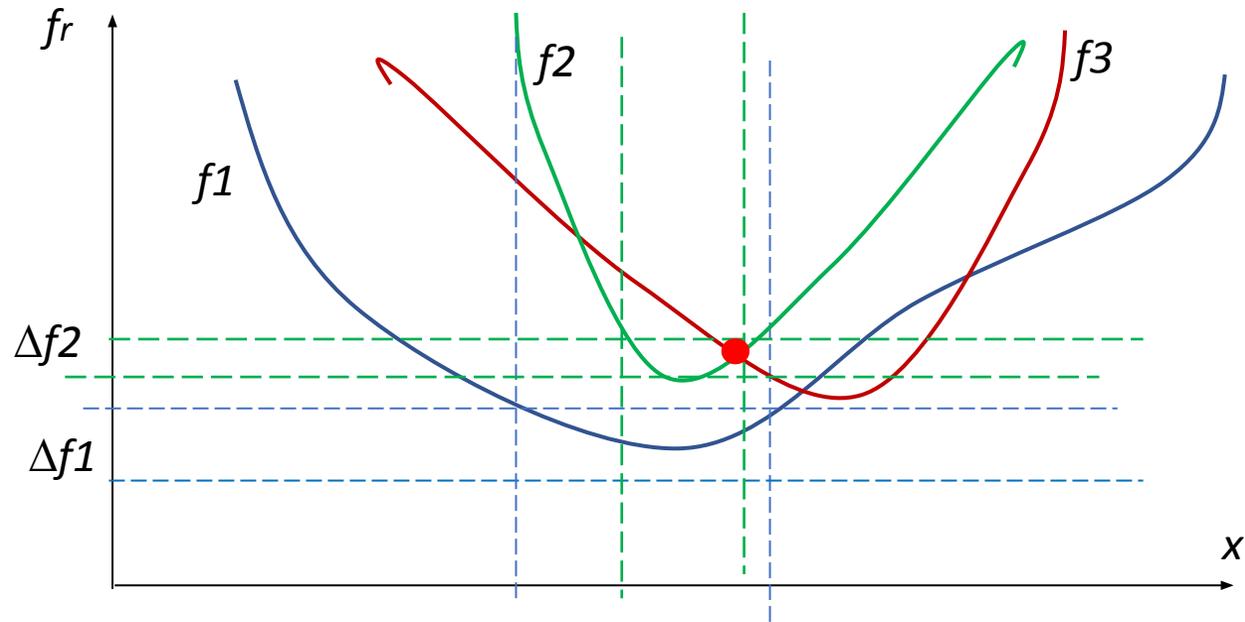
Данный метод применяется в случае, когда частные критерии могут быть упорядочены в порядке убывающей важности, все критерии должны быть максимизированы и пронумерованы в порядке убывания их важности. Алгоритм:

- 1) Вначале определяется максимальное значение первого по важности критерия  $Z_1$
- 2) Назначается, исходя из практических соображений и принятой точности, величина допустимого отклонения  $\delta_1 > 0$  и отыскивается максимальное значение второго критерия  $Z_2$ , при условии, что значение первого должно отклоняться от максимального не более чем на величину допустимой уступки
- 3) Снова назначается величина уступки  $\delta_2 > 0$  и отыскивается максимальное значение третьего критерия  $Z_3$
- 4) ...



# Метод назначения допусков (областей допустимых решений)

- 1) Вначале определяется область допуска для первого по важности критерия ;  $\Delta f_1$
- 2) Соответствующая область  $\Delta x_1$  проецируется на следующий критерий и в ней выделяется допуск  $\Delta f_2$ ;
- 3) Если используется 3 критерия, то в области  $\Delta x_2$  находится минимальное значение  $f_3$



# Оптимизация по Парето

Оптимальность по Парето — такое состояние некоторой системы, при котором значение каждого частного показателя, характеризующего систему, не может быть улучшено без ухудшения других.

Рассмотрим алгоритм поиска оптимального решения по Парето:

Пусть имеется  $n$  критериев, найдем некоторое решение задачи. Обозначим его через  $x$  и предположим, что существует другое решение  $x_2$ , такое, что для всех критериев  $f_i(x_2)$  имеют место неравенства

$$f(x_2) > f(x) \quad (i = 1, n),$$

причем хотя бы одно неравенство строгое.

В этом случае решение  $x_2$  приоритетнее, чем  $x$ . Поэтому все  $x$ , которые удовлетворяют указанному неравенству, надо отбросить и в дальнейшем следует анализировать только те  $x_2$ , для которых не существует  $x$ , чтобы выполнялось указанное неравенство.

Множеством Парето при  $n$  критериях  $f_i(x)$  на максимум называется множество таких  $x$ , для которых не существует такого  $x_2$ , чтобы выполнялось неравенство

$$f(x_2) > f(x),$$

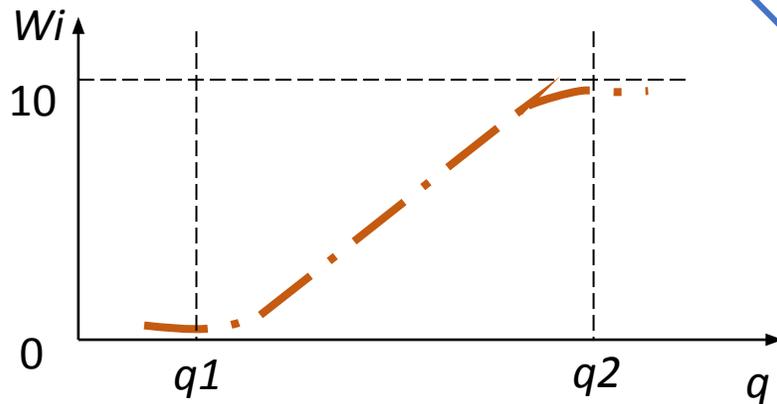
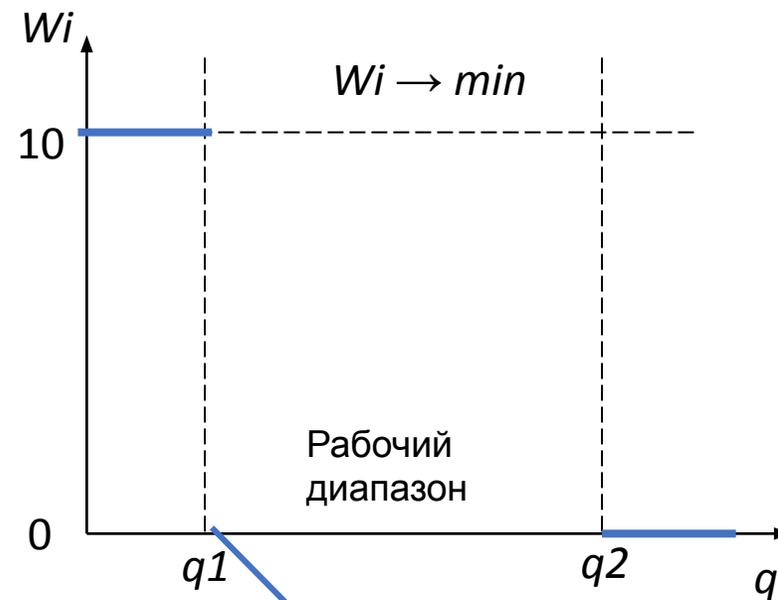
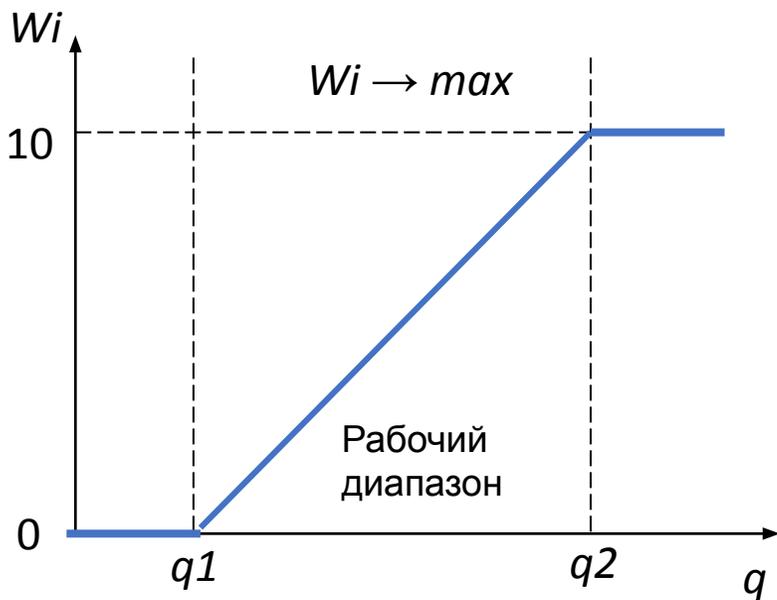
причем хотя бы одно неравенство строгое.

*Оптимум по Парето* подразумевает, что суммарное благосостояние общества достигает максимума, а распределение благ и ресурсов становится оптимальным, если любое изменение этого распределения ухудшает благосостояние хотя бы одного субъекта экономической системы.

*Парето-оптимальное состояние рынка* — ситуация, когда нельзя улучшить положение любого участника экономического процесса, одновременно не снижая благосостояния как минимум одного из остальных.

Согласно критерию Парето (критерию роста общественного благосостояния), движение в сторону оптимума возможно лишь при таком распределении ресурсов, которое увеличивает благосостояние по крайней мере одного человека, не нанося ущерба никому другому.

# Оценка частных показателей качества $W_i$



## 3, 4 Лк. Производительность. Надежность

### Производительность, быстроедействие систем

$W_{\text{пр}} = V_{\text{н}} * B_{\text{м}}$  км<sup>2</sup>/ч - производительность систем мониторинга

$V_{\text{н}}$  – скорость носителя,  $B_{\text{м}}$  – ширина обследуемой полосы мониторинга

$W_{\text{пр}} = V_{\text{н}} * B_{\text{у}}$  км<sup>2</sup>/ч - производительность систем уборки, например, робот-пылесос

$V_{\text{н}}$  – скорость носителя,  $B_{\text{у}}$  – ширина убираемой полосы

$W_{\text{пр}} = V_{\text{н}} * B_{\text{т}}$  ткм/ч - производительность систем транспорта, например, автомобиля, трубопровода

$V_{\text{н}}$  – скорость носителя,  $B_{\text{т}}$  – вес транспортируемого груза

$W_{\text{пр}} = N$  выстр/с - производительность стрельбы (скорострельность)

$W_{\text{пр}} = N$  дет/смена - производительность станка

# Критерий производительности

$$W_{\theta\Sigma} = \max (\text{или } \min) W_{\Sigma} (W_i) \quad \text{при } W_j < W_{j3} (\text{ограничения})$$

$$W_{np} \rightarrow \mathbf{max}, \text{ при } W_j < W_{j3}$$

*Например 1*, максимизация производительности систем уборки робота-пылесоса

$$W_{np} = V_n * B_y \rightarrow \mathbf{max}, \quad \text{при чистоте уборки не менее 8 баллов,}$$

где  $V_n$  – скорость носителя,  $B_y$  – ширина убираемой полосы

*Например 2*, максимизация скорострельности

$$W_{np} = N \rightarrow \mathbf{max}, \quad \text{при точности стрельбы не хуже } \pm 3\sigma \geq 2\text{м на расстоянии не менее } 1500\text{ м}$$

# ПК. Надежность ТС

**Надежностью** называется свойство объекта (изделия) выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в требуемых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

К основным понятиям надежности относятся **работоспособность и отказ**.

**Работоспособность** состояние объекта, при котором он способен выполнять требуемые функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных документацией.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, называется отказом. Отказы классифицируются:

- по объему: полный, частичный, катастрофический, постепенный частичный;
- по характеру изменений: постепенный, внезапный, перемежающийся;
- по нагрузке: зависимый, независимый;
- по времени появления: приработочный, случайный, в результате старения, систематический;
- по причине возникновения: конструкционный, производственный, эксплуатационный.

Постепенные отказы, характеризуются постепенным изменением погрешности выходного сигнала. Основными причинами постепенных отказов являются износ и старение элементов ТС.

Под внезапными отказами понимаются отказы, сопровождаемые скачкообразным изменением погрешности выходного сигнала на величину, превышающую допустимую. Причинами подобных отказов могут быть механические поломки деталей, заклинивание, обрывы или короткие замыкания электрических цепей, отключение источников питания и пр.

# Основные свойства объектов

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки

**Ремонтопригодность** – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению возможных причин возникновения отказа, повреждения и устранение последствий возникшего отказа или повреждения путем ремонта или технического обслуживания.

**Сохраняемость** – свойство непрерывно находится в исправном состоянии при хранении или транспортировании.

**Прочность** (вибропрочность, ударная прочность и пр.) – И (изделие) сохраняет работоспособность после воздействия.

**Устойчивость** (виброустойчивость, ударная устойчивость и пр.) – И сохраняет работоспособность во время воздействия.

# Показатели надежности

Основными показателями надежности являются:

$P(t)$  – вероятность безотказной работы за время  $t$ ;

$Q(T)$  – вероятность отказов;

$\lambda(t)$  – интенсивность отказов;

$f(t)$  – плотность распределения наработки на отказ;

$T$  – средняя наработка на отказ (математическое ожидание наработки объекта до первого отказа).

Влияние условий эксплуатации учитывается поправочным коэффициентом (увеличивающим фактическое значение интенсивности отказов), который в лабораторных условиях принимается приблизительно равным – 1, в стационарных надежных условиях – 10, на автомобильном транспорте – 25, на летательных аппаратах – 120...1000.

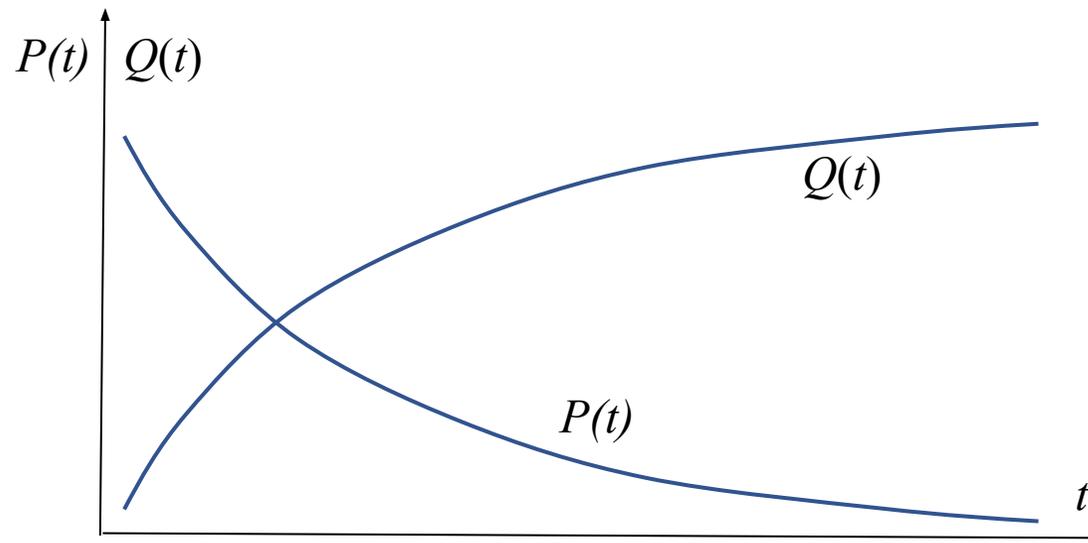
**$P(t)$**  – вероятность безотказной работы за время  $t$ .

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0},$$

где  $N_0$  – общее число образцов,  $N(t)$  – число исправно работающих образцов в момент времени  $t$ ,

$n(t)$  – число отказавших образцов в момент времени  $t$ .

**$Q(t) = 1 - P(t)$**  – вероятность отказа.



$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$  – **интенсивность отказов**, где  $f(t)$  – плотность распределения времени безотказной работы.

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t,t+\Delta t)}{N_{cp}\Delta t}, \quad f^*(t) = \frac{n(t,t+\Delta t)}{N_0\Delta t},$$

где  $n(t, t + \Delta t)$  – число образцов, отказавших за промежуток времени  $[t, t + \Delta t]$ ,  $N_{cp}$  – среднее число исправно работающих образцов на интервале времени  $[t, t + \Delta t]$ .

Кривая интенсивности отказов многих конструктивных элементов и систем имеет горизонтальный (рабочий) участок, на котором эта интенсивность постоянна. Поэтому в ряде практических случаев принимается, что на рабочем участке  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ .



**Средняя наработка на отказ** (среднее время наработки на отказ)  $T = 1/\lambda$ .

$$T^* = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i.$$

Перечисленные важнейшие свойства надежности характеризуют определенные технические состояния объекта.

Различают пять основных видов технического состояния объектов.

**Исправное состояние** – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и проектной документации.

**Неисправное состояние** – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и проектной документации.

**Работоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и проектной документации.

**Неработоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативно-технической и проектной документации.

**Предельное состояние** – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

При расчете надежности приборов используются заранее известные значения интенсивностей отказов для отдельных элементов и соединений. В качестве примера ниже приведены некоторые значения максимальных, средних и минимальных значений интенсивности отказов для электрических, электромагнитных и механических элементов и соединений [1/млн.ч] (1 млн.ч. – более 100 лет):

Выключатель	0,4	0,14	0,04
Выпрямитель	0,8	0,6	0,3
Диод	1,4	0,2	0,1
Изоляция	0,08	0,05	0,03
Кабель	0,17	0,02	0,002
Катушка индуктивности	0,09	0,05	0,04
Катушка обмоток двигателя	.05	.03	0.01
Конденсатор		1,6	
Контакт	0,4	0,25	0,1
Потенциометр	2,5	3,0	0,7
Реле электромагнитное	0,5	0,2	0,1
Сервомеханизм	3,4	2,0	1,1
Трансформатор	0,55	0,3	0,25
Триод		0,4	
Штепсельный разъем	0,7	0,17	0,1
Электродвигатель	7,5	0,62	0,15
Амортизатор	3,2	1,0	0,3
Муфта электромагнитная	0,9	0,6	0,45
Передача зубчатая	0,2	0,12	0,01
Подшипник качен./скольж.	1,0/0,4	0,5/0,2	0,02/0,08
Пружина	0,22	0,11	0,004
Соединение гибкое/жесткое	1,3/0,05	0,7/0,02	0,03/0,001
Соединение механ./шарнир.	2,0/4,0	0,02/2,4	0,01/0,8
Уплотнение вращающ./скольз.	1,1/0,9	0,7/0,3	0,2/0,1

# Надежность системы

## Для последовательного соединения

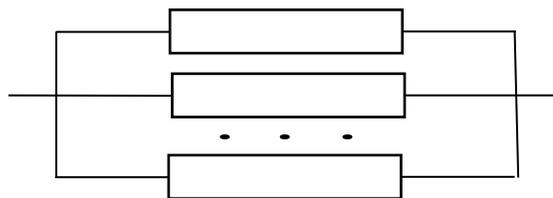


Вероятность безотказной работы  $P = \prod_{i=1}^N P_i$ .

Пример:  $P_1 = 0,8$ ;  $P_2 = 0,9$ ;  $P_3 = 0,85$ ;  $P_4 = 0,95$ .

$$P = 0,5814$$

## Для параллельного соединения



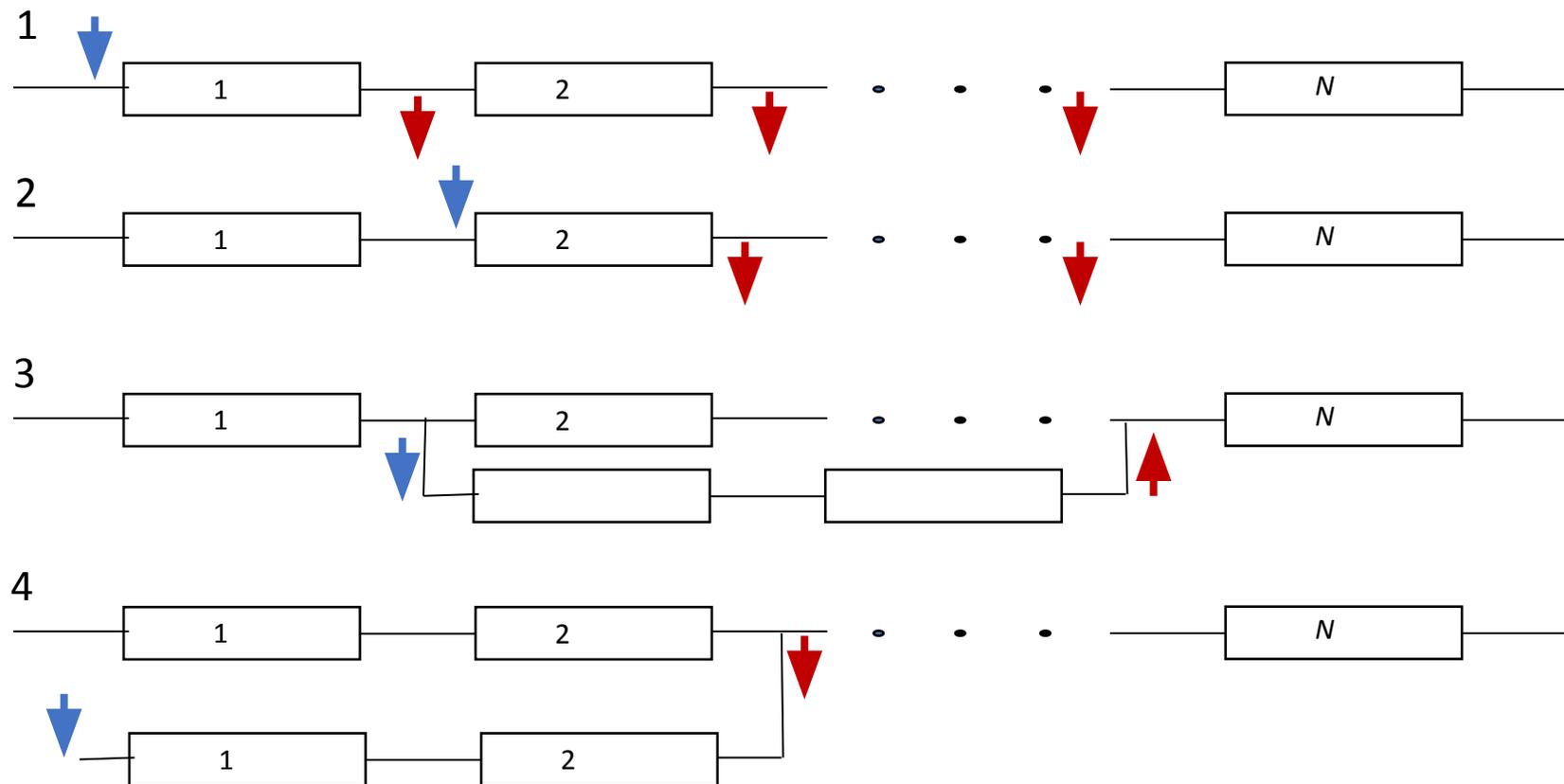
Вероятность безотказной работы  $P = 1 - \prod_{i=1}^N Q_i$ .

Пример:  $P_1 = 0,8$ ;  $P_2 = 0,9$ ;  $P_3 = 0,85$ ;  $P_4 = 0,95$ .

$Q_1 = 0,2$ ;  $Q_2 = 0,1$ ;  $Q_3 = 0,15$ ;  $Q_4 = 0,05$ .

$$P = 0,99985$$

# Поиск неисправностей



При большом количестве элементов поиск неисправностей (диагностика), в частности, случайных отказов, становится дорогостоящим и трудоемким.

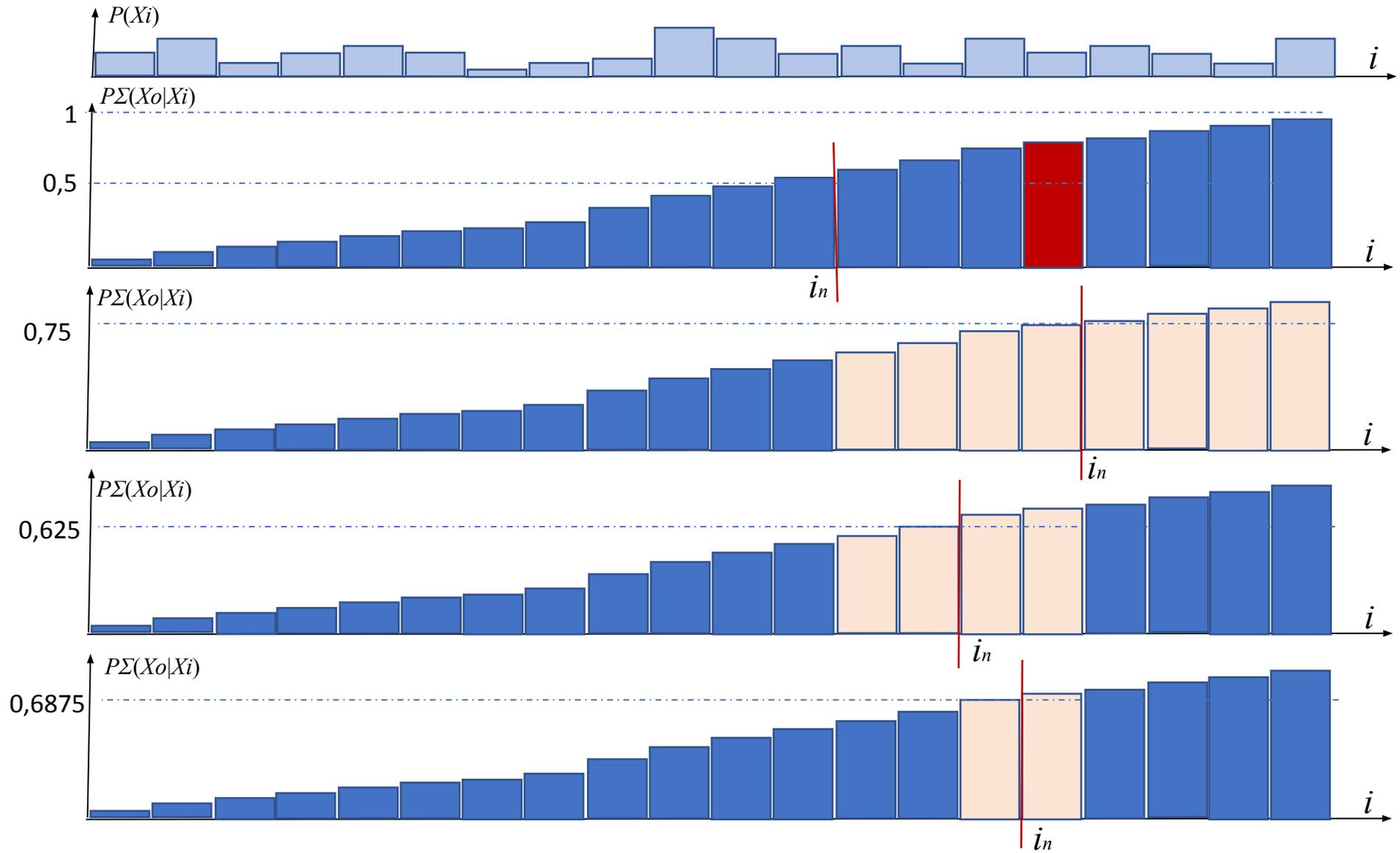
# Поиск неисправностей

Пусть известны априорные вероятности отказов всех элементов (подсистем)  $P(X_i)$  и можно рассчитать вероятности  $P(X_o|X_i)$ , где  $X_i$  – отказ  $i$ -го элемента,  $X_o$  – отказ всей системы.

**Оптимальный маршрут поиска неисправностей (метод дихотомии)** при отказе системы строится по следующему алгоритму:

1. Построение интегрального закона  $P_{\Sigma}(X_o|X_i)$  при  $i = 1, 2, \dots, N$ ;
2. Деление  $P_{\Sigma}(X_o|X_i)$  пополам (на 1-м шаге выбирается точка  $(i_n)$  на  $P_{\Sigma}(X_o|X_i) = 0,5$ );
3. В точке  $(i_n)$  определяются работоспособная и неработоспособная области;
4. Неработоспособная область  $P_{\Sigma}(X_o|X_i)$  делится пополам (выбирается очередная точка  $(i_n)$ );
5. Пункты 3, 4 повторяются до выявления отказавшего элемента.

# Маршрут поиска неисправностей



# Методы повышения надежности

Выделяют три группы методов:

1. **Конструктивно-технологические методы**, включающие мероприятия, учитывающие условия работы ТС.

Например, защита от воздействия влаги, пыли, песка, пониженного давления, ослабления тепловых режимов (теплоотводом, охлаждением) и т.д.. Конструктивное улучшение условий работы наименее надежных элементов: ослабление механических напряжений в наиболее нагруженных элементах конструкции, исключение трущихся деталей, разгрузка мест пайки и пр..

2. **Методы технической диагностики** основаны на применении различных систем контроля функционирования ТС, позволяющих диагностировать отказы ТС: через определенные интервалы времени (регламентный контроль); перед началом эксплуатации, перед полетом ЛА (предстартовый или предполетный контроль); в процессе эксплуатации, полета ЛА (встроенный контроль).

Важным направлением среди методов технической диагностики является разработка и внедрение автоматических средств встроенного контроля (в том числе дистанционных, например, акустических, вибрационных и пр.), которые помогают не только выявлять отказы ТС, но также определять и ликвидировать возможные причины появления отказов, существенно повышая надежность ТС.

# Методы повышения надежности

## 3. Структурные методы делятся на две подгруппы:

Методы, основанные на оптимизации структуры ТС без применения функциональной избыточности. Например, использование отрицательных обратных связей в системах для повышения стабильности их работы.

Методы, основанные на введении функциональной избыточности (резервирование, комплексирование и др.).

Например, для обеспечения заданной надежности ТС может включать один основной элемент и  $(m-1)$  параллельно включенных резервных элементов. При этом если резервные элементы постоянно выполняют заданные функции, то говорят о нагруженном (горячем) резервировании, а если основной элемент заменяется резервным только при наличии отказа, то имеет место ненагруженный (холодный) резерв.

- Пусть, требуемая вероятность безотказной работы ТС за время  $T_0$ , состоящей из 3-х последовательно соединенных рабочих элементов, равна  $P(t \geq T_0) = P_0 = 0,95$  (требуемая вероятность отказов  $Q_0 = 1 - P_0 = 0,05$ ).

Вероятности безотказной работы элементов (при  $t \geq T_0$ ) соответственно равны

$$P_1 = 0,9; P_2 = 0,8; P_3 = 0,95.$$

Вероятность безотказной работы системы с последовательно соединенными зарезервированным элементами равна

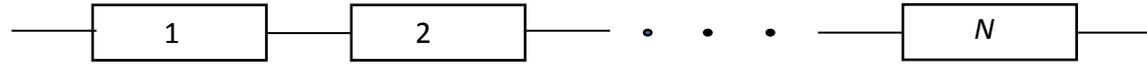
$$P_r = \prod_{i=1}^N P_{ri} \geq P_0,$$

где  $P_r$  - вероятность безотказной работы зарезервированной системы,  $P_{ri}$  - вероятности безотказной работы  $i$ -го зарезервированного элемента из  $N$ .

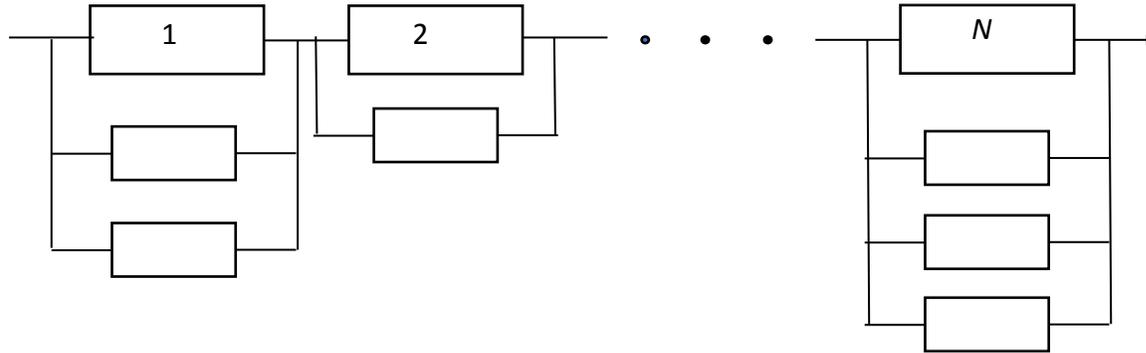
Требуется обеспечить заданную надежность ТС с помощью поэлементного резервирования.

При  $P_r \geq P_0$  обязательно выполнение условия  $P_{ri} > P_0$  (или для вероятностей отказов  $Q_{ri} < Q_0$ ) для всех  $i$  (так как все  $P_{ri} < 1$ ).

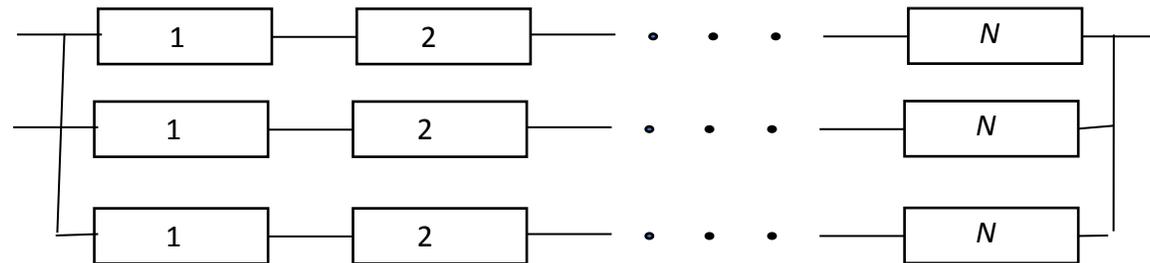
### Исходная система



### Поэлементное резервирование



### Системное резервирование

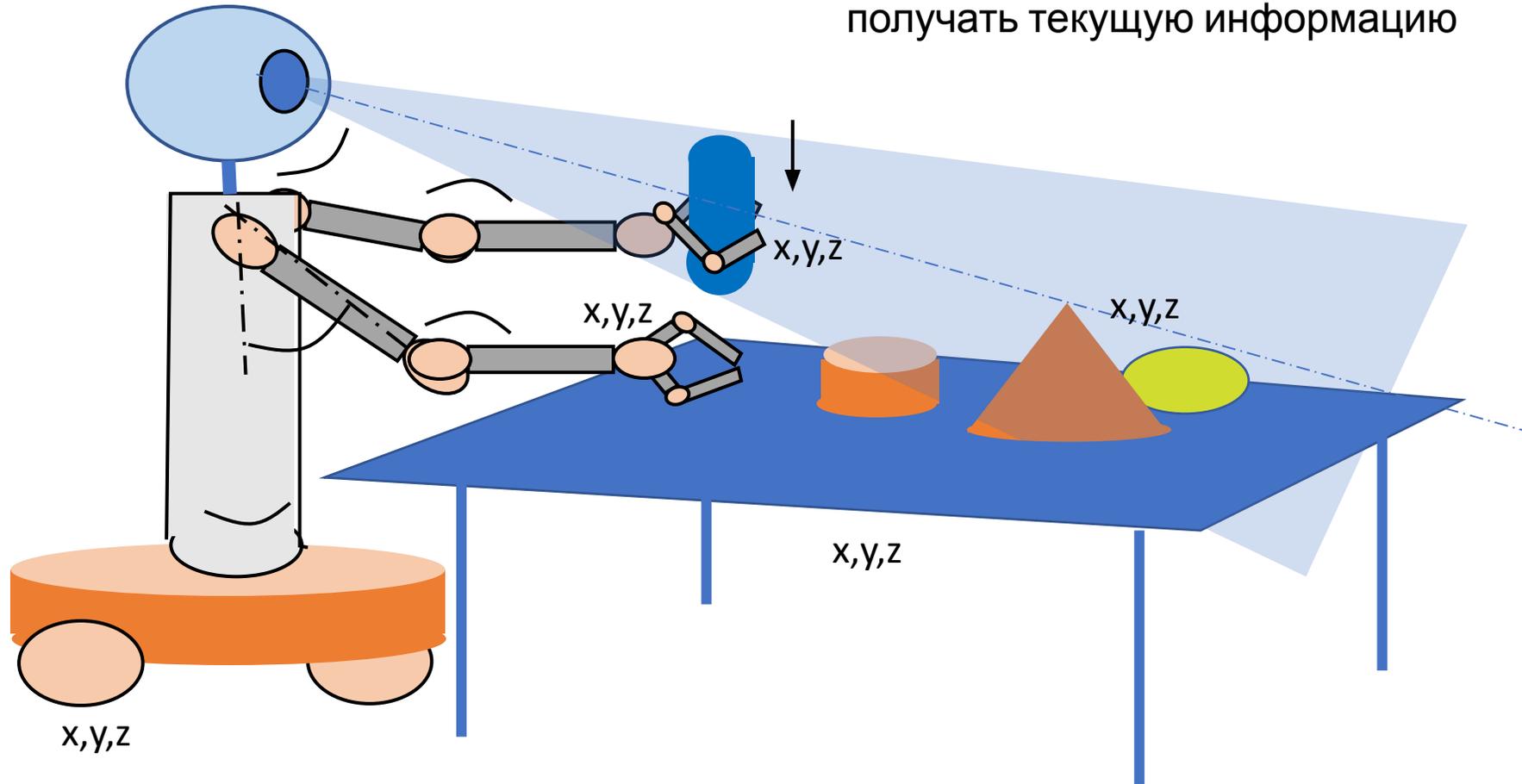


## 5, 6 Лк. Обеспечение точности управления

1. Информационные системы роботов
  - Оценка положения и скорости  $P$ ,
  - Контроль состояния  $P$ ,
  - Сенсорные системы.
2. Основы теории автоматического управления
  - Элементарные звенья и их характеристики,
  - Контур САУ,
  - Характеристики разомкнутой и замкнутой систем,
  - Корректирующие звенья, ПИД - регулятор

# Информационные системы роботов

Для управления роботом необходимо получать текущую информацию



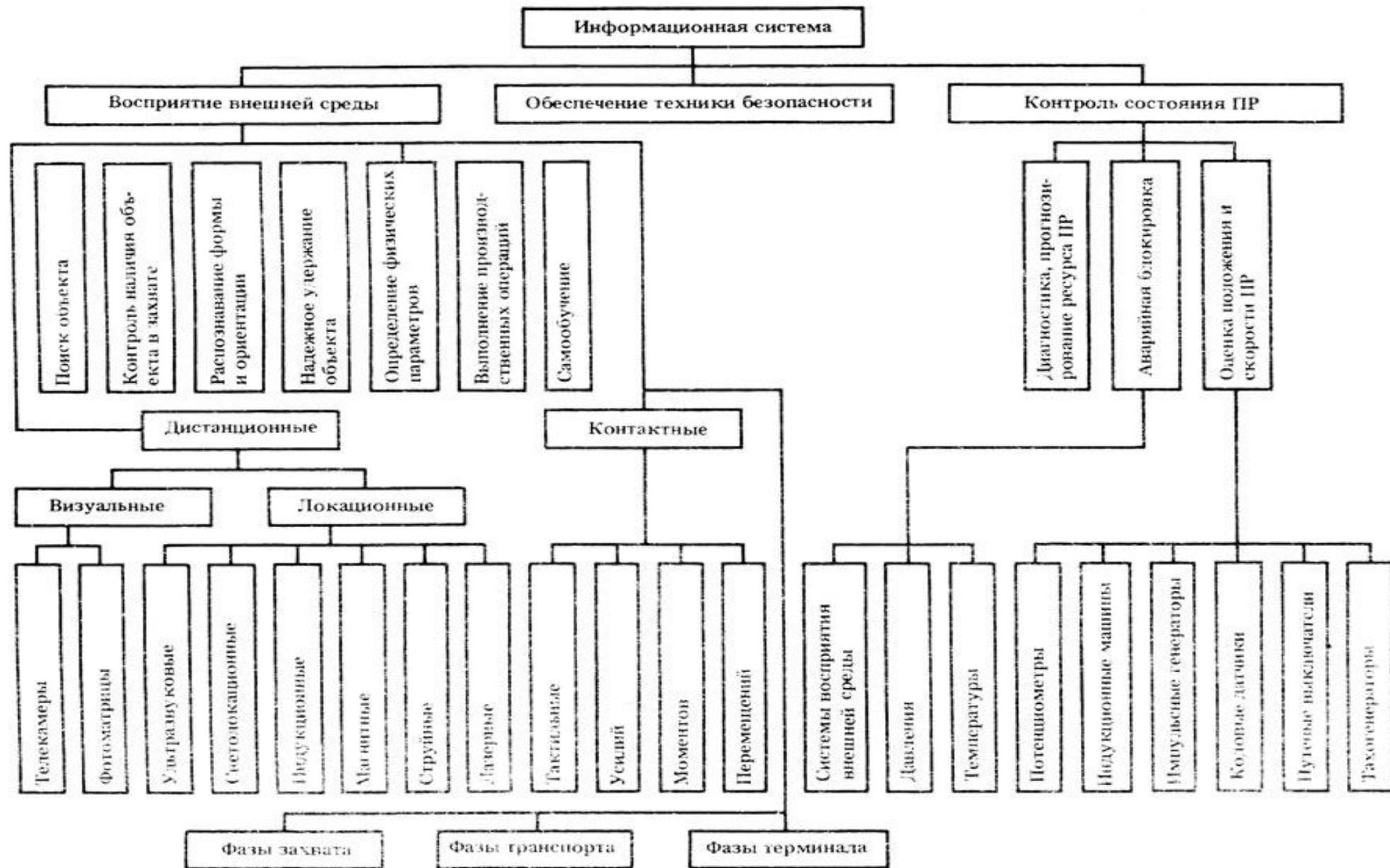
# Информационные системы роботов

Козырев Ю.Г. Промышленные роботы. Справочник. – М.: Машиностроение, ... (различные издания)

Информационные системы роботов можно разделить по функциональному признаку на две группы.

**Датчики состояния робота** (1-я группа) – датчики положения, скорости, крутящего момента.

**Системы очувствления** (2-я группа) – сенсорные устройства.



По функциональному назначению

По характеру решаемой задачи

По способу взаимодействия с внешней средой

По типу используемых датчиков

По месту анализа информации в процессе работы ПР

# Система оценки положения и скорости

В общем случае для оценки положения и скорости роботов (Р) используются традиционные навигационные системы: ИНС, навигация по информационным полям и пр.

Основными требованиями, предъявляемыми к датчикам системы, являются надежность, малые габаритные размеры и масса, помехоустойчивость и устойчивость к воздействию окружающей среды, простота юстировки, возможность отсчета абсолютных значений и низкая стоимость.

Для манипуляторов (М) со следящими приводами в состав системы входят датчики обратной связи по положению и скорости перемещения звеньев по отдельным степеням подвижности.

В качестве датчиков обратной связи по скорости применяют серийно выпускаемые тахогенераторы либо двигатели постоянного тока серии ДПМ.

В качестве датчиков обратной связи по положению могут быть использованы проволочные потенциометры, индуктивные и индукционные датчики типа вращающихся трансформаторов, индуктосинов (бесконтактная информационная машина без магнитопровода с печатными первичной и вторичной обмотками), резольверов (как ВТ, но с двумя обмотками статора), датчики Холла, оптические датчики и пр.

## Системы контроля состояния роботов

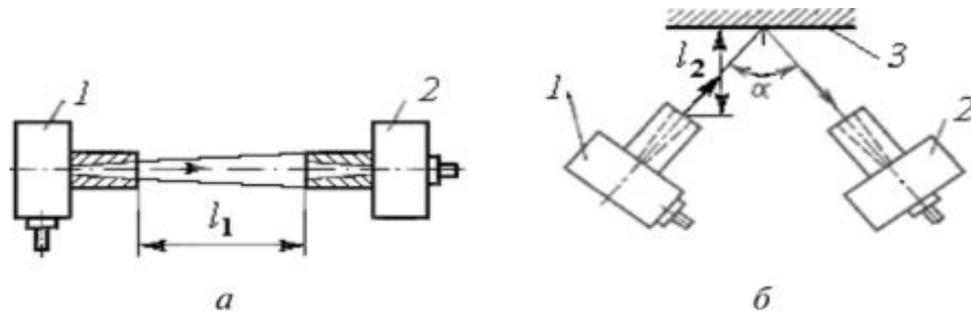
обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики, включая эксплуатационную надежность  $R$ , и участвует в организации требуемых параметров его движения. Поэтому она должна содержать систему оценки положения и скорости движения  $R$ , включая  $M$ , обеспечивающую регистрацию фактического его состояния в каждый момент времени и сравнение с требуемыми параметрами движения; систему аварийной блокировки, обеспечивающую предотвращение поломок как механической системы  $R$  так и обслуживаемого им технологического оборудования при появлении случайных сбоев; систему диагностики и прогнозирования ресурса  $R$ , предназначенную для сокращения времени восстановления работоспособности  $R$  и уменьшения числа отказов путем проведения соответствующих профилактических работ.

# Сенсорные устройства роботов



# Локационные системы

Локационные системы характеризуются отсутствием непосредственного контакта с объектами внешней среды и оперируют с их геометрическими параметрами. Значительное распространение получили локационные системы с акустическими датчиками, оптическими, пневматическими датчиками.



Схемы размещения резонансного УЗ датчика

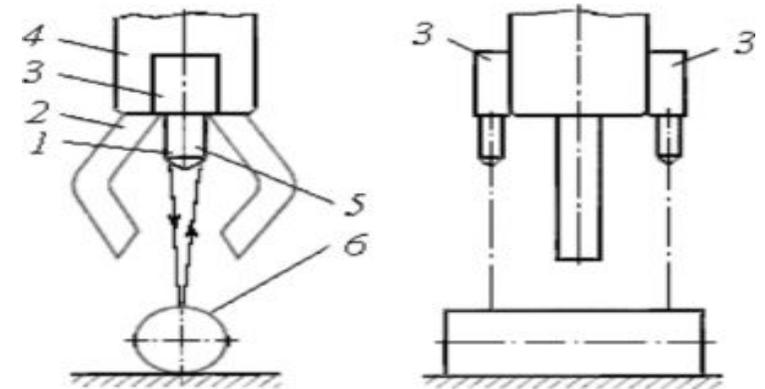
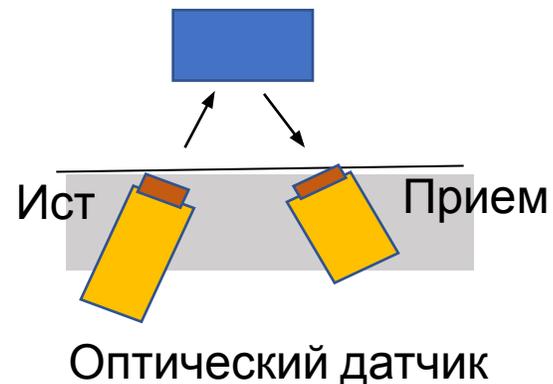
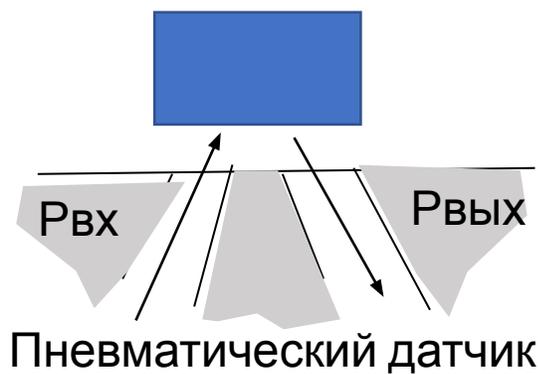


Схема захвата манипулятора с фотодатчиками расстояния и направления: 1 — излучатель; 2 — захват; 3 — датчик; 4 — рука; 5 — фотодиод (приемник); 6 — объект

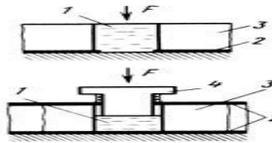
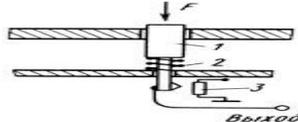
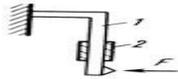
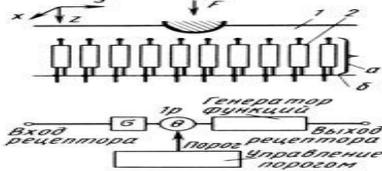
# Системы искусственного осязания

Особенностью работы систем искусственного осязания является наличие контакта датчиков с поверхностью объекта. С их помощью могут быть решены следующие задачи: поиск, обнаружение предметов и определение их положения; схватывание и манипулирование с неориентированными объектами; распознавание формы предметов и их классификация; определение физических свойств объектов (масса, твердость, шероховатость поверхности, температура, тепло- и электропроводность и т. п.); надежное захватывание и удержание объекта с контролем усилия зажима (с целью предотвращения разрушения хрупких и легкодеформируемых предметов); контроль за микроперемещениями деталей при выполнении некоторых сборочных операций; контроль смещений объекта в захватном устройстве ПР при воздействии на него динамических нагрузок.

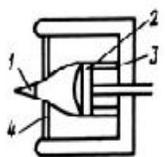
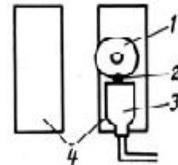
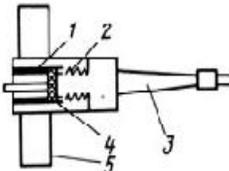
## Примеры использования систем искусственного осязания

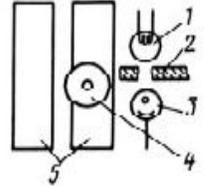
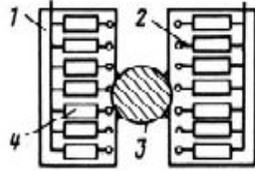
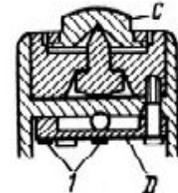
Задача	Конструктивные особенности	Принцип действия
<p>Определение местоположения предметов по отношению к руке ПР, контроль наличия предмета в захвате и контакте с предметом ПР</p> <p>Классификация предметов простых форм</p> <p>Захват неориентированных объектов</p>	<p>Микровыключатели Электропроводные полимеры Пневматически выдвигаемый контактный щуп</p> <p>Тактильные датчики располагаются на внутренней поверхности искусственной кисти</p> <p>Искусственный палец, содержащий четыре контактных датчика, располагаемых на наружных поверхностях пальца</p> <p>Наличие группы тактильных датчиков контактного типа, располагаемых на внутренних поверхностях захвата ПР</p>	<p>Контакт с объектом</p> <p>Классификация путем охвата поверхности предметов кистью</p> <p>Точность классификации зависит от размеров предметов</p> <p>Классификация путем ощупывания поверхности предмета, т. е. движения пальца по поверхности</p> <p>См. рис. 34</p>

## Примеры пропорциональных датчиков, объединенных в матрицы

Матрица	Конструкция датчика	Принцип действия
<p>На основе электропроводящих полимеров</p>	 <p>1 — электропроводящий полимер; 2 — выводы; 3 — упругая оболочка; 4 — поршень-электрод</p>	<p>Изменение силы, направленной по нормали к поверхности объекта, приводит к изменению сопротивления токопроводящего полимера. Диапазон сопротивлений <math>(100 \pm 1)</math> кОм</p>
<p>На основе реостатных потенциометров</p>	 <p>1 — воспринимающий элемент; 2 — пружина; 3 — потенциометр</p>	<p>Прикладываемая сила приводит к перемещению воспринимающего элемента и связанного с ним движка потенциометра</p>
<p>На основе электротензометров сопротивлений</p>	 <p>1 — тензобалка; 2 — электротензометры сопротивлений</p>	<p>Прикладываемая сила приводит к деформации (изгиб) балки, которая регистрируется электротензометрами сопротивлений</p>
<p>На основе пьезоэлектрического преобразователя</p>	 <p>а — преобразователь давления в электрические сигналы; б — порог; 1 — эластичный материал, деформирующийся соответственно форме объекта; 2 — тактильные датчики на основе пьезоэлементов (с преобразованием движения в электрические сигналы)</p>	<p>При соприкосновении матрицы с телом внутренние потенциалы распределяются. Это распределение представляется рядом плоских образцов и соответствующих им пороговых величин</p>

# Датчики регистрации перемещений

Схема	Принцип действия
 <p>1 — сапфировый сердечник; 2 — пьезокерамический датчик; 3 — резиновый амортизатор; 4 — металлический амортизатор</p>	<p>Микронеровности поверхности предмета при его перемещении вызывают появление электрического сигнала на выходе пьезоэлектрика</p>
 <p>1 — резиновый ролик; 2 — магнит; 3 — магнитная головка; 4 — пальцы</p>	<p>Перемещение предмета вызывает вращение ролика, что регистрируется магнитным преобразователем</p>
 <p>1 — силиконовая резина; 2 — упругая резина; 3 — датчик давления; 4 — игла; 5 — палец</p>	<p>Смещение иглы, возникающее при перемещении предмета, регистрируется датчиком давления</p>

 <p>1 — лампа; 2 — диафрагма; 3 — фотоэлемент; 4 — резиновый ролик; 5 — пальцы</p>	<p>Вращение ролика вследствие перемещения предмета приводит к перекрытию диодного фотоэлектрического преобразователя</p>
 <p>1 — пальцы; 2 — мягкий наполнитель; 3 — предмет; 4 — датчики давления</p>	<p>Изменение состояния отдельных датчиков характеризует наличие перемещения</p>
 <p>1 — тензометры</p>	<p>Изгиб воспринимающего элемента при перемещении предмета вызывает изгиб тензометрической балки (D)</p>

## Датчики усилий (моментов)

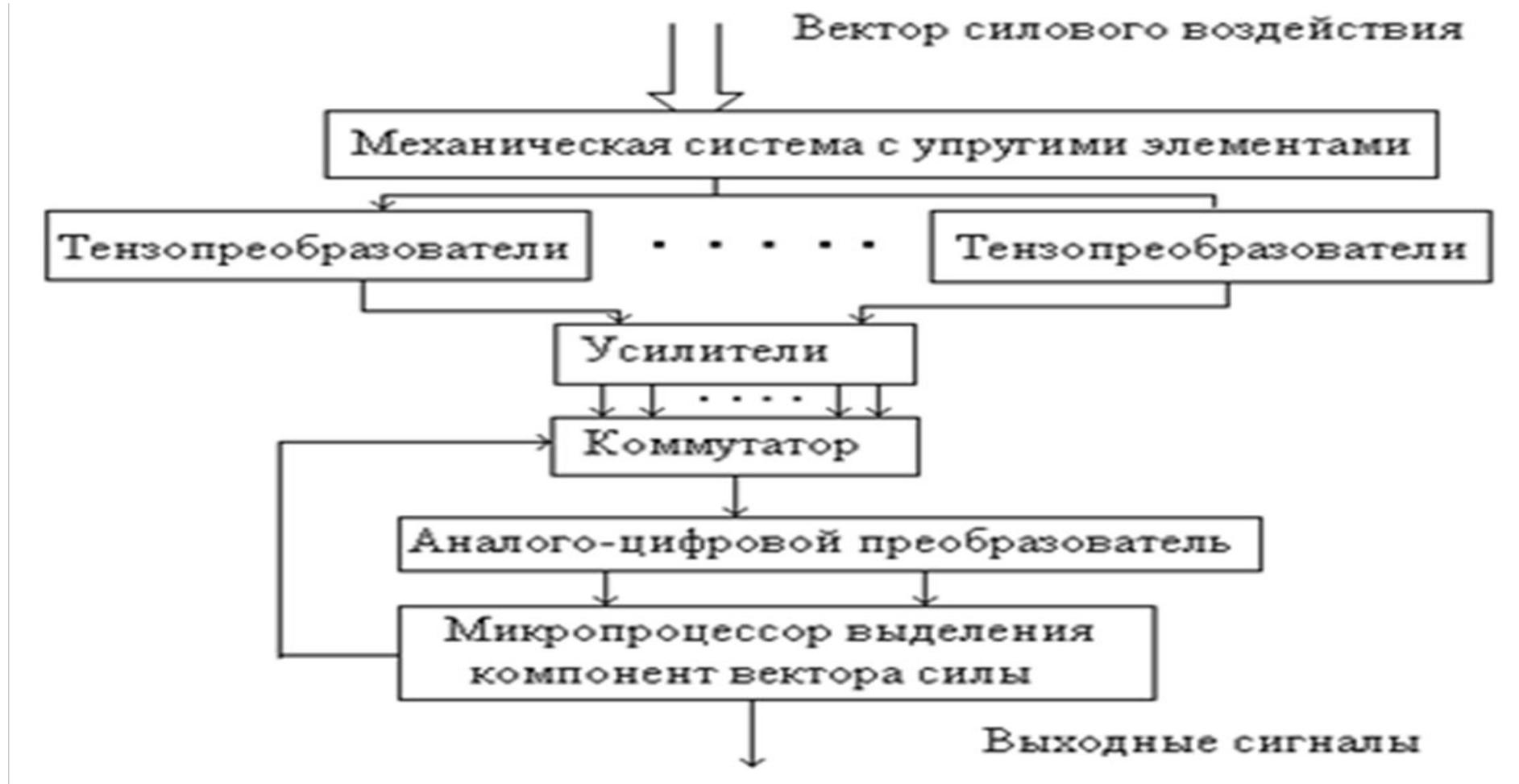
Датчики усилий (моментов) применяют в роботах, осуществляющих манипулирование хрупкими и легкодеформируемыми предметами или выполняющих простые операции сборки.

В первом случае датчики усилий позволяют регулировать усилие схвата пропорционально массе захватываемых объектов. Такие датчики обычно устанавливают в захвате, и поэтому они должны быть небольших размеров.

Применяют два способа измерения усилий: по упругой деформации чувствительного элемента и по перемещению подвижной части чувствительного элемента.

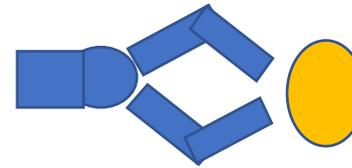
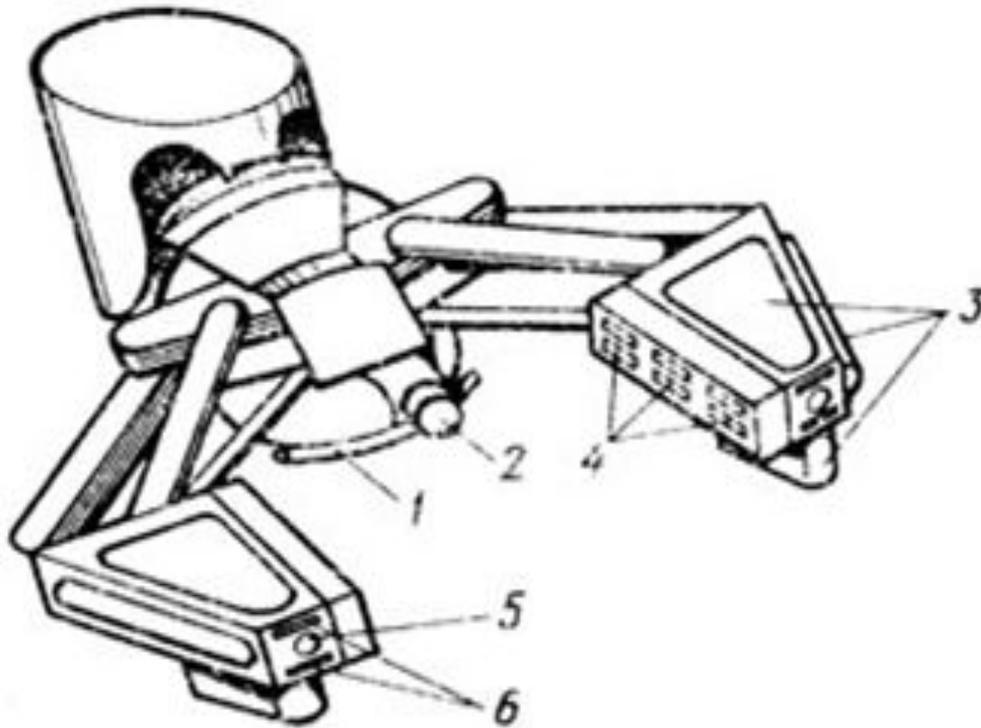
Для измерения малых усилий пригодны различные конструкционные решения с использованием проволочных и полупроводниковых тензометров сопротивления или токопроводящих полимеров. Для измерения больших усилий применяют магнитоупругие элементы, а для точных измерений - градуированные пружины и другие упругочувствительные элементы.

# Си́ломоментный датчик

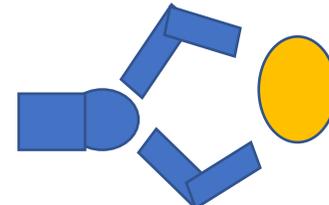


**Схема силомоментного датчика**

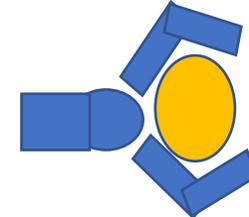
# Размещение датчиков на схвате



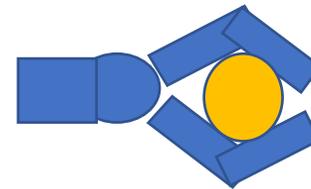
Обнаружение



Оценка  
расстояния

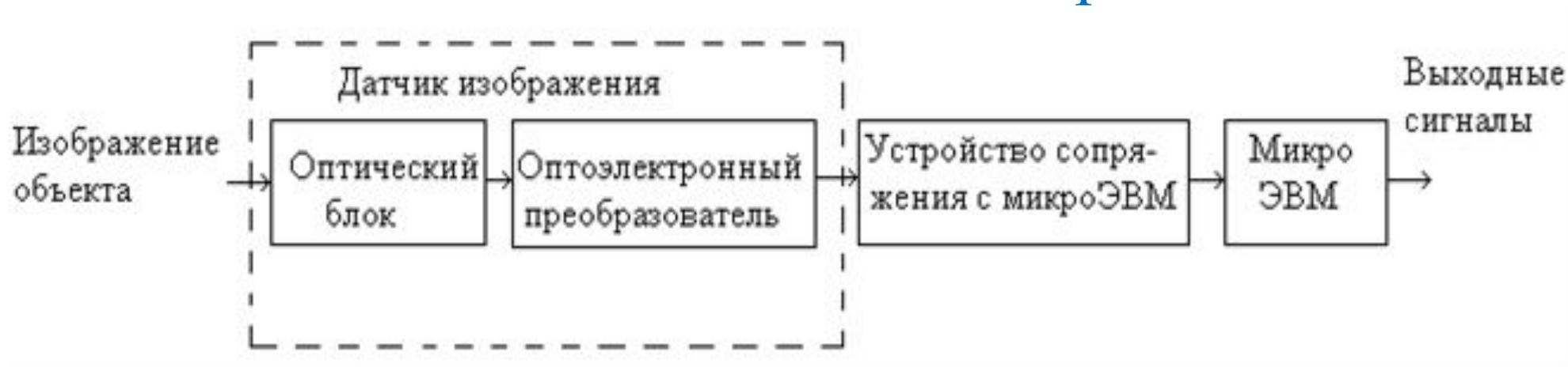


Оценка  
положения в  
схвате



Оценка  
надежности  
захвата,  
проскальзывания

# Системы технического зрения



Преобразования и анализа изображения осуществляются микроЭВМ, входящей в состав СТЗ. Как правило, производится бинаризация изображений. Выделяются точки контура деталей или точки подчеркивающими различные особенности одной детали, например отверстия, ребра и т.п. В дальнейшем выполняется анализ связности, т.е. определяется принадлежность каждой точки тому или другому контуру, являющемуся замкнутой кривой, и осуществляется сегментация изображения, представляющая собой процедуру выделения на изображении отдельных не связанных и не соприкасающихся объектов.

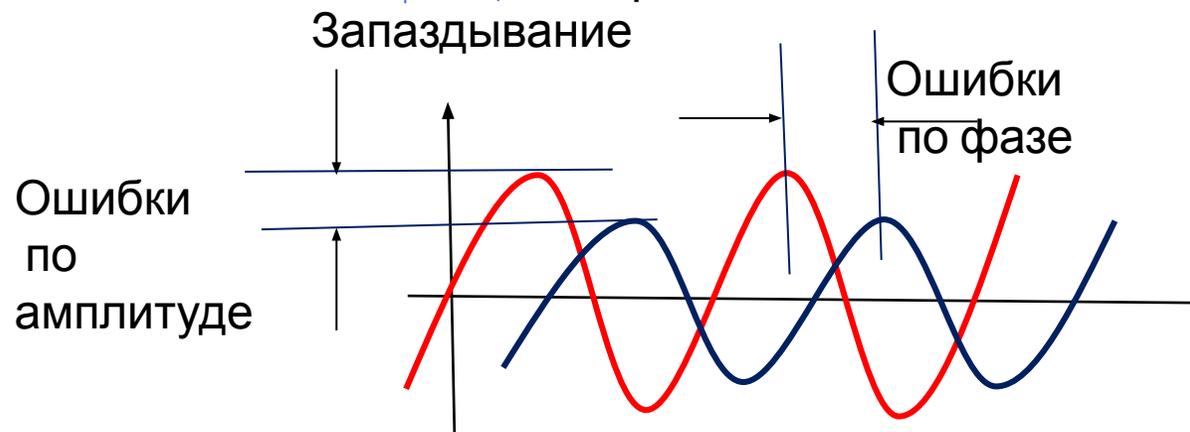
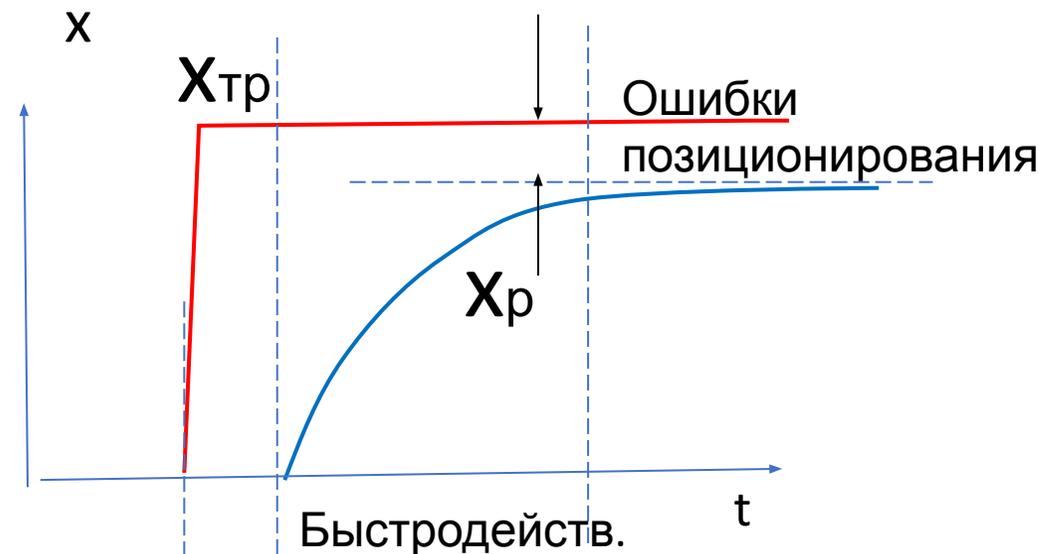
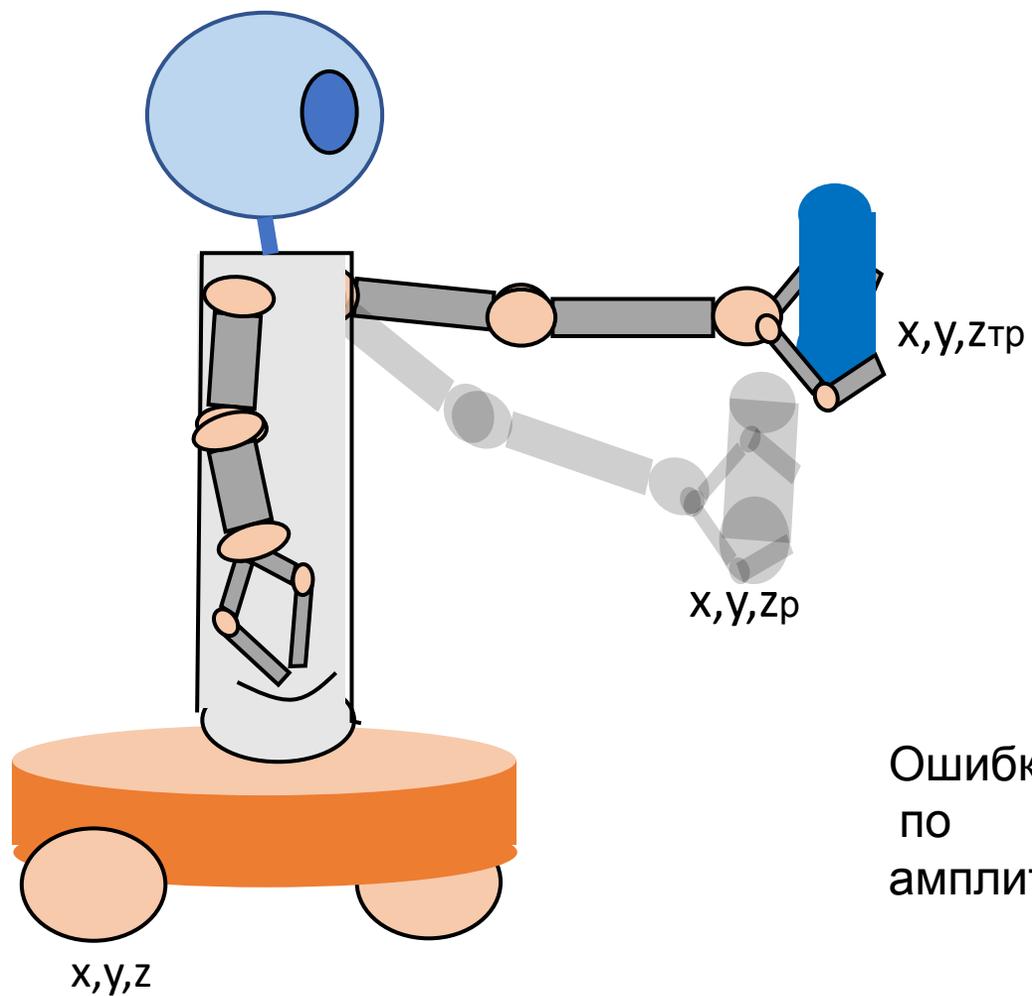
## Примеры использования СТЗ

Задача	Конструктивные особенности	Принцип действия	Условия работы
<p>Распознавание деталей: плоских</p>	<p>Оптическая головка с вращающимся зеркалом, параболическим зеркалом и фотоэлементом</p> <p>Видеосенсор с матрицей из 1024 фотодиодов, диаграммой и фокусирующим оптическим устройством</p>	<p>Фотоэлемент воспринимает лучи, посылаемые головкой и отраженные от отражателя, на котором располагается деталь</p> <p>Освещенность каждого диода имеет 16 градаций</p>	<p>Естественная освещенность</p> <p>Необходимы определенные направление освещения и угла падения света</p>
<p>на поточной линии</p>	<p>Телевизионные камеры, установленные над равномерно освещенным конвейером</p>	<p>Опознавание осуществляется путем соотношения формы и размеров детали с тремя окружностями разных диаметров</p>	<p>Естественная освещенность</p>
<p>Управление ПР, осуществляющими простейшие операции сборки</p>	<p>Две телевизионные камеры</p> <p>Более пяти телевизионных камер</p>	<p>Инструкция вводится посредством предъявления одной телевизионной камеры чертежа объекта и отыскания отдельных составляющих деталей другой телевизионной камерой</p> <p>Информация используется для распознавания объектов сложной формы и координации работы нескольких ПР</p>	<p>Организация определенного освещения</p>

# Системы автоматического управления Обеспечение точности и быстродействия движения робота

- В ТАУ можно выделить две характерные задачи: 1) в заданной системе автоматического управления (САУ) найти и оценить переходные процессы (или параметры установившегося режима) - это задача анализа САУ; 2) по заданным переходным процессам и основным показателям разработать САУ - это задача синтеза САУ.
- Вторая задача сложнее в виду своей неоднозначности, многое определяется творческими способностями проектировщика. Поэтому обычно задача синтеза САУ ставится ограниченно. Считается, что основная часть системы уже задана, что обычно имеет место. Требуется синтезировать корректирующие звенья, то есть выбрать их схему и параметры. При этом необходимо, чтобы в результате коррекции САУ обеспечивался требуемый запас устойчивости; точность управления в установившихся режимах и качество управления в динамических режимах.

# Ошибки управления

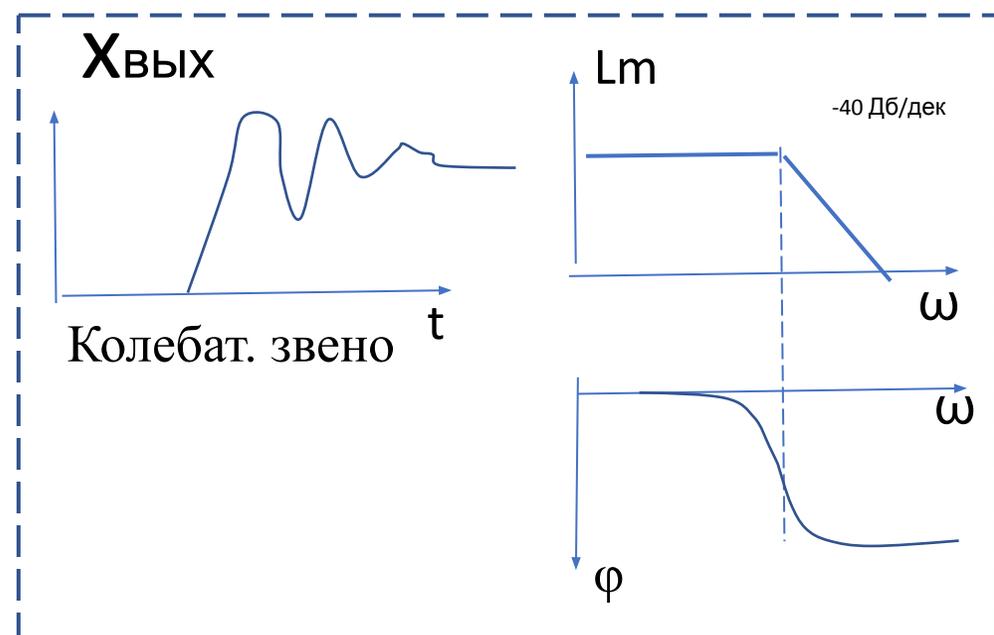
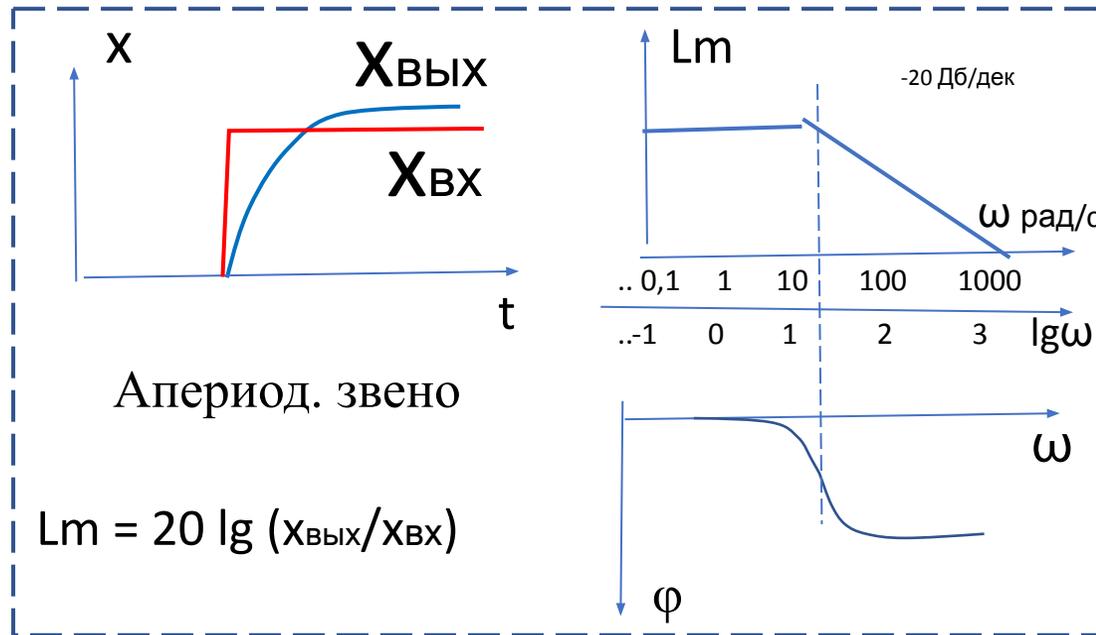
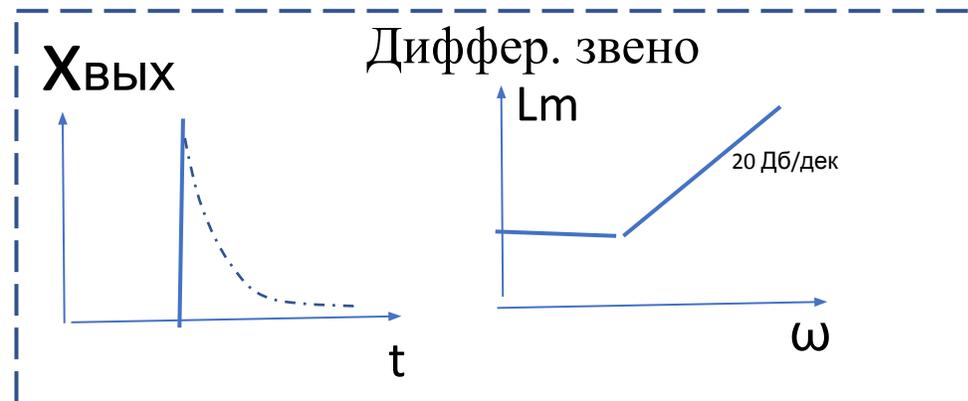
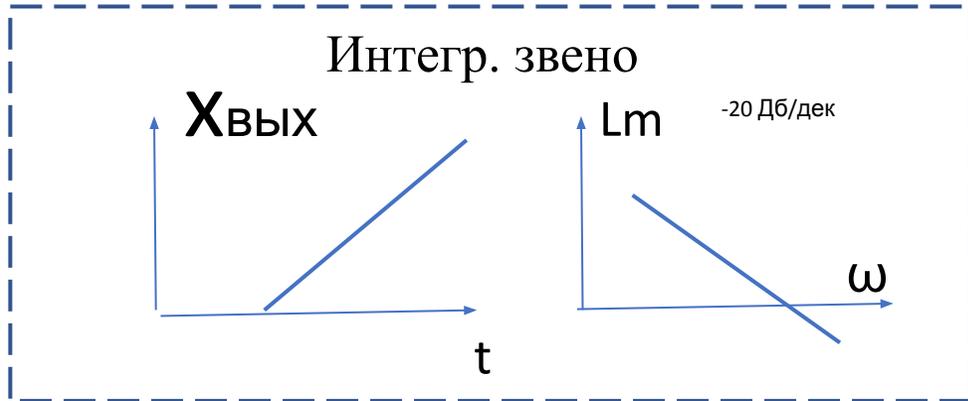


# Элементарные звенья

- Усилительное  $y = K \cdot x$ . усиливает входной сигнал в  $K$  раз. Передаточная функция  $W(s) = K$ .
- Интегрирующее: идеальное  $W(s) = 1/s$ , реальное  $W(s) = \frac{K}{s(Ts+1)}$ .
- Дифференцирующее: идеальное  $W(s) = K \cdot s$ , реальное  $W(s) = Ts + 1$ .
- Аperiodическое,  $W(s) = \frac{K}{Ts+1}$ .
- Колебательное,  $W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$ .
- Звено транспортного (чистого) запаздывания,  $W(s) = e^{-t_0 s}$ .

Здесь  $K$  – коэффициент усиления,  $T$  – постоянная времени,  $s$  – оператор Лапласа,  
 $t_0$  - запаздывание

# Элементарные звенья



# Контур САУ

## Соединения звеньев

Вид передаточной функции объекта зависит от последовательности соединения звеньев:

### 1) Последовательное соединение.

$$W_{об} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3$$

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции перемножаются.

### 2) Параллельное соединение.

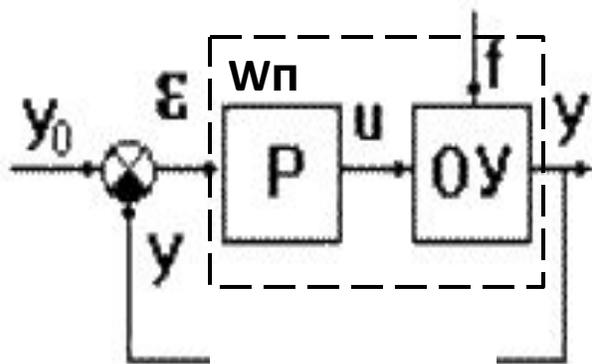
$$W_{об} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

При параллельном соединении звеньев их передаточные функции складываются.

### 3) Обратная связь

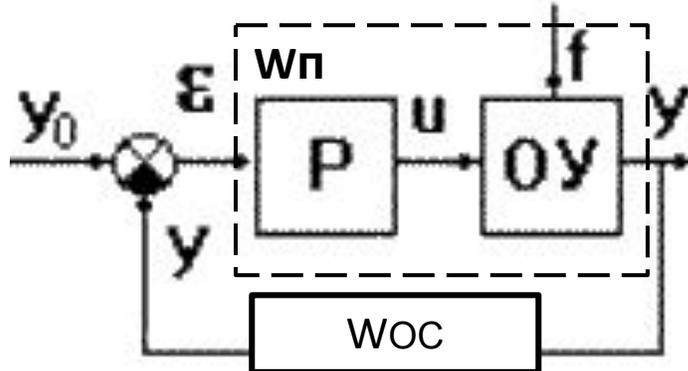
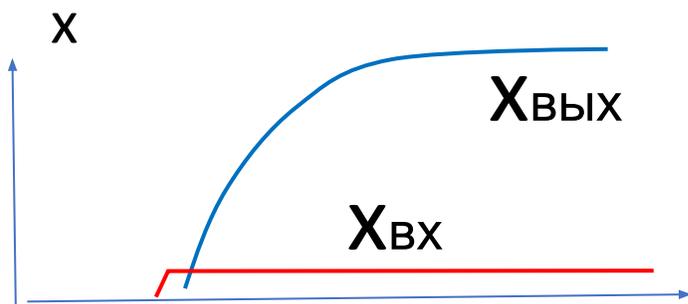
Передаточная функция по заданию (х):  $W_{\zeta}(s) = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2}$  отриц. связь, - полож. связь

# Разомкнутые и замкнутые системы



Разомкнутая система

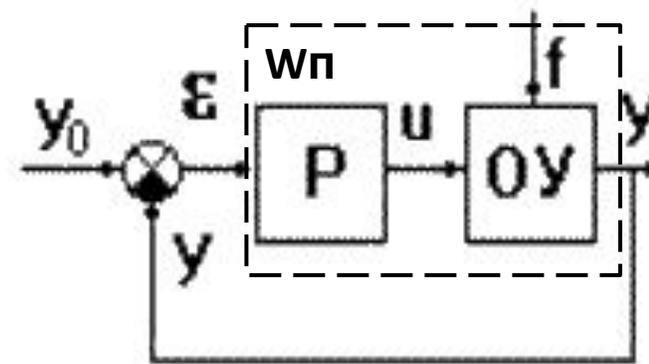
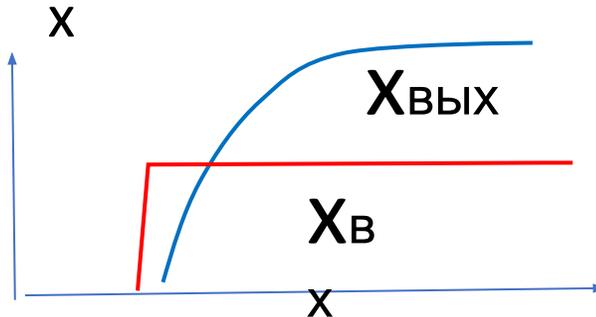
Например,  $Wп = 100$



Замкнутая система Wос

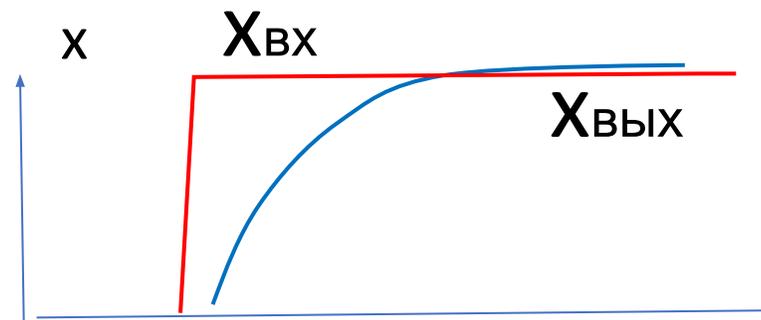
$$W = Wп / (1 + WпWос)$$

$$Wп = 100, Wос = 0,5$$



Замкнутая система с единичной отриц. ОС

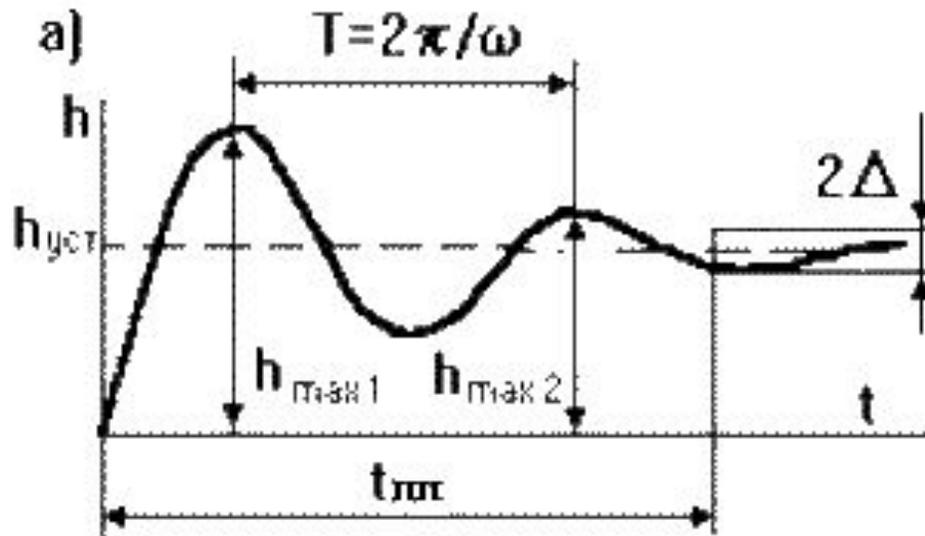
$$W = Wп / (1 + Wп)$$



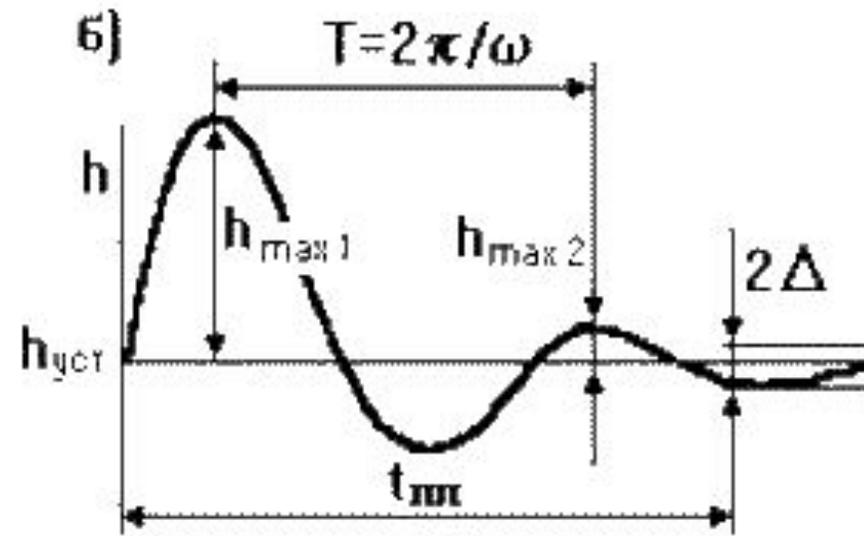
# Переходный процесс

При нулевых начальных условиях динамический режим описывается переходной характеристикой  $h(t) = \Delta y(t) = y(t) - y_0 = -e(t)$ .

1. *Статическая ошибка*  $e_{уст} = y_0 - y_{уст} = -h_{уст}$  - это разность между предписанным и действительным значением управляемой величины в установившемся режиме. Для статических систем статическая ошибка отлична от нуля и пропорциональна величине возмущающего фактора  $f$  (в линейных САУ) и коэффициенту передачи системы по данному возмущению, а для астатических - равна нулю.



Статическая система



Астатическая система

2. *Время переходного процесса*  $t_{пп}$  - это время от момента воздействия, начиная с которого колебания управляемой величины не превышают некоторого наперед заданного значения, то есть  $|h(t)-h_{уст}| \leq \Delta$ . Обычно принимают  $\Delta = 0.05h_{уст}$ .

3. *Перерегулирование*  $s$  - это максимальное отклонение управляемой величины от установившегося значения, выраженное в относительных единицах:

$$S = \frac{h_{\max 1} - h_{уст}}{h_{уст}}$$

Здесь  $h_{\max 1}$  - значение первого максимума переходной характеристики. При больших перерегулированиях могут возникнуть значительные динамические усилия в механической части системы, электрические перенапряжения и т.п. Допустимое значение  $s$  определяется из опыта эксплуатации. Обычно оно составляет 0.1...0.3, иногда допускается до 0.7.

4. *Частота колебаний*

$$\omega = 2\pi/T, \text{ где } T - \text{период колебаний.}$$

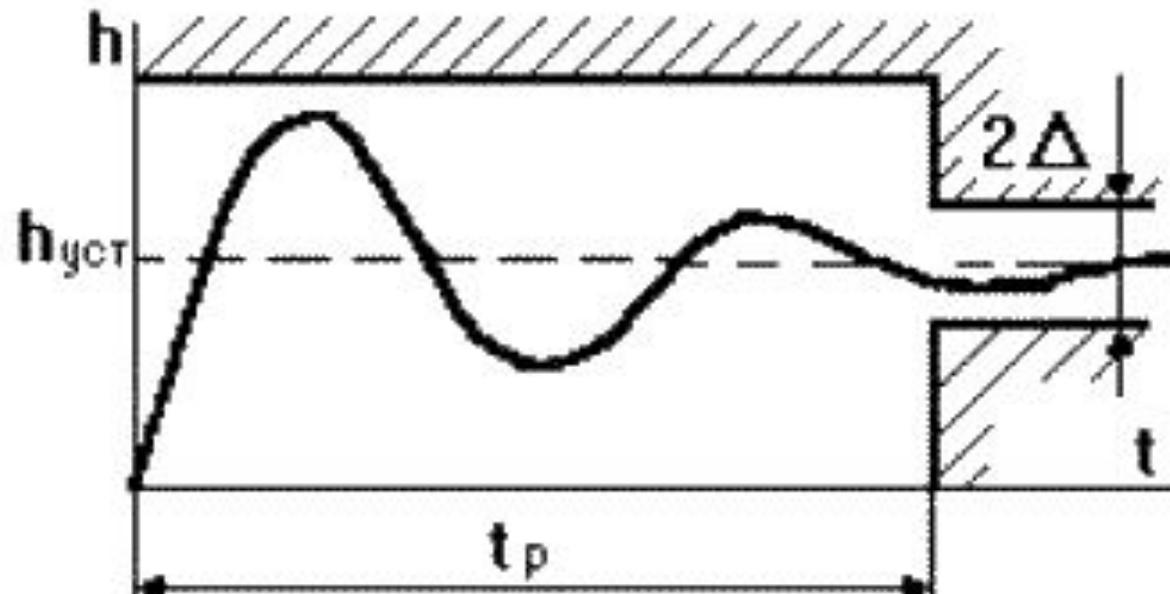
5. *Число колебаний*  $n$  за время  $t_{пп}$ .

6. *Декремент затухания*  $k$ , равный отношению двух смежных перерегулирований

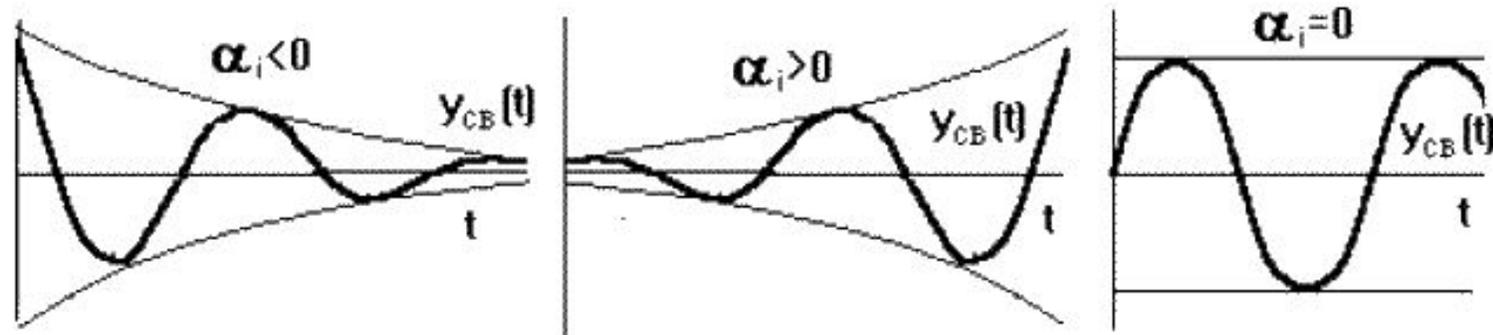
$$k = \frac{|h_{\max 1} - h_{уст}|}{|h_{\max 2} - h_{уст}|}$$

# Показатели качества переходного процесса

- При создании САУ допустимые значения показателей качества оговариваются техническими условиями, что можно представить в виде *диаграммы показателей качества*. Это область, за границы которой не должна выходить переходная характеристика



## Устойчивые и неустойчивые системы



Исследование переходных процессов носит частный характер.

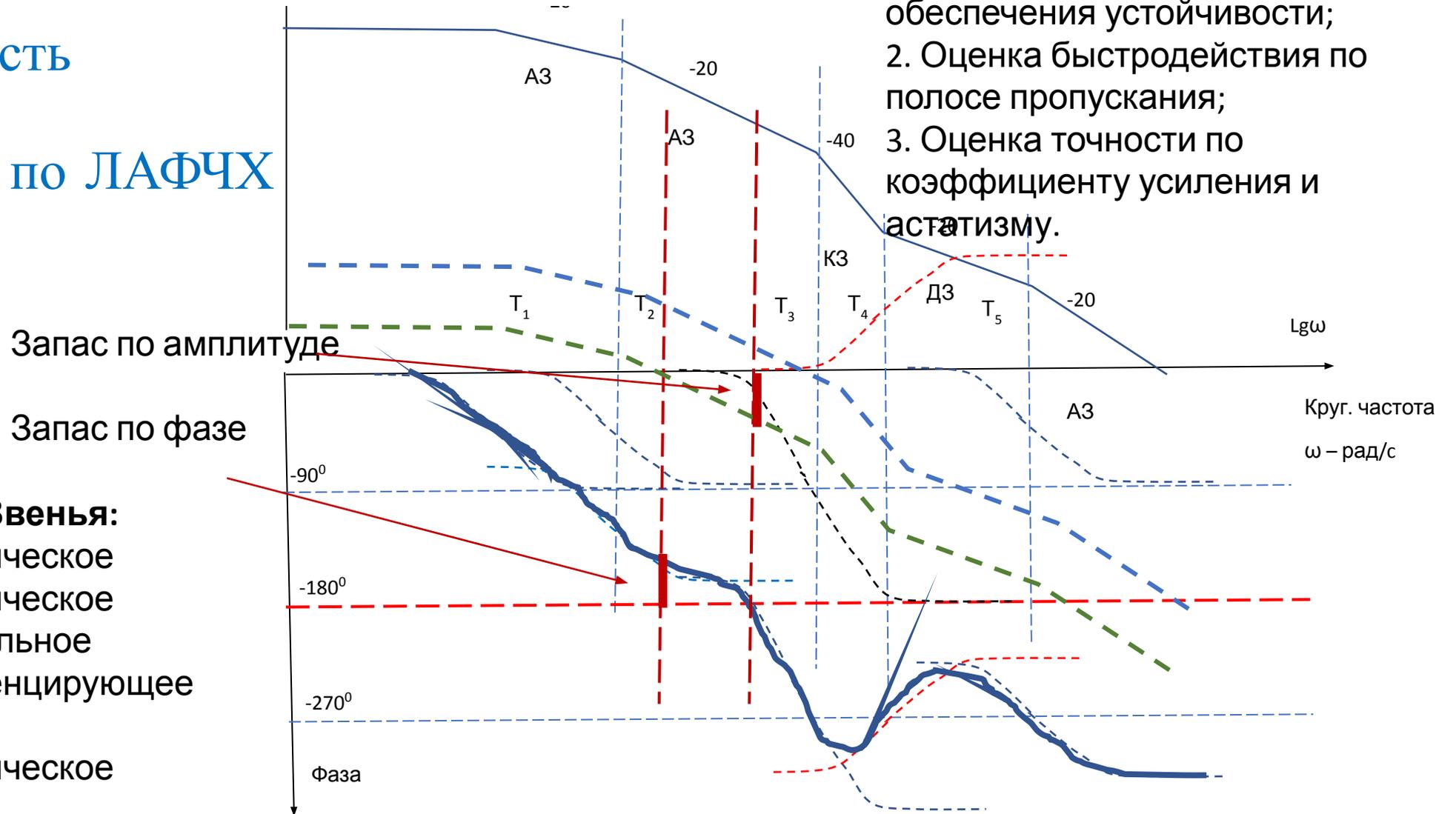
Более общие результаты получаются при исследовании систем частотными методами.

Например, на основе исследования логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик ЛАФЧХ.

# Устойчивость и качество процессов по ЛАФЧХ

$$Lm(x_1/x_2) = 20 \lg(x_1/x_2) . \text{ Например, при } k=100, Lm = 40 \text{ Дб}$$

Амплитудная х-ка



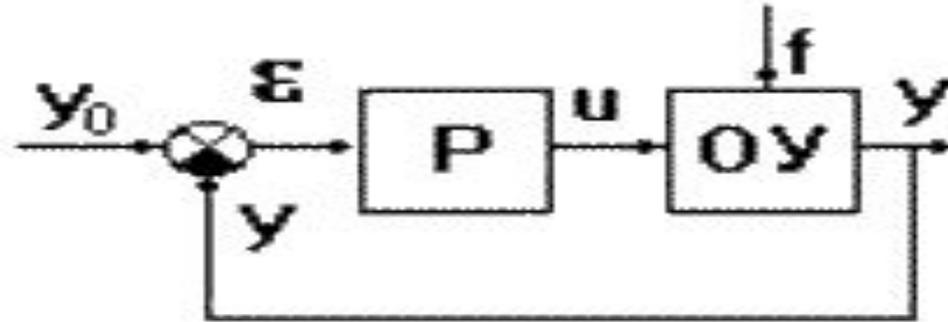
## Главные проблемы:

1. Определение условий обеспечения устойчивости;
2. Оценка быстродействия по полосе пропускания;
3. Оценка точности по коэффициенту усиления и астатизму.

### Звенья:

- Аperiodическое
- Аperiodическое
- Колебательное
- Дифференцирующее (реал.)
- Аperiodическое

# ПД-регулятор



Законом регулирования называется математическая зависимость, в соответствии с которой управляющее воздействие на объект вырабатывалось бы безынерционным регулятором.

Простейшим из них является *пропорциональный закон регулирования*, при котором

$$u(t) = K e(t) \text{ (рис. а),}$$

где  $u(t)$  - это управляющее воздействие, формируемое регулятором,  $e(t)$  - отклонение регулируемой величины от требуемого значения,  $K$  - коэффициент пропорциональности регулятора  $P$ .

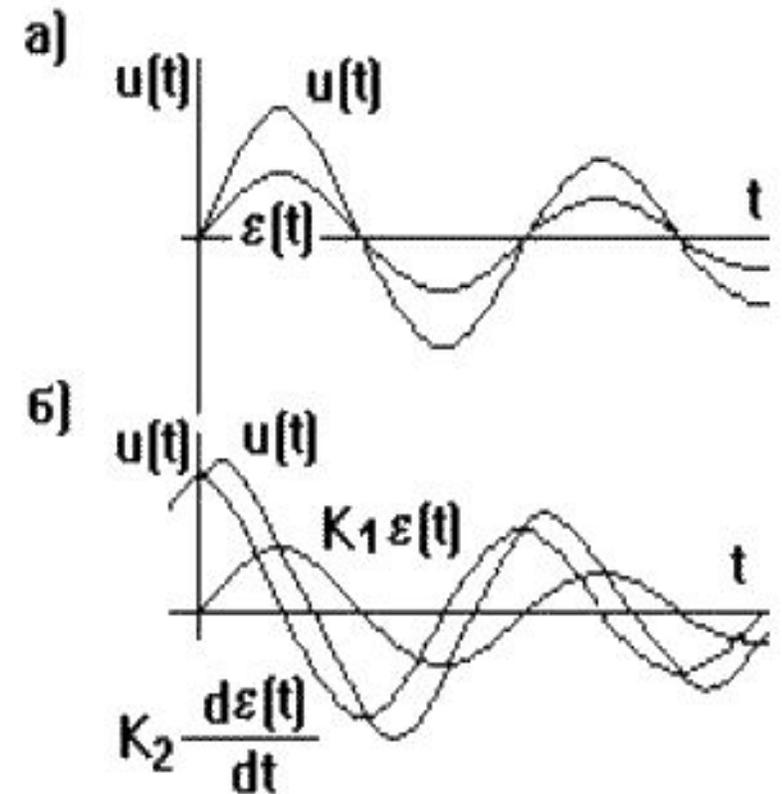
То есть для создания управляющего воздействия необходимо наличие ошибки регулирования и чтобы величина этой ошибки была пропорциональна возмущающему воздействию  $f(t)$ . Другими словами САУ в целом должна быть статической.

Такие регуляторы называют *П-регуляторами*.

Так как при воздействии возмущения на объект управления отклонение регулируемой величины от требуемого значения происходит с конечной скоростью (рис. б), то в начальный момент на вход регулятора подается очень малая величина  $e$ , вызывая при этом слабые управляющие воздействия  $u$ . Для повышения быстродействия системы желательно форсировать процесс управления. Для этого в регулятор вводят звенья, формирующие на выходе сигнал, пропорциональный производной от входной величины, то есть дифференцирующие или форсирующие звенья.

Такой закон регулирования называется *пропорционально - дифференциальным*:  $u(t) = K_1 e(t) + K_2 de(t)/dt$ .

В соответствии с ним работают *ПД-регуляторы*.



# И-регулятор

*Интегральный закон регулирования реализуется И-регулятором*

$$u(t) = K \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

Этот регулятор наращивает управляющее воздействие до тех пор пока управляемая величина отличается от требуемого значения, то есть пока  $\varepsilon(t) \neq 0$ .

*И-регулятор* обеспечивает астатическое регулирование.

При малых  $\varepsilon$  управляющее воздействие изменяется с малой скоростью, поэтому данный регулятор очень инерционный.

# ПИД-регулятор

Чтобы увеличить быстродействие обычно последовательно с ним включают усилитель, это дает *пропорционально-интегральный закон регулирования (ПИ-регулятор)*, его формула:

$$u(t) = K_1 \varepsilon(t) + K_2 \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

Первое слагаемое обеспечивает быстродействие, второе - астатичность, то есть точность регулирования.

Еще большее быстродействие обеспечивается при добавлении слагаемого, пропорционального производной от отклонения управляемой величины  $de/dt$ , такой закон регулирования обеспечивается *ПИД-регулятором*, его формула:

$$u(t) = K_1 \varepsilon(t) + K_2 \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_3 \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

## Производительность, быстродействие систем

$W_{\text{пр}} = V_{\text{н}} * B_{\text{м}}$  км<sup>2</sup>/ч - производительность систем мониторинга

$V_{\text{н}}$  – скорость носителя,  $B_{\text{м}}$  – ширина обследуемой полосы мониторинга

$W_{\text{пр}} = V_{\text{н}} * B_{\text{у}}$  км<sup>2</sup>/ч - производительность систем уборки, например, робот-пылесос

$V_{\text{н}}$  – скорость носителя,  $B_{\text{у}}$  – ширина убираемой полосы

$W_{\text{пр}} = V_{\text{н}} * B_{\text{т}}$  ткм/ч - производительность систем транспорта, например, автомобиля, трубопровода

$V_{\text{н}}$  – скорость носителя,  $B_{\text{т}}$  – вес транспортируемого груза

$W_{\text{пр}} = N$  выстр/с - производительность стрельбы (скорострельность)

$W_{\text{пр}} = N$  дет/смена - производительность станка

# Критерий производительности

$$W_{\theta\Sigma} = \max (\text{или } \min) W_{\Sigma} (W_i) \quad \text{при } W_j < W_{j3} \text{ (ограничения)}$$

$$W_{np} \rightarrow \mathbf{max}, \text{ при } W_j < W_{j3}$$

*Например 1*, максимизация производительности систем уборки робота-пылесоса

$$W_{np} = V_n * B_y \rightarrow \mathbf{max}, \quad \text{при чистоте уборки не менее 8 баллов,}$$

где  $V_n$  – скорость носителя,  $B_y$  – ширина убираемой полосы

*Например 2*, максимизация скорострельности

$$W_{np} = N \rightarrow \mathbf{max}, \quad \text{при точности стрельбы не хуже } \pm 3\sigma \geq 2\text{м на расстоянии не менее } 1500\text{ м}$$

Одним из вариантов синтеза подобной ТС является следующий:

1. Определение количества ( $m1$ ) резервных элементов для рабочего элемента 1.

Для обеспечения условия  $Q_{r1} < Q_0$ , определим

$$Q_1 = 1 - P_1 = 0,1.$$

В рассматриваемом примере, если к рабочему элементу 1 добавляется один резервный элемент ( $m1=2$ ), то условие  $Q_{r1} < Q_0$  выполняется

$$Q_1^2 = 0,01 < 0,05.$$

2. Определение количества ( $m2$ ) резервных элементов для рабочего элемента 2.

Требуемая вероятность безотказной работы оставшейся части ТС (без учета 1-го рабочего элемента) определяются как

$$P_{01} = P_0 / P_{r1},$$

откуда с точностью до 4-го знака получим

$$Q_{01} = 1 - P_{01} = 1 - 0,95 / 0,99 = 1 - 0,9596 = 0,0404.$$

Используя вероятность отказов  $Q_{01}$  вместо  $Q_0$ , находим условия обеспечения надежности для рабочего элемента 2:  $Q_{r2} < Q_{01}$ .

Выполняя действия аналогичные п.1, получим при  $m2=2$ ,

$$Q_{r2} = 0,0025 < 0,0404.$$

3. Для элемента 3.

Требуемая вероятность отказов для оставшейся части ТС (без 1-го и 2-го элементов) равна

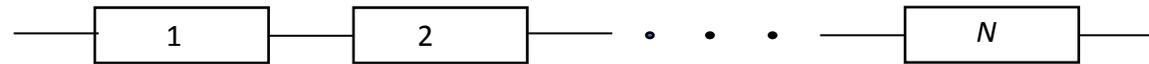
$$Q_{02} = 1 - 0,9595 / 0,96 = 1 - 0,9996 = 0,0004.$$

Заданная требуемая надежность всей ТС обеспечивается при  $m3 = 3$ , так как в этом случае удовлетворяется условие

$$Q_{r3} = 0,000125 < 0,0004.$$

## Примеры для ПЗ

1. Построить схемы резервирования ТС (поэлементные, системную);
2. Рассчитать количество резервных элементов для каждой схемы;
3. Сравнить количество резервных элементов;
4. Выбрать наилучший вариант.



	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_0$
1	0,9	0,8	0,75	<b>0,95; 0,89</b>
2	0,85	0,85	0,9	<b>0,95; 0,89</b>
3	0,75	0,9	0,8	<b>0,95; 0,89</b>
4	0,85	0,7	0,9	<b>0,95; 0,89</b>

# Испытания

Испытания в соответствии с ГОСТ 16504-81 подразделяются по:

**назначению** — на исследовательские, контрольные, сравнительные, определительные;

**уровню проведения** - на государственные, межведомственные, ведомственные;

**этапам разработки продукции** - на доводочные, предварительные, приемочные;

**испытаниям готовой продукции** — на квалификационные, предъявительские, приемо-сдаточные, периодические, инспекционные типовые, аттестационные, сертификационные;

**условиям и месту проведения испытаний** - на лабораторные стендовые, полигонные, натурные, с использованием моделей, эксплуатационные;

**продолжительности** - на нормальные, ускоренные, сокращенные;

**виду воздействия** — на механические, климатические, термические, радиационные, электрические, электромагнитные, магнитные, химические, биологические;

**результату воздействия** - на неразрушающие, разрушающие, испытания на прочность, на устойчивость;

**определяемым характеристикам объекта** - на функциональные испытания на надежность, безопасность, транспортабельность, граничные, технологические.

**Контроль:** входной, операционный, выходной, приемочный; сплошной, выборочный

## ЛК.13, 14. Человеко-машинные системы

интегрируют функции одного или нескольких людей-операторов (Ч – человек-оператор) с машиной (М), в частности с роботом (Р), образуя единые системы, взаимодействующие с окружающей средой.

Человеко-машинные системы описывают методы и взаимодействие между операторами, техническими средствами и входами или материалами для получения продукта. Человек, управляющий самолетом, является примером такого типа системы.

# Инженерная психология

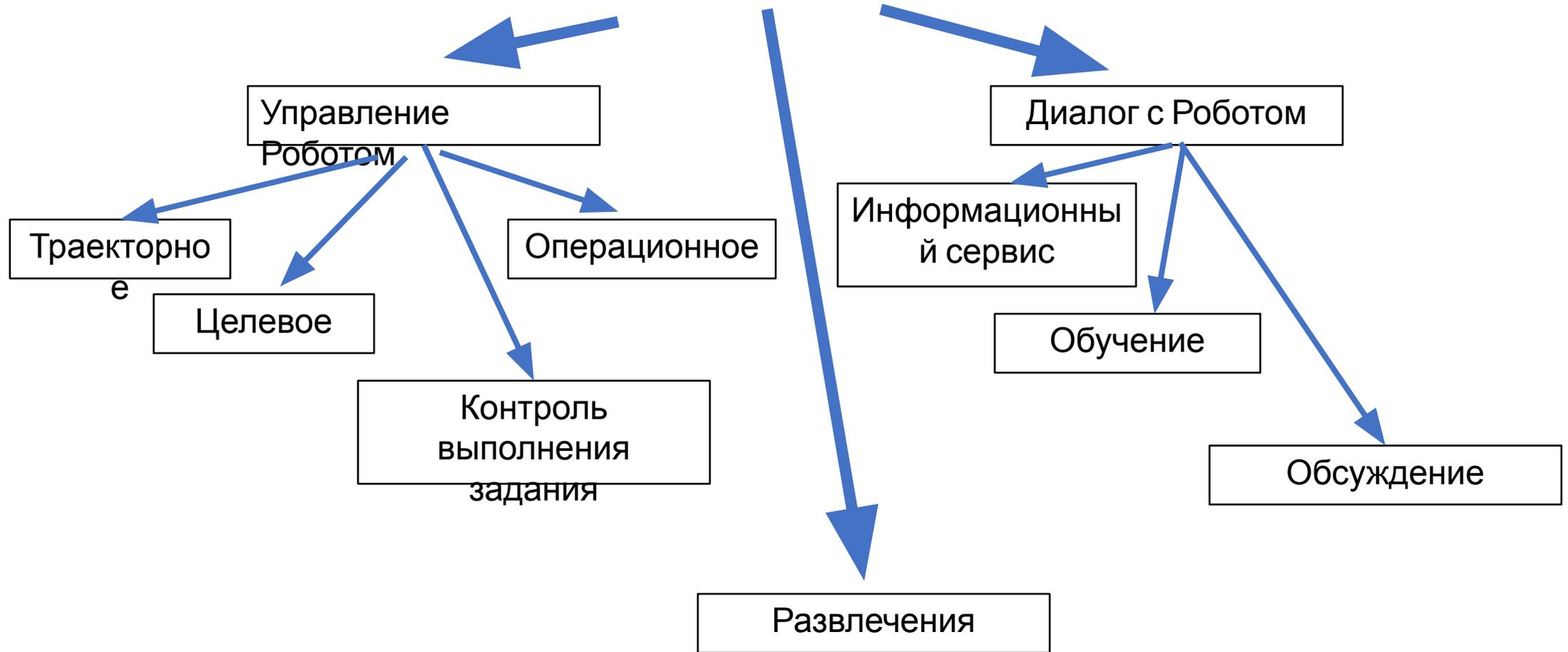
Комплексы, объединяющие работу различных **технических систем (ТС)** (в т.ч. роботов) и человека, называются эргатическими или **системой “человек - машина” (СЧМ)**.

Проблема оптимального синтеза СЧМ решается с использованием методов инженерной психологии.

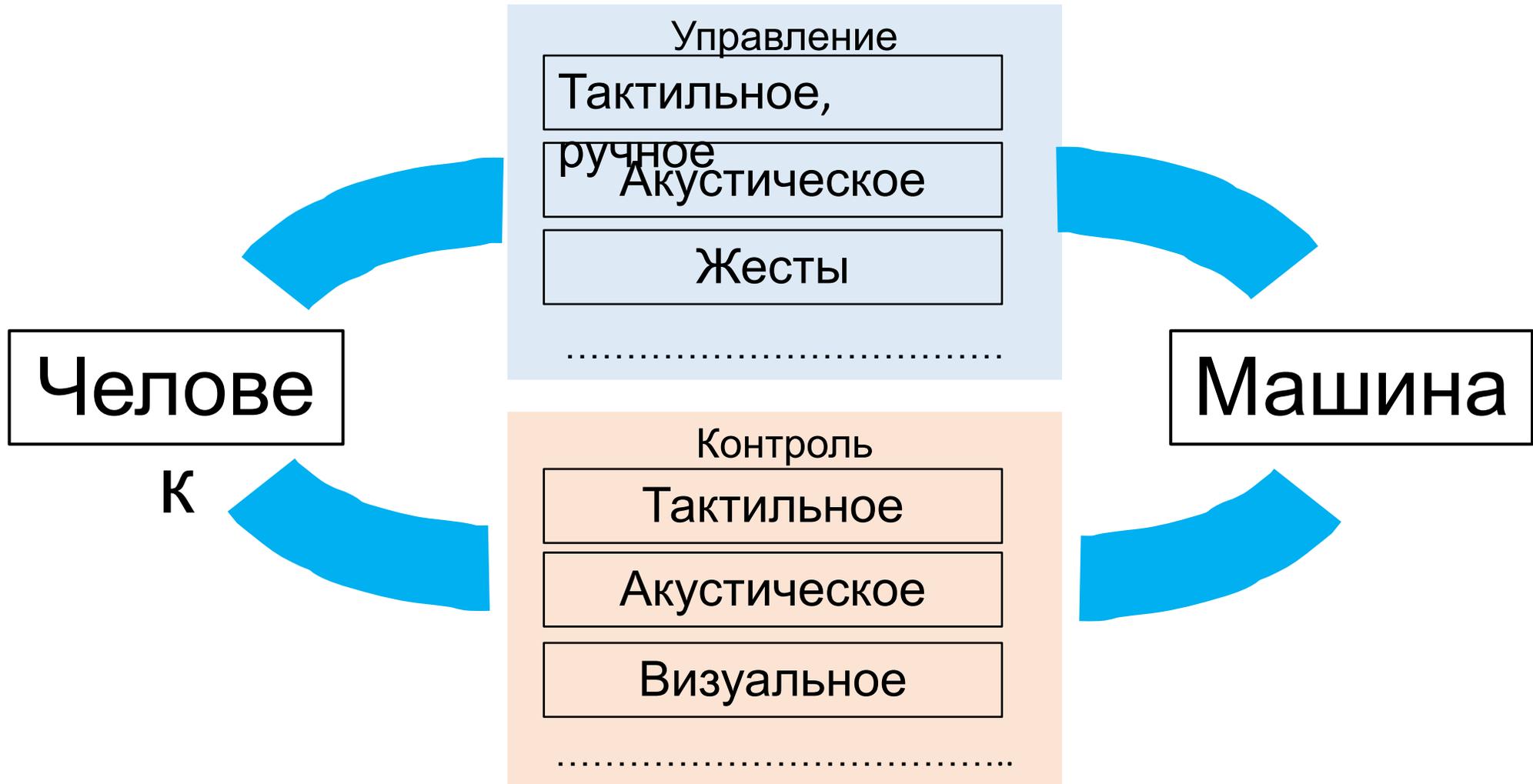
## **Основные задачи инженерной психологии:**

- анализ функций человека в СЧМ;
- изучение процессов преобразования информации человеком при приеме, переработке, принятии решений и выполнении управляющих воздействий;
- разработка принципов построения рабочих мест операторов;
- изучение влияния психологических факторов на эффективность СЧМ;
- разработка принципов и методов профессиональной подготовки операторов в СЧМ;
- разработка теории инженерно - психологического проектирования и ее использование при разработке СЧМ.

# Виды взаимодействия Ч - Р



# Каналы связи Ч - М



# Проектирование СЧМ

Эффективность работы СЧМ зависит от согласованности действий человека - оператора и отдельных подсистем ТС.

Человек – оператор (или оператор) может выполнять различные функции, в частности:

- постановка целевых задач (определение критериев, рисков и пр.);
- планирование (стратегическое, оперативно-тактическое) наблюдений, например, поиска;
- непосредственное (или интерактивное) управление ОУ (ТС),
- решение частных задач наблюдения и пр.;
- контроль работы ТС и т.д.

# Проектирование СЧМ

В настоящее время при разработке СЧМ используется подход, называемый системотехническим проектированием, при котором учитываются взаимосвязи отдельных устройств, входящих в систему, а человек рассматривается как одна из неотъемлемых составных частей СЧМ.

Разработка включает техническое, художественное и инженерно-психологическое проектирование.

**Техническое проектирование** включает разработку технической части СЧМ, включая ее программно-аппаратный облик.

**Художественное проектирование** обеспечивает требуемый уровень потребительских свойств системы.

**Инженерно-психологическое** проектирование заключается в согласовании (распределении) функций человека и техники.

# Этапы технического проектирования СЧМ

1. Разработка сценария работы СЧМ (целевые функции, решаемые задачи, условия функционирования).
2. Оценка требований и ограничений (точность, надежность, производительность).
3. Выявление базовых рабочих функций (для М: *движение прямо с  $V=...$ , поворот с  $R=...$* , для Ч: *съём информации с цифрового индикатора с частотой  $...$ , перемещение штурвала с угловой скоростью  $...$*  ).
4. Разработка технического задания (ТЗ) на СЧМ, включая подсистемы Ч и М.
5. Оценка физической реализуемости.
6. Разработка облика.

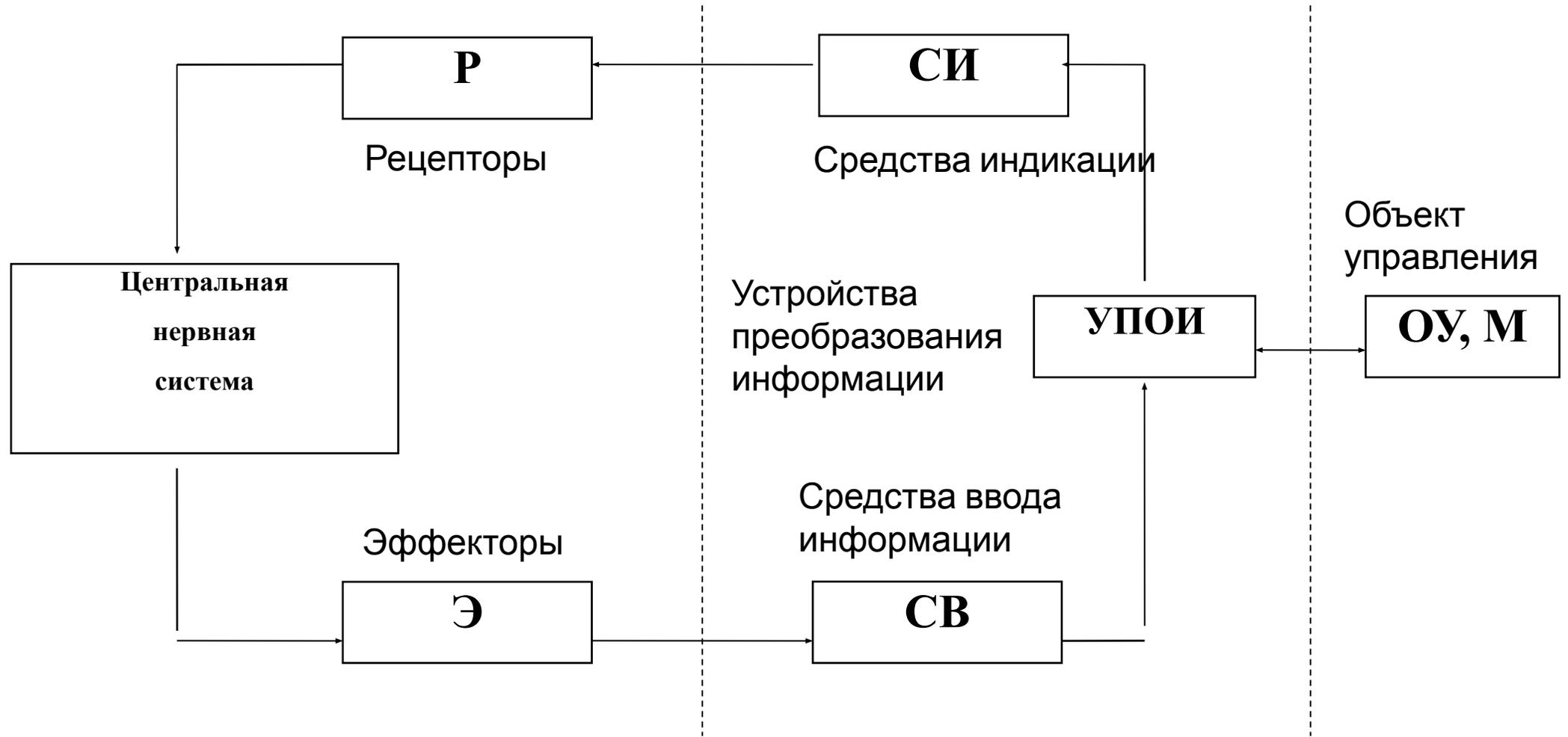
# Структура СЧМ

Информация о состоянии объекта управления (ОУ), например, манипулятора, выдается устройством преобразования и обработки информации (УПОИ) на средства индикации (СИ) (в общем случае - средства воспроизведения информации). Информация может выдаваться в виде изображения наблюдаемой сцены, координат захватного устройства и т.д.

Человек-оператор (Ч-О) воспринимает информацию с помощью рецепторов (Р). Решения, принимаемые человеком, реализуются в виде соответствующих действий с помощью эффекторов (Э) - органов движения или речи, воздействующих на средства ввода (СВ). Например, может быть принято решение о переводе захватного устройства в другую область рабочего пространства.

Устройства отображения информации (УОИ) - технические средства, используемые для создания динамических информационных моделей управляемых или контролируемых объектов.

# Схема СЧМ



# Характеристики оператора. Анализаторы

При проектировании СЧМ оператор рассматривается как одно из звеньев данной системы. В частности, при исследовании КСН необходимо рассматривать структуру КСН с включенным звеном «человек - оператор».

- Входными характеристиками звена являются характеристики анализаторов.
- К одной из основных характеристик анализаторов человека относится чувствительность.
- Нижний абсолютный порог чувствительности характеризует минимальную величину раздражителя, вызывающую ощущение.
- Верхний абсолютный порог чувствительности - максимальная величина раздражителя, нарушающая деятельность анализатора или вызывающая боль.

**Абсолютная чувствительность анализатора** вычисляется по формуле

$$\delta = 1/ J,$$

где  $J$  - интенсивность раздражителя, соответствующая нижнему абсолютному порогу чувствительности.

*Человек ощущает звуки в области частот от 16 - 20 Гц до 20 - 22 кГц и цветовые сигналы в диапазоне длин волн от 380 до 760 нм. Наибольшая чувствительность глаз лежит в спектре от 500 до 600 нм.*

# Характеристики оператора

**Дифференциальный порог чувствительности (ДПЧ)** анализатора (порог различения) определяется минимальной разницей между интенсивностями двух раздражителей, когда в ощущении они отражаются как различные.

ДПЧ в известной степени характеризуют разрешающую способность анализатора. Например, для зрительного анализатора минимальное значение ДПЧ

$$\Delta B/B \approx 0,01,$$

где  $\Delta B$  - разница уровней яркости при  $B \approx 10 \text{ кд/м}^2$ .

Для слухового анализатора

$$\text{ДПЧ} \approx 0,1.$$

Для тактильного

$$\text{ДПЧ} \approx 0,3.$$

Оперативный порог различения определяется наименьшей величиной различия между сигналами, при которой точность и скорость различения достигают максимума. Обычно оперативный порог в 10 - 15 раз больше дифференциального.

# Характеристики оператора. Анализаторы

**Прямой яркостный контраст** вычисляется по формуле  $K_n = (B_\phi - B_u)/B_\phi$ , где  $B_u$  - яркость изображения,  $B_\phi$  - яркость фона.

**Обратный яркостный контраст** обычно рассчитывается, если  $B_\phi < B_u$ ,  $K_o = (B_u - B_\phi)/B_u$ .

*Для нормальной работы оператора необходимо, чтобы величина яркостного контраста была не менее 0,65.*

Соотношение, связывающее два уровня яркости, например  $B_1$  и  $B_2$  называется **контрастностью**  $K = B_1/B_2$ .

**Пороговый контраст** определяет относительную величину минимально различимого контраста, при котором на общем фоне один объект (с яркостью  $B_1$ ) отличается от другого (с яркостью  $B_2$ )  $K_{пор} = (B_1 - B_2)/B$ , где  $B = (B_1 + B_2)/2$ .

Величина, обратная пороговому контрасту, называется **контрастной чувствительностью**  $S_k = 1/K_{пор}$ .

**Острота зрения  $\beta$**  является основной пространственной характеристикой и равна обратной величине наименьшему расстоянию между двумя отдельно различимыми точками.

Это минимальное расстояние (в угловых минутах) называется **порогом остроты зрения**. Порог нормальной остроты зрения принимается равным 0,5 - 1 угл. мин.

Порог остроты зрения зависит от ряда факторов, в частности, уменьшается с ростом яркостного контраста и яркости фона.

Линейный ( $h$ ) и угловой размеры ( $\alpha$ ) изображения при расстоянии ( $D$ ) считывания связаны соотношением

$$h = 2D \operatorname{tg}(\alpha/2).$$

# Основные характеристики оператора

**Основными характеристиками Ч являются:**

- быстроедействие,
- пропускная способность оператора,
- точность,
- надежность,
- психическая напряженность.

**Быстроедействие** характеризует время решения задачи оператором от момента появления сигнала до окончания выполнения управляющих действий (в простых случаях):

$$T_0 = a + bI,$$

где  $a$  - затраты времени от момента поступления информации до реализации решения,  $b$  - время, необходимое на переработку единицы информации,  $I$  - количество перерабатываемой информации.

# Основные характеристики оператора

Выполнение определенного действия в ответ на известный, но внезапно появившейся сигнал, реализуется на основе **простой сенсомоторной реакции**.

Время решения подобной задачи складывается из **латентного периода реакции** (от момента появления сигнала до начала движения) и **моторного компонента**, в течении которого выполняется ответное действие.

## Латентный период:

- для тактильного анализатора простой сенсомоторной реакции составляет 90 - 200 мс,
- для зрительного - 150 - 220 мс,
- для слухового - 120 - 180 мс,
- при температурном воздействии 280 - 1600 мс.

Если оператору предъявляется один из  $n$  заранее известных сигналов и он должен выбрать соответствующее движение, то латентный период такой **дизъюнктивной реакции (реакции выбора)** рассчитывается как

$$T_p = a + b \log n_1,$$

где  $a$  - коэффициент, эквивалентный времени простой реакции при наличии временной неопределенности в экспериментальной ситуации,  $b$  - коэффициент, учитывающий прирост времени реакции с увеличением стимульной неопределенности,  $n_1$  - число вариантов выбора.

# Пропускная способность оператора

Оценка **пропускной способности (С) оператора**, характеризующей скорость приема и переработки информации, связана с решением ряда проблем.

В частности, пропускная способность зависит от психофизиологических особенностей конкретного человека, сложности деятельности, условий работы, вида принимаемой и перерабатываемой информации и т.д..

Например при считывании символьной информации

$$C = I/T = (n \log_2 R) / T,$$

где  $I$  - объем принимаемой информации [бит],  $n$  - число правильно считанных символов,  $R$  - длина алфавита,  $T$  - время считывания и отображения всех символов.

Средняя пропускная способность человека:

- при чтении “про себя” равна 45 бит/с,
- при громком чтении -30 бит/с,
- при сложении или умножении двух цифр -12 бит/с,
- при счете предметов - 3 бит/с,
- при одноактном опознании букв или цифр  $C \cong 55$  бит/с.

В рабочих условиях при опознании предъявляемой информации реальная пропускная способность оператора не превышает 5,5 бит/с, а при необходимости переработки и передачи информации пропускная способность уменьшается в десятки раз.

# Точность работы оператора

- Показатель точности может относиться к различным параметрам и определяет степень соответствия выполнения им определенных функций предписанному алгоритму. . Так, под точностью работы оператора может пониматься степень соответствия считанного значения параметра значению, отображаемому на индикаторе, или на самолете - степень выдерживания курса (скорости, высоты).
- Точность работы оператора зависит от его психофизиологических характеристик, степени его обученности (тренированности), сложности выполняемых задач, условий работы и других факторов.
- Количественной оценкой точности являются погрешности. Систематические погрешности оператора могут устраняться поправками. Случайные погрешности оцениваются среднеквадратической погрешностью.

# Надежность оператора

**Надежность оператора** - это способность выполнять в полном объеме возложенные на него функции при определенных условиях работы. Оценивается показателями, аналогичными показателям надежности ТС [разд. над].

Так, вероятность безошибочной работы оператора при определенных условиях в течении заданного времени  $t$  равна

$$P_q(t) = P(T > t),$$

где  $T$  - случайная величина времени безотказной работы.

Вероятность безошибочного выполнения оператором заданного алгоритма работы в течении времени  $t$  вычисляется по формуле

$$P_q(t) = P_0 P(T_a \leq t),$$

где  $P_0$  - вероятность безошибочного выполнения алгоритма,  $P(T_a \leq t)$  - вероятность своевременного выполнения алгоритма.

Точность и надежность работы оператора в существенной степени зависят от его психической напряженности. При определении напряженности оператора учитываются: коэффициент загруженности, период занятости, длина очереди (заявок на обработку информации), время пребывания информации на обработке, скорость поступления информации.

Для комфортной работы оператора необходимо, чтобы коэффициент загруженности

$$\eta = \tau_0 / T_d \leq 0,75,$$

где  $\tau_0$  - время, в течении которого оператор занят обработкой информации,  $T_d$  - общее время дежурства.

Рекомендуется, чтобы время непрерывной работы (период занятости) оператора не превышало 15 мин.

# Динамические модели оператора

- Если оператор управляет объектами в составе замкнутой динамической системы, то для исследования его работы используются передаточные функции вида

$$W_o(p) = \frac{kM(p)}{N(p)} e^{-\tau p},$$

где  $k$ ,  $\tau$  - коэффициент усиления и время запаздывания оператора,  $M(p)$ ,  $N(p)$  - полиномы.

В зависимости от решаемых задач, может выбираться различный порядок полиномов. В частности, если необходимо учитывать способность оператора к прогнозированию (учету первой и второй производных сигнала), полином  $M(p)$  должен иметь соответствующий порядок. Полином  $N(p)$  может иметь порядок от нулевого до четвертого и позволяет учитывать реакцию нервно-мышечной системы, свойство фильтрации высокочастотных составляющих и т.д.

В простейших случаях используется следующая передаточная функция оператора

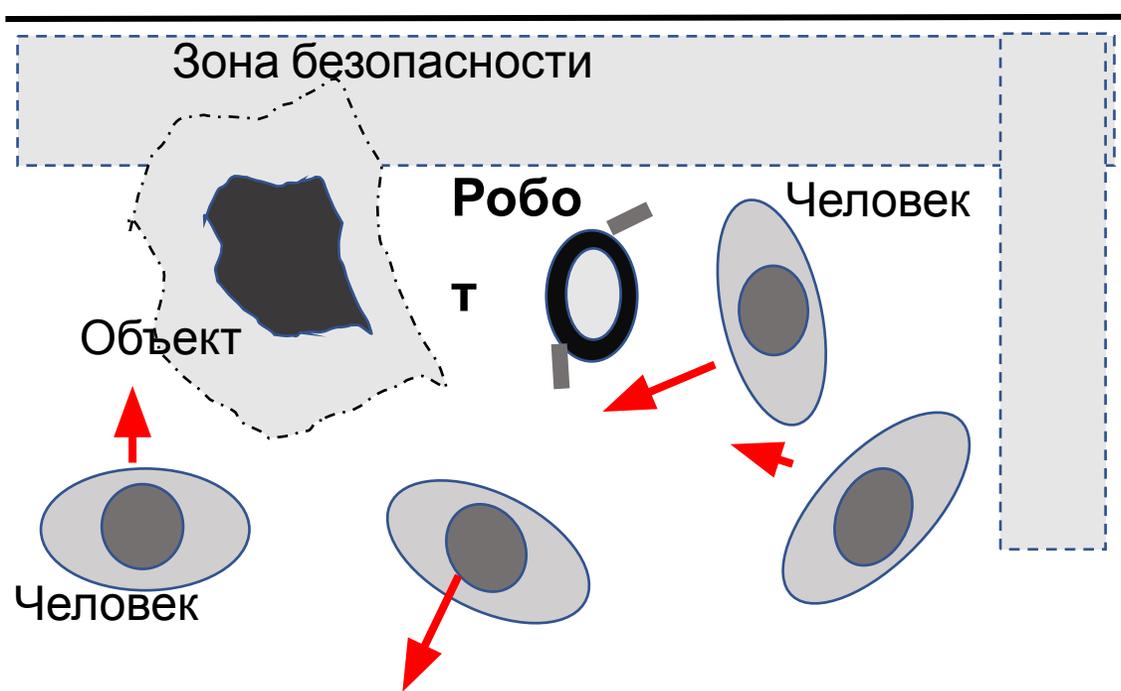
$$W_o(p) = \frac{k}{T_0 p + 1} e^{-\tau p},$$

где  $T_0 \geq 0,1$ с - постоянная времени оператора.

# Безопасность человека – основа робототехники

## Коллаборативные роботы - коботы

При проектировании автономных роботов необходимо руководствоваться указаниями международного стандарта **ISO/TS 15066 “Robot and Robotic Devices – Collaborative robots”**, предусматривающего меры по обеспечению безопасности людей при их взаимодействии с роботами.

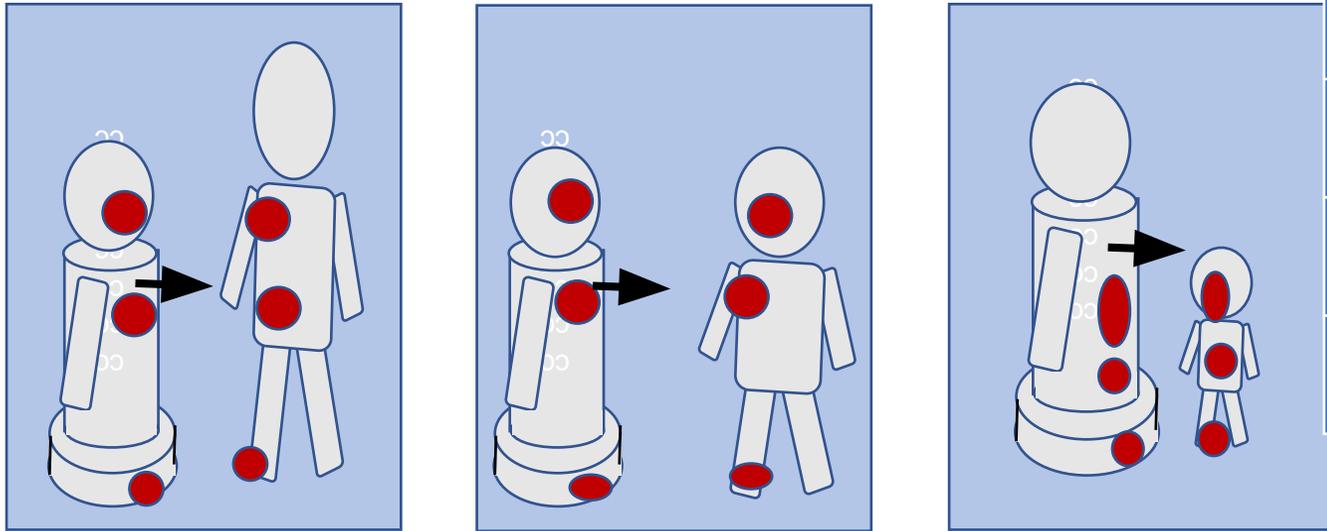


Факторы, влияющие на безопасность человека:

- допустимые усилия (силы, давление), возникающие при квази – статических контактах;
- допустимые усилия, возникающие при динамических контактах (transient contact);
- допустимая передача энергии от робота человеку.

# Контакт человек - робот

## Варианты столкновений человека и робота



Пятна на роботе, покрашенные красным цветом, показывают области возможных контактов.

Область контакта	$m_H$ кг	$K$ н/мм	$E_{max}$ j
Лицо	4,4	75	0,11
Плечо	40	35	2,5
Живот	40	10	2,4
Нога	75	60	0,52

$m$  – масса отдельных частей тела взрослого человека,

$K$  – коэффициенты жесткости (аналог жесткости пружины),

$E$  – максимально допустимая передаваемая энергия.

# 15, 16 Лк. Промышленные роботы. Манипуляторы

1. Основные понятия;
2. Классификация манипуляторов по управлению;
3. Кинематические схемы;
4. Степени подвижности. Движения;
5. Конструкции;
6. Коэффициент сервиса;
7. Построение системы координат;
8. Управление.

Манипуляционным роботом называют техническое устройство (машина), предназначенное для выполнения работ универсального характера, исполнительными устройствами которого служат манипуляторы (механические руки).

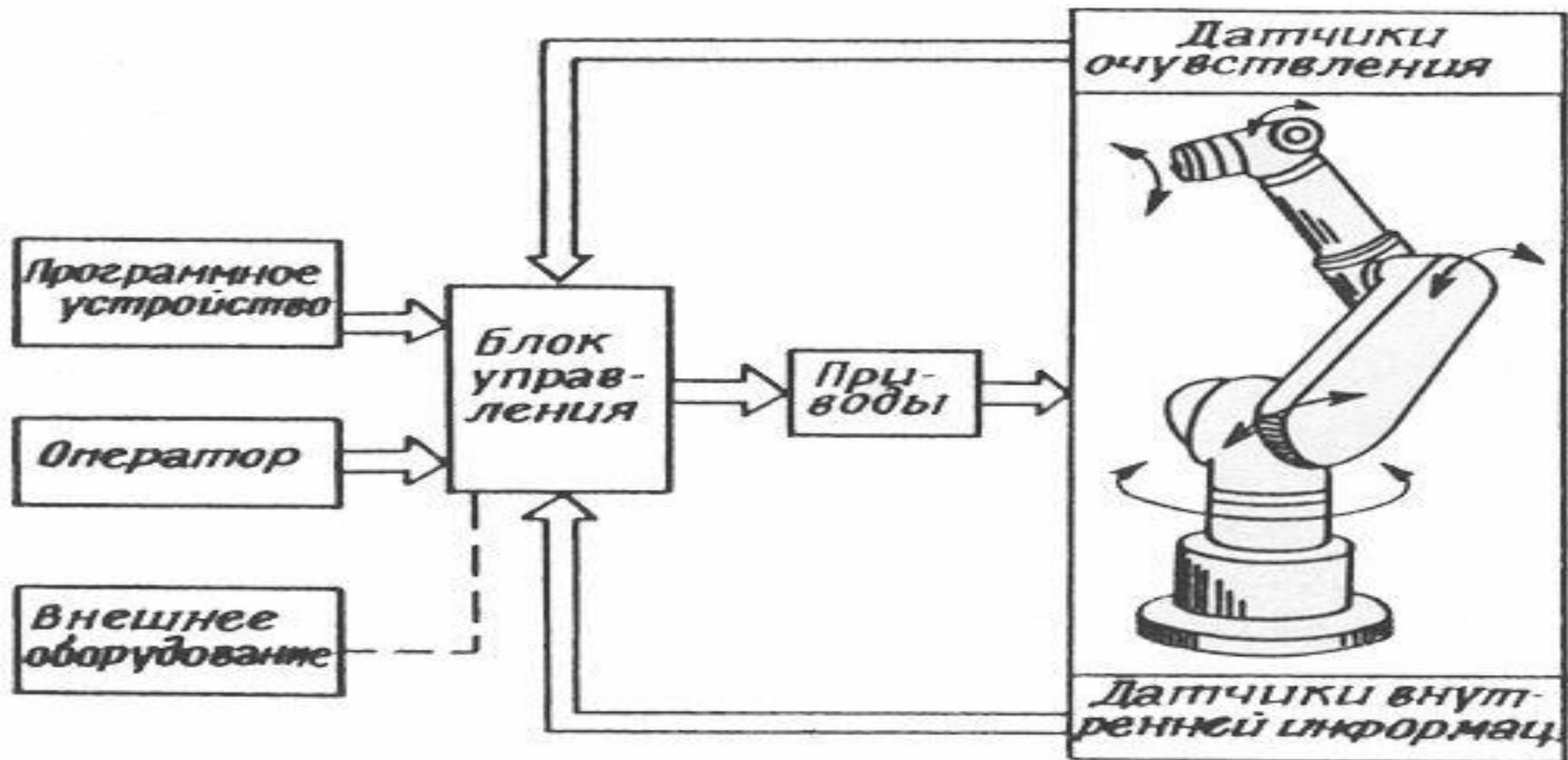
- **Число степеней подвижности** манипулятора – сумма возможных координатных движений объекта манипулирования относительно опорной системы (стойки, основания) робота.
- **Рабочее пространство** манипулятора – пространство, в котором может находиться исполнительный орган робота в момент работы.
- **Зона обслуживания манипулятора** – часть рабочего пространства, где полностью сохраняются заданные (паспортные) значения технических характеристик манипулятора.
- **Достижимость** – представляет количественную оценку величины объема рабочего пространства.
- **Границы достижимости манипуляционной системы** – границы рабочего пространства, т.е. границы до которых робот может дотянуться своей характерной точкой (исполнительным органом).
- **Манипулятивность** – свойство манипулятора правильно ориентировать захватное устройство. По мере приближения захвата к границам рабочего пространства, свойство манипулятивности уменьшается, а на границе достижимости полностью утрачивается.
- **Мобильность** – свойство манипулятора, оценивающее достижимую скорость перемещения характерной точки захвата в рабочем пространстве. В каждой конфигурации манипуляционной системы достижимые скорости захвата составляют определенный интервал, ограничиваемый возможностями приводов отдельных звеньев.
- **Приемистость** – свойство, оценивающее ускорение характерной точки захвата манипулятора в момент его трогания из положения покоя. Достижимые ускорения, как и достижимые скорости, в каждой конфигурации манипуляционной системы составляют определенный интервал.
- **Точность** (Погрешность позиционирования) – отклонение заданной позиции исполнительного механизма от фактической при многократном позиционировании (повторении движения). Погрешность отработки траектории рабочего органа манипулятора – отклонение фактической траектории от заданной по программе.
- **Податливость** – свойство исполнительной системы реагировать на управляющие воздействия. Это свойство сильно влияет на точность манипулятора.
- **Грузоподъемность манипулятора** – наибольшая масса объектов манипулирования (включая массу захватного устройства), которые могут перемещаться манипулятором при заданных условиях (при максимальной или минимальной скорости, при максимальном разворачивании звеньев и т.д.).
- **Экономность**
- **Быстродействие**

В зависимости от степени участия человека в управлении манипуляционные роботы подразделяются на три типа: автоматические, биотехнические и интерактивные.

В автоматических манипуляционных роботах выделяют три разновидности в зависимости от связи с человеком-оператором: **программные, адаптивные и интеллектуальные.**

- **Программные роботы** работают по жесткой программе, заложенной в устройстве памяти, однако их можно перенастраивать на работу с другой жесткой программой действий. Их также называют автоматическими программными манипуляторами или промышленными роботами. Простота изменения программы, т. е. возможность переобучения промышленных роботов новым операциям, сделала эти роботы достаточно универсальными и гибко перенастраиваемыми на различные классы задач.
- **Адаптивные роботы** отличаются от программных большим количеством внешних (оптических, телевизионных, тактильных) и внутренних датчиков. Важной частью адаптивных роботов является их развитое программное обеспечение, предназначенное для обработки информации, поступающей от внешних и внутренних датчиков и оперативного изменения программы движения. Благодаря способности воспринимать изменения во внешней среде и приспосабливаться к существующим условиям функционирования адаптивные роботы могут манипулировать с неориентированными деталями произвольной формы и производить сборочные операции.
- **Интеллектуальные роботы** могут вести диалог с человеком, распознавать и анализировать сложные ситуации, планировать движения манипулятора и осуществлять их реализацию в условиях ограниченной информации о внешней среде. Все это обеспечивается совершенством управляющих систем, включающих в себя элементы искусственного интеллекта, способность к обучению и адаптации в процессе работы.

# Автоматический манипуляционный робот



# Биотехнические манипуляционные роботы

- Различают три разновидности управления биотехническими манипуляционными роботами: **копирующее, командное и полуавтоматическое.**
- **Копирующее управление** осуществляется с помощью задающего устройства, кинематически подобного исполнительной руке робота. Такие системы называют копирующими манипуляторами. Человек-оператор перемещает задающее устройство, а манипулятор повторяет эти движения одновременно по всем степеням подвижности.
- В случае **командного управления** оператор с командного устройства дистанционно задает движение звеньям манипулятора путем поочередного включения соответствующих приводов.
- При **полуавтоматическом управлении** оператор, манипулируя управляющей рукояткой, имеющей несколько степеней свободы, задает движение схвата манипулятора. ЭВМ по сигналу от управляющей рукоятки формирует сигналы управления на приводы всех звеньев манипулятора.
- Существуют также биотехнические системы, в которых управление манипулятором осуществляется при помощи биоимпульсов от соответствующих мышц человеческой руки.

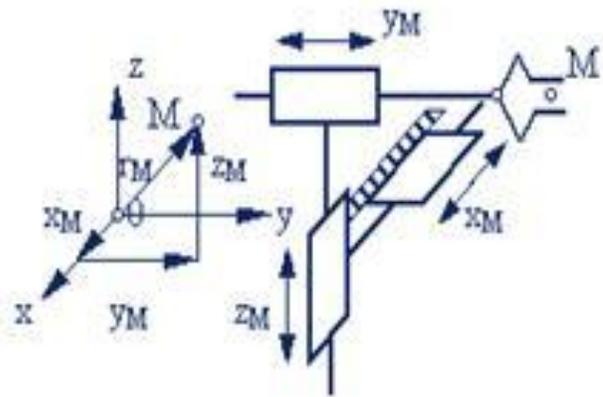
# Интерактивные манипуляционные роботы

отличаются активным участием человека в процессе управления, которое выражается в различных формах взаимодействия его с ЭВМ.

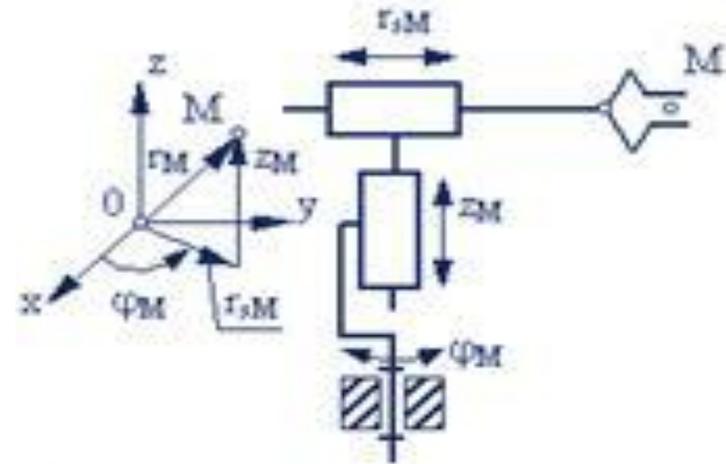
Различают три разновидности управления: **автоматизированное, супервизорное и диалоговое.**

- При **автоматизированном управлении** простые операции робот выполняет без управляющего воздействия со стороны оператора, а остальные - при участии оператора в биотехническом режиме.
- **Супервизорное управление** отличается тем, что весь цикл операций разбивается на части, выполняемые манипуляционным роботом автоматически, но переход от одной части к другой осуществляется оператором путем подачи соответствующих команд.
- При **диалоговом управлении** оператору и ЭВМ представляется возможность совместно принимать решения и управлять манипулятором в сложных ситуациях.

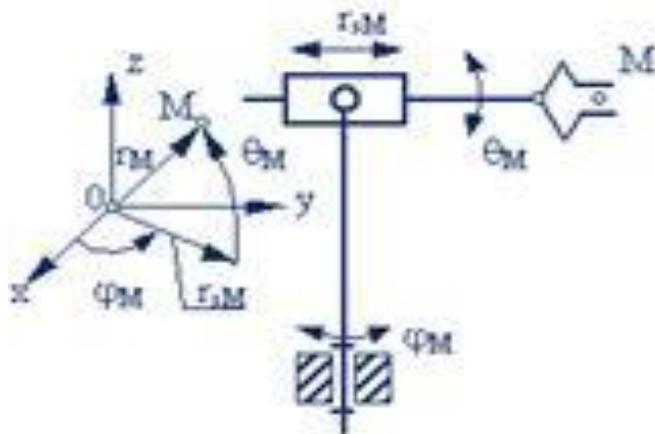
# Кинематические типы манипуляторов



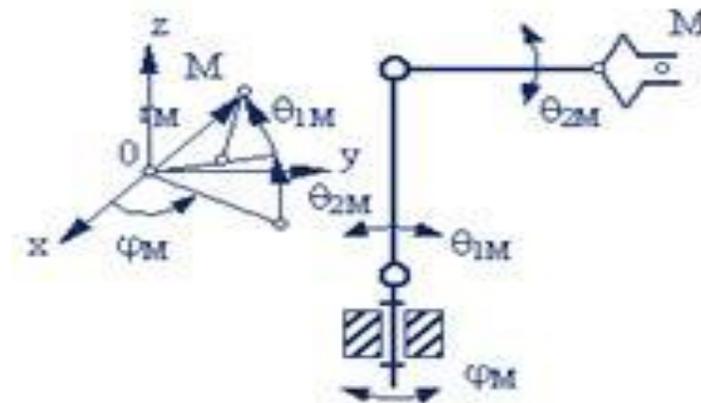
Декартовый тип



Цилиндрический тип



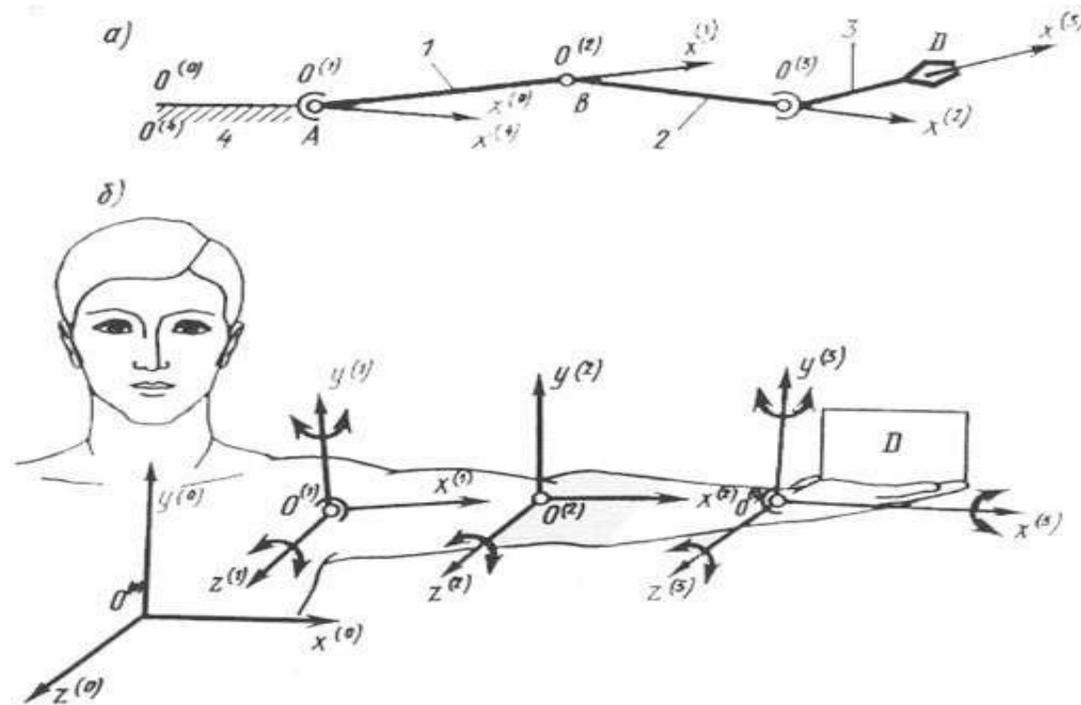
Сферический тип



Ангулярный тип

# Выбор кинематической схемы манипулятора

В процессе выполнения операций с объектами манипулирования в большинстве случаев манипуляторы имитируют движение рук человека. Поэтому структурная схема манипулятора должна обладать кинематическими характеристиками, аналогичными характеристикам руки человека.



# Формула Сомова-Малышева

## Оценка степени подвижности

Структурная формул кинематической цепи общего вида

$$W=6n-p_1-2p_2-3p_3-4p_4-5p_5,$$

где  $n$  – число подвижных звеньев кинематической цепи,  
 $p_i$  – число пар  $i$ -го класса

### Для руки:

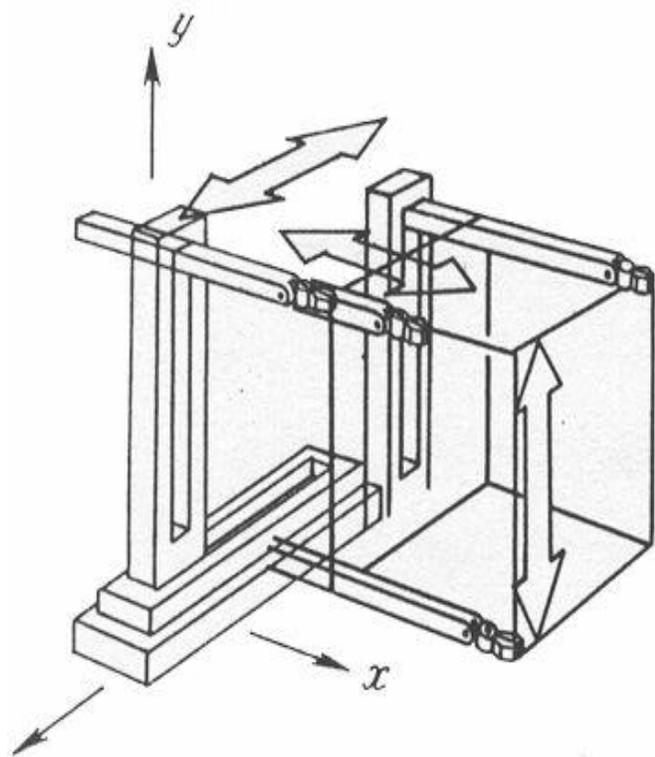
- Плечевой сустав – три степени свободы ( $p_3$ ),
- Локтевой сустав – одна степень свободы ( $p_5$ ),
- Предплечье – ( $p_5$ ),
- Лучезапястный сустав ( $p_4$ ),.
- $W = 7$

# Движения манипулятора

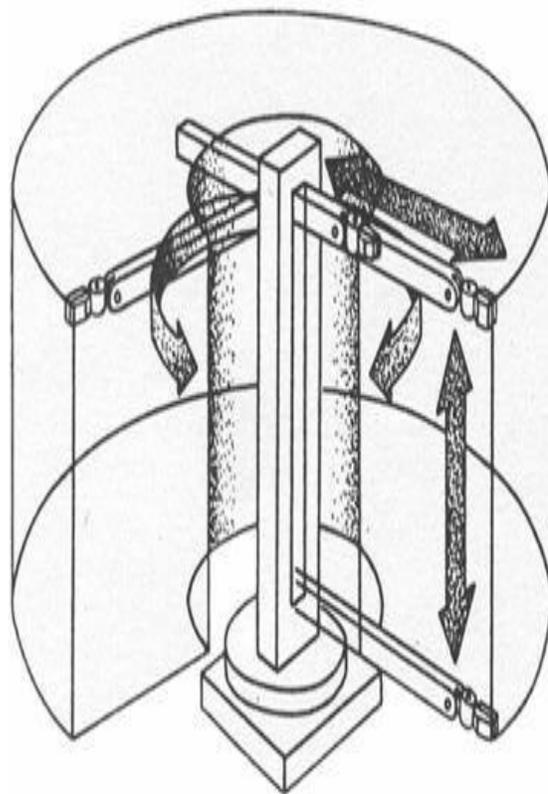
Выделяют три основные группы движений: **глобальные, региональные и локальные.**

- **Глобальные движения** осуществляются путем перемещения подвижного основания робота с помощью двигательной системы. В стационарных роботах глобальные движения отсутствуют. Их станины неподвижно крепятся к полу, кронштейну или потолку возле технологического оборудования.
- **Региональные движения** - перемещения схвата робота в различные зоны рабочего пространства, определяемого размерами звеньев манипулятора.
- **Локальные движения** - перемещения схвата, соизмеряемые с его размерами, в частности ориентация в малой зоне рабочего пространства.

# Конструкции манипуляторов

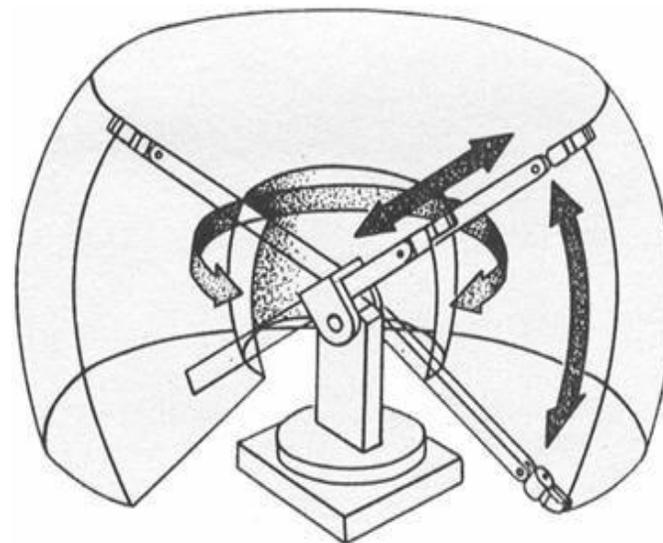


Максимальная  
точность

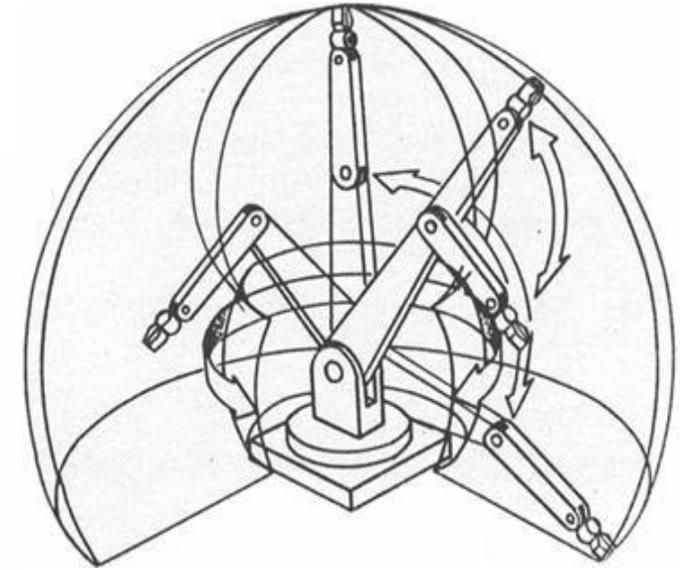
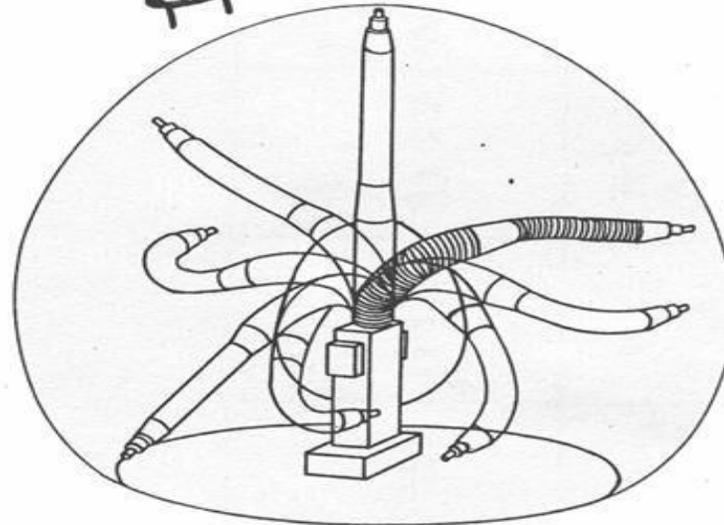
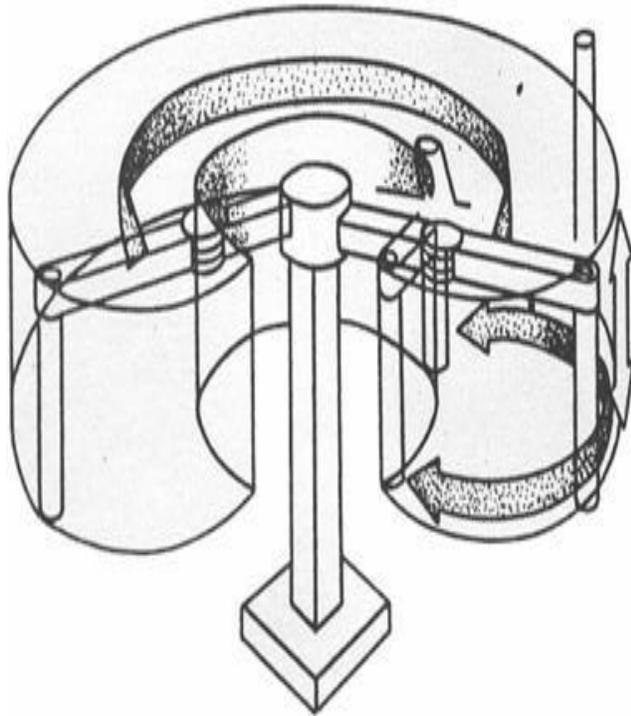


Линейное перемещение  $\Delta x$  от  
угла поворота  $\alpha$

$$\Delta x = L \sin \alpha$$

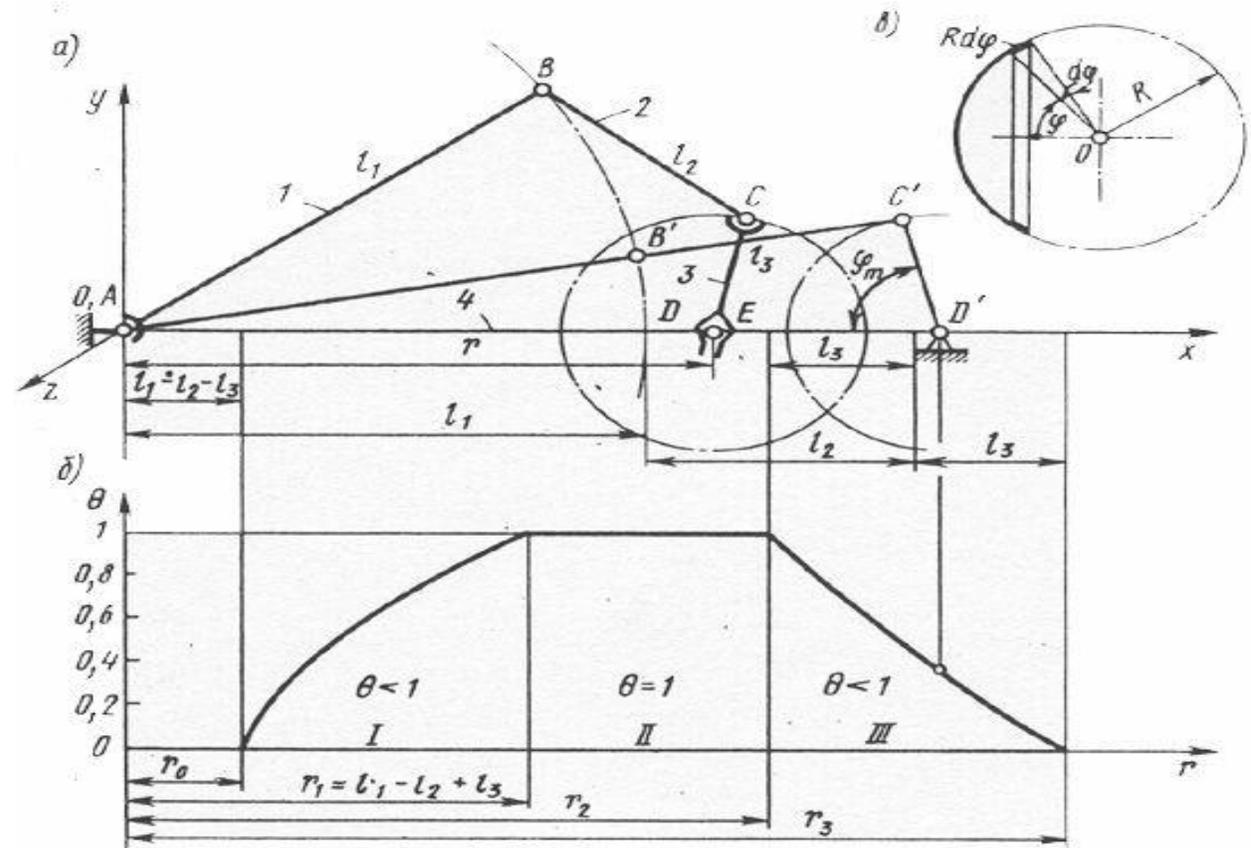
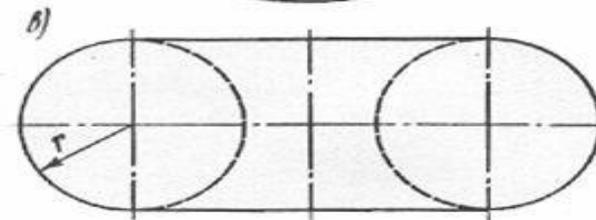
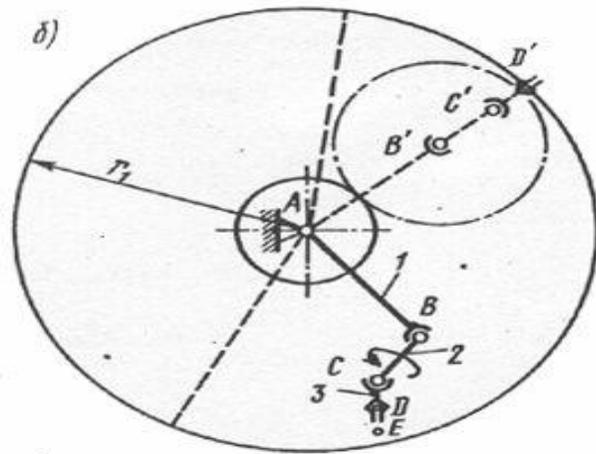
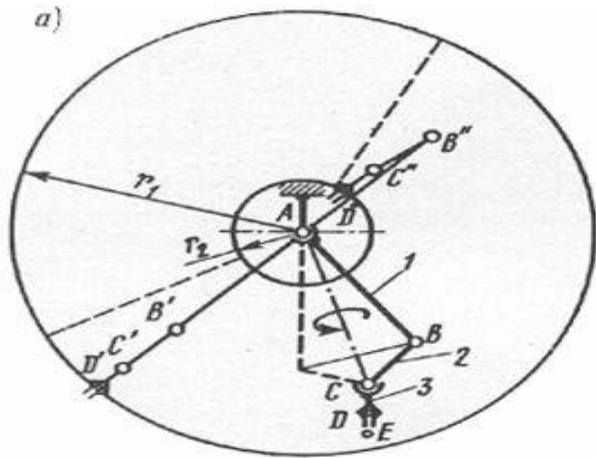


# Конструкции манипуляторов

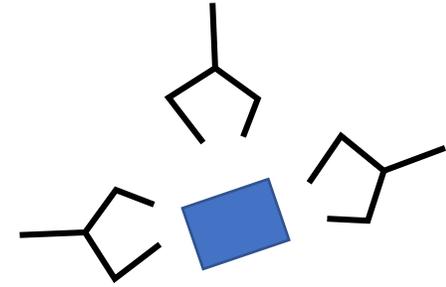


Минимальная  
точность

# Подвижность схвата



# Коэффициент сервиса



Сервис является качественной характеристикой манипулятора. Для сравнительной оценки манипуляторов пользуются коэффициентами (от 0 до 1) линейного, углового, пространственного и объёмного сервиса, значения которых определяются соответственно из соотношений:

$$\begin{aligned} K_L &= \frac{L}{L_{\text{max}}} \\ K_A &= \frac{\alpha}{\alpha_{\text{max}}} \\ K_S &= \frac{S}{S_{\text{max}}} \\ K_V &= \frac{V}{V_{\text{max}}} \end{aligned}$$

где  $L, \alpha, S, V$  - величины линейного, углового, пространственного и объёмного сервиса;

$L$  – величина линейного перемещения относительно начала базовой системы координат или полный линейный сервис;

$S, V$  – площадь зоны и объём, описываемые схватом относительно начала базовой системы координат или полный плоскостной и объёмный сервисы.

# Построение системы координат

Построение СК Денавита-Хартенберга для манипулятора с  $N$  степенями свободы ( $N-1$  звеньев)

1. Построение абсолютной системы координат.

Построить правую ортогональную систему координат (СК)  $O_0X_0Y_0Z_0$ , направив  $Z_0$  вдоль оси первого сочленения в направлении схвата.

2. Инициализация и цикл.

Для всех  $i = 1, 2, \dots, N$  выполнить шаги 3-6.

3. Построение  $Z_i$

Направить ось  $Z_i$  вдоль оси  $(i+1)$ -го шарнира. При  $i=N$  (т.е. для схвата) выберем ось  $Z_N$  в направлении оси  $Z_{N-1}$ .

4. Построение начала  $i$ -й системы координат.

Выбрать начало  $i$ -й СК в точке пересечения осей  $Z_{i-1}$  и  $Z_i$  или в точке пересечения оси  $Z_i$  и общей нормали к осям  $Z_{i-1}$  и  $Z_i$  (если оси  $Z_{i-1}$  и  $Z_i$  не пересекаются).

5. Построение оси  $X_i$ .

Направить ось  $X_i$  вдоль общей нормали к осям  $Z_{i-1}$  и  $Z_i$  (вдоль вектора  $z_{i-1} \times z_i$ , где  $z_{i-1}$  и  $z_i$  - орты соответствующей системы координат).

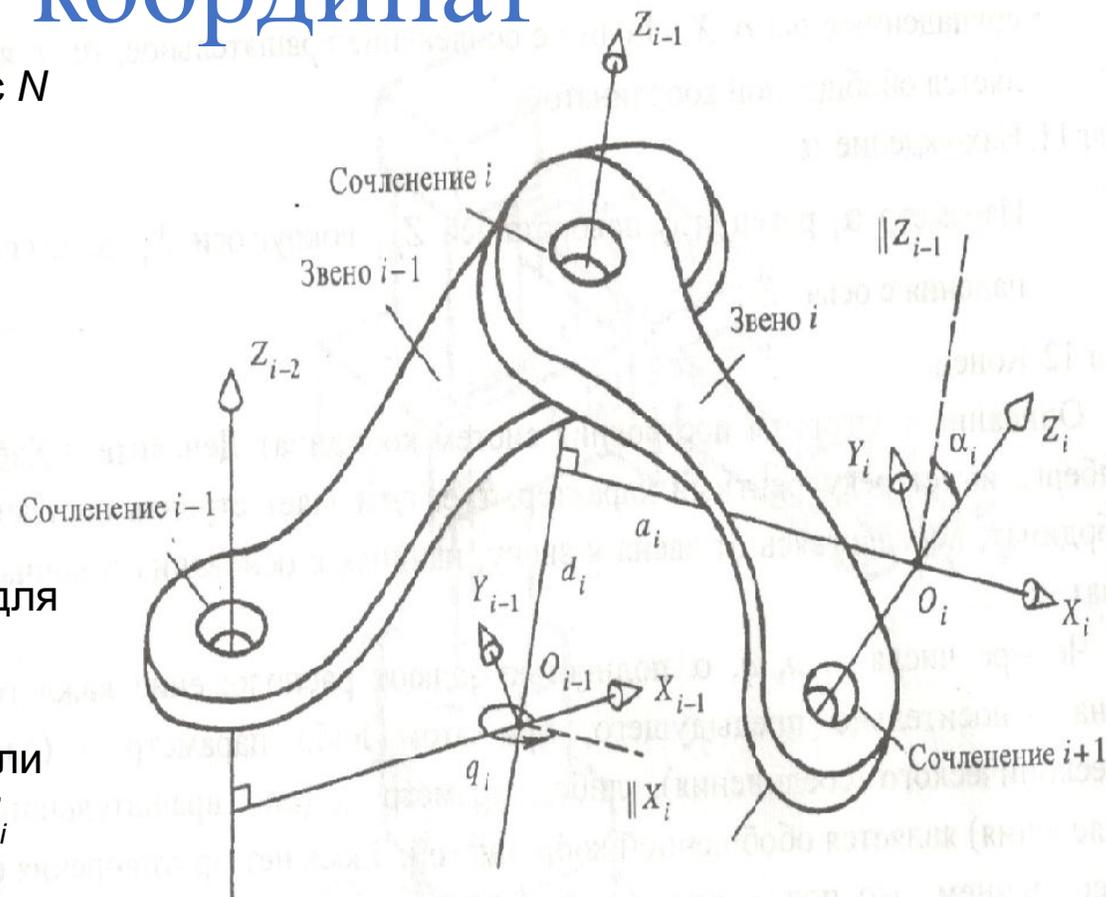


Рис. 1.19. Система координат Денавита - Хартенберга

# Построение системы координат

6. Построение оси  $Y_i$ .

Направить ось  $Y_i$  так, чтобы полученная в результате СК  $O_i X_i Y_i Z_i$  была правосторонней.

7. Нахождение параметров.

Для всех  $i = 1, 2, \dots, N$  выполнить шаги 8-11.

8. Нахождение  $d_i$ .

Параметр  $d_i$  равен расстоянию от начала  $(i-1)$ -й СК до точки пересечения осей  $Z_{i-1}$  и  $X_i$ , измеренному в направлении оси  $Z_{i-1}$ . Если  $i$ -е сочленение телескопическое, то  $d_i$  является обобщенной координатой.

9. Нахождение  $a_i$ .

Параметр  $a_i$  равен расстоянию от точки пересечения осей  $Z_{i-1}$  и  $X_i$  до начала  $i$ -й СК, измеренному в направлении оси  $X_i$ .

10. Нахождение  $q_i$ .

Параметр  $q_i$  равен углу поворота оси  $X_{i-1}$  вокруг оси  $Z_{i-1}$  до совпадения с осью  $X_i$ . Если  $i$ -е сочленение вращательное, то  $q_i$  является обобщенной координатой.

11. Нахождение  $\alpha_i$ .

Параметр  $\alpha_i$  равен углу поворота оси  $Z_{i-1}$  вокруг оси  $X_i$  до ее совпадения с осью  $Z_i$ .

12. Конец.

# Системы координат манипуляторов

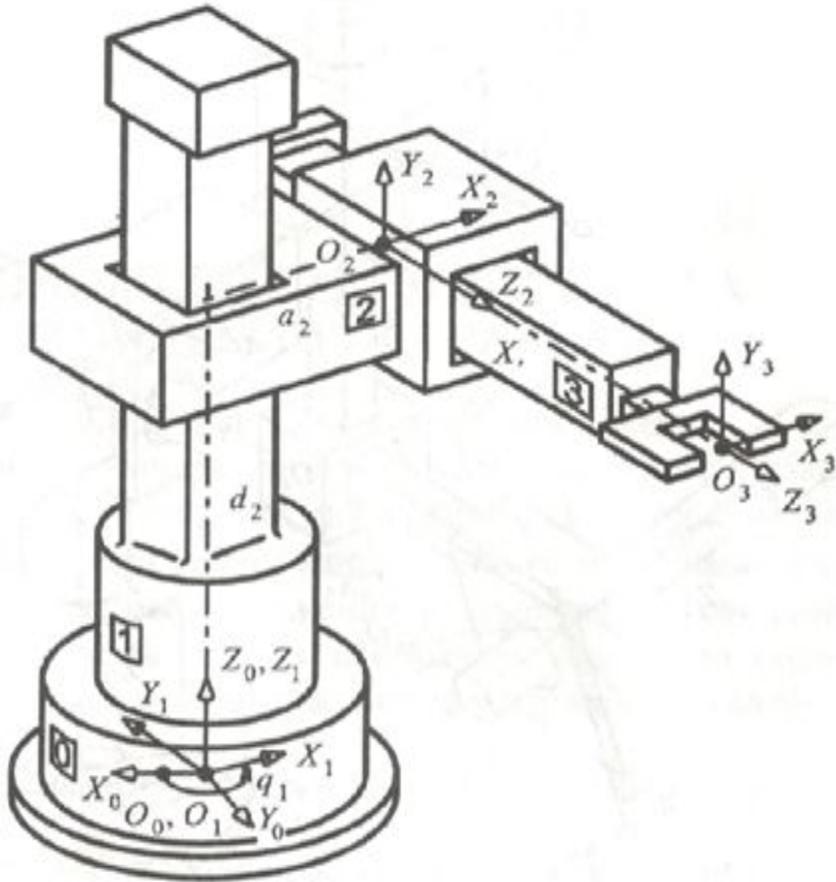


Рис. 1.20. Манипулятор М20П

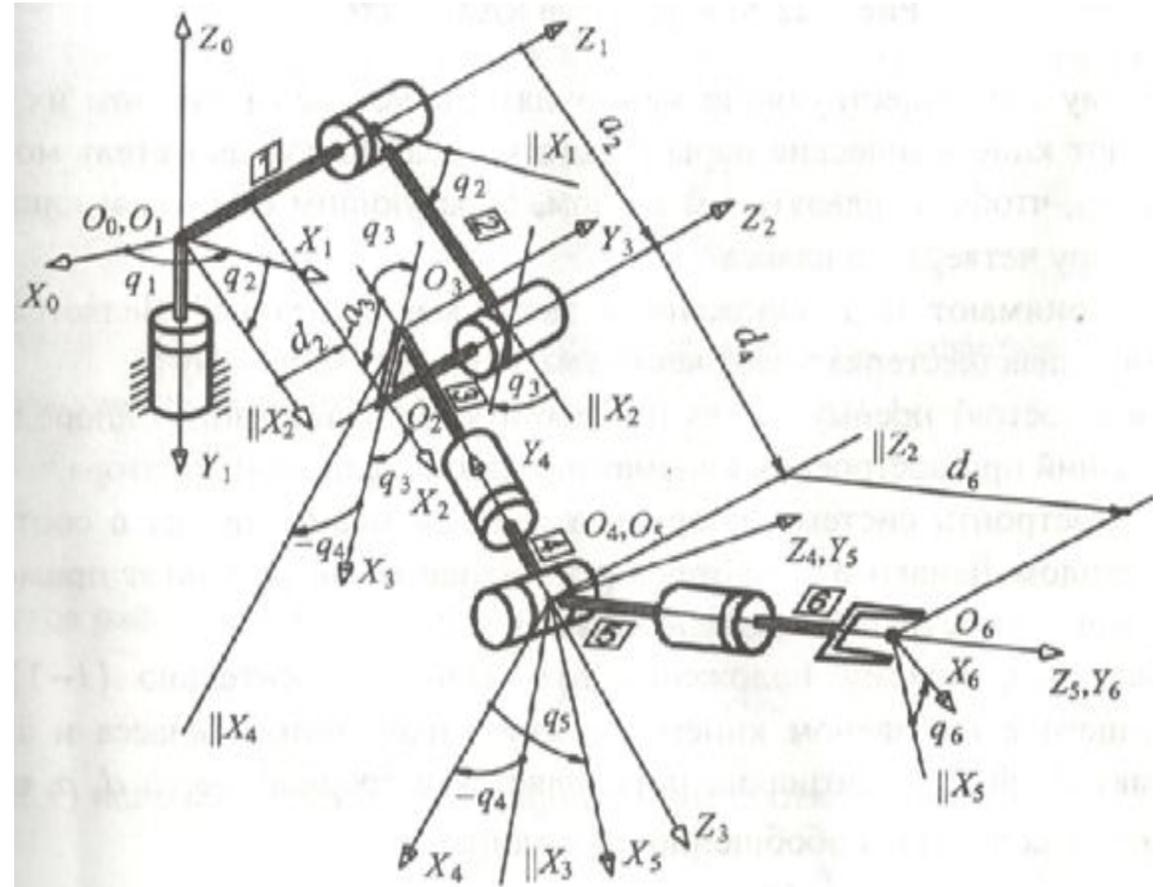


Рис. 1.22. Манипулятор PUMA-600

# Однородные координаты и преобразования

Лит-ра: Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. – 2-е изд. исправ. и доп.. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. – 480 с.: ил. (Робототехника. Под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко).

Однородными преобразованиями точки с координатами  $(a, b, c)$  в системе координат  $OXYZ$  называют четверку чисел  $(x, y, z, w)$ , такую что справедливы следующие соотношения

$$x = aw, y = bw, z = cw;$$

$$x^2 + y^2 + z^2 + w^2 = 0.$$

Однородные координаты определены неоднозначно. Если  $(a, b, c, d)$  – однородные координаты некоторой точки, то  $(\lambda a, \lambda b, \lambda c, \lambda d)$  – однородные координаты той же точки ( $\lambda \neq 0$ ).

# Однородные координаты

## Примеры

1. Найти однородные координаты точек

a.  $(0, 0, 0)$ .  $(0, 0, 0, w)$ , где  $w \neq 0$  – произвольный параметр.

b.  $(1, 1, 1)$ .  $(w, w, w, w)$ , где  $w \neq 0$ .

c.  $(5, 0, 0)$ .  $(5w, 0, 0, w)$ , где  $w \neq 0$ .

2. Найти декартовы координаты точек

a.  $(5, 6, 10, 2)$ .  $(5/2, 3, 5)$ .

b.  $(1, 1, 0, 3)$ .  $(1/3, 1/3, 0)$ .

c.  $(2w, 6w, 7w, w)$ .  $(2, 6, 7)$ , при  $w \neq 0$ . Если  $w = 0$ , то т. не существует.

# Однородные преобразования

- Однородными преобразованиями называют преобразования однородного вектора, осуществляющие его поворот, перенос, масштабирование, перспективное проектирование.

Пусть  $\rho$  – однородный вектор, в частности, однородные координаты. Однородное векторное преобразование имеет вид

$$\rho' = T\rho,$$

где  $T$  – матрица однородного преобразования 4x4 (или однородная матрица):

$$T = \begin{pmatrix} R & p \\ f^T & m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_3 \\ f_1 & f_2 & f_3 & m \end{pmatrix}.$$

$R$  – матрица поворота 3x3,  $p$  – вектор переноса;  $f$  – вектор, связанный с вектором центрального проектирования;  $m$  – коэффициент масштабирования.

# Однородные преобразования

## Примеры

1. Сдвиг

$$\rho' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_1 \\ 0 & 1 & 0 & p_2 \\ 0 & 0 & 1 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a + p_1 \\ b + p_2 \\ c + p_3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

2. Поворот

$$\rho' = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ R & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11}a + r_{12}b + r_{13}c \\ r_{21}a + r_{22}b + r_{23}c \\ r_{31}a + r_{32}b + r_{33}c \\ 1 \end{pmatrix}$$

3. Масштабирование

$$\rho' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ m \end{pmatrix}$$

# Однородные преобразования

- Взаимное положение системы координат  ${}_{0_1}UVW$  и абсолютной системы координат  ${}_{0_0}X_0Y_0Z_0$  можно задать матрицей однородных преобразований

$$T = \begin{pmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $p$  - вектор  $3 \times 1$ , задающий начало системы координат  ${}_{0_1}UVW$ , а  $R$  - матрица  $3 \times 3$ , задающая ориентацию  ${}_{0_1}UVW$  относительно  ${}_{0_0}X_0Y_0Z_0$ .

Построение системы координат Денавита – Хартенберга позволяет использовать числа  $d, a, q, \alpha$  для определения расположения каждого звена относительно предыдущего. Параметры  $d$  – перемещение (для телескопического соединения) и  $q$  – угол поворота (для вращательного сочленения) являются обобщенными координатами, параметры  $a, \alpha$  – определяют взаимное положения систем координат.

## Прямая позиционная задача

- Прямая позиционная задача формулируется так: по заданному вектору обобщенных координат манипулятора  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$  найти положение и ориентацию его схвата  $s = f(\mathbf{q})$ .

Для оценки положения и ориентации используется матрица однородных преобразований

$$T = \begin{pmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть  $A_i, i=1, 2, \dots, N$  – однородные матрицы, задающие переход от системы координат  $i$ -го звена к системе координат  $(i-1)$ -го звена. Тогда, матрица

$$T_N = A_1 A_2 \dots A_N$$

является решением поставленной задачи.

Вводя матрицу

$$T_i = A_1 A_2 \dots A_i,$$

получим

$$\begin{aligned} T_i &= T_{i-1} A_i, \quad i=1, 2, \dots, N, \\ T_0 &= E. \end{aligned}$$

# Преобразования координат

Вид матриц  $A_i$  зависит от способа выбора систем координат.

При использовании представления Денавита – Хартенберга выполняется следующая последовательность операций:

1. Поворот вокруг оси  $Z_{i-1}$  на угол  $q_i$  (оси  $X_{i-1}$  и  $X_i$  параллельны).
2. Сдвиг вдоль оси  $Z_{i-1}$  на  $d_i$  (оси  $X_{i-1}$  и  $X_i$  совпадают).
3. Сдвиг вдоль оси  $X_{i-1}$  на  $a_i$  (начала координат  $O_{i-1}$  и  $O_i$  совпадают).
4. Поворот вокруг оси  $X_{i-1}$  на угол  $\alpha_i$  (системы координат  $O_i X_i Y_i Z_i$  и  $O_{i-1} X_{i-1} Y_{i-1} Z_{i-1}$  совпадают).

# Преобразования координат

Каждая операция может быть представлена однородной матрицей

**Поворот вокруг  $Z_i$  на  $q_i$**

$$Rot(z_i q_i) = \begin{pmatrix} R_{z_i q_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

**Сдвиг вдоль  $Z_i$  на  $d_i$**

$$Trans(z_i d_i) = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$Trans(x_i a_i) = \begin{pmatrix} E & a_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

**Сдвиг вдоль  $X_i$  на  $a_i$**

$$Rot(x_i \alpha_i) = \begin{pmatrix} R_{x_i \alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

**Поворот вокруг  $X_i$  на  $\alpha_i$**

Тогда имеем

$$A_i = Rot(z_i q_i) Trans(z_i d_i) Trans(x_i a_i) Rot(x_i \alpha_i).$$

## Прямая позиционная задача

Обозначим

$$c_i = \cos q_i, \quad s_i = \sin q_i, \quad c_{ij} = \cos (q_i + q_j), \quad s_{ij} = \sin (q_i + q_j).$$

Перемножая матрицы, получим

$$A_i(d_i, a_i, q_i, \alpha_i) = \begin{pmatrix} c_i & -c_{\alpha_i} s_i & s_{\alpha_i} s_i & a_i c_i \\ s_i & c_{\alpha_i} c_i & -s_{\alpha_i} c_i & a_i s_i \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Матрица, обратная к матрице  $A_i$  (матрица перехода от  $(i-1)$ -й к  $i$ -й системе координат), имеет вид

$$A_i^{-1}(d_i, a_i, q_i, \alpha_i) = \begin{pmatrix} c_i & s_i & 0 & -a_i \\ -c_{\alpha_i} s_i & c_{\alpha_i} c_i & s_{\alpha_i} & -d_i s_{\alpha_i} \\ s_{\alpha_i} s_i & -s_{\alpha_i} c_i & c_{\alpha_i} & -d_i c_{\alpha_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

# Решение прямой задачи для двухзвенного плоского манипулятора

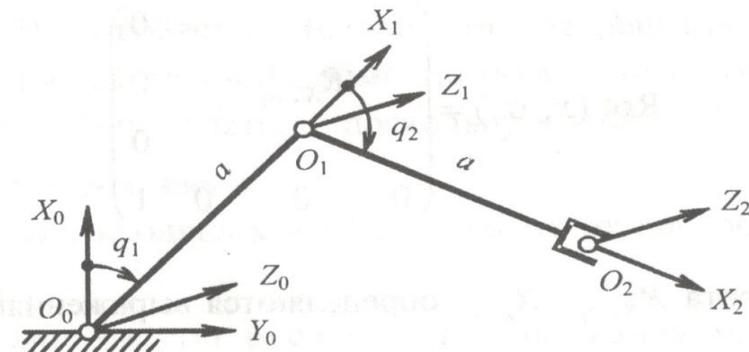
Матрицы перехода имеют вид

$$A_i = \begin{pmatrix} c_i & q_i & 0 & a_i c_i \\ s_i & c_i & 0 & a_i s_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, i=1, 2.$$

Матрицы  $T_i$ , определяющие положение звеньев в абсолютной системе координат

$$T_1 = A_1,$$

$$T_2 = A_1 A_2 = \begin{pmatrix} c_i & -s_{12} & 0 & a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & a_1 s_1 + a_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$



**Координаты центра схвата  $O_2$**

$$x = a_1 c_1 + a_2 c_{12}, y = a_1 s_1 + a_2 s_{12}. \quad C$$

**Ориентация осей  $x_2, y_2$**

$$\begin{aligned} x_{2x} &= c_{12} & x_{2y} &= s_{12} \\ y_{2x} &= -s_{12} & y_{2y} &= c_{12} \end{aligned}$$

# Обратная позиционная задача

При заданном положении ориентации схвата  $\mathbf{s} = \mathbf{s}^*$  или  $\mathbf{T}_N = \mathbf{T}_N^*$  найти обобщенные координаты  $\mathbf{q} = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_N^*)$ .

Если обозначить

$$\mathbf{s} = \mathbf{f}_s(\mathbf{q})$$

или

$$\mathbf{T}_N = \mathbf{f}_T(\mathbf{q}),$$

то искомые углы будут задаваться соотношением

$$\mathbf{q}^* = \mathbf{f}_s^{-1}(\mathbf{s}^*)$$

или

$$\mathbf{q}^* = \mathbf{f}_T^{-1}(\mathbf{T}_N^*).$$

Решение сводится к решению нелинейной тригонометрической системы шести уравнений с  $N$  неизвестными.

Решение сводится к решению нелинейной тригонометрической системы шести уравнений с  $N$  неизвестными. Не существует общего метода решения этой системы в явном виде.

Системы могут:

- не иметь ни одного решения;
- иметь единственное решение;
- иметь более одного решения (несколько или бесконечно много).

## Обратная позиционная задача

Существуют различные методы решения обратной задачи, в частности:

1. Метод обратных преобразований;
2. Итерационный метод;
3. Тригонометрический подход;
4. Нейросетевой подход:
  - формирование вариантов решения прямой задачи по всему рабочему пространству (с заданной дискретностью),
  - выбор оптимальных вариантов (по выбранным критериям),
  - нейросетевая аппроксимация  $\mathbf{q} = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_N^*)$ .

# Обратная позиционная задача

## Метод обратных преобразований

Матрица, определяющая положение и ориентацию схвата имеет вид

$$T_N = A_1 A_2 \dots A_{N-1} A_N,$$

где  $A_i = A_i(q_i)$  – матрица перехода от  $i$ -й к  $(i-1)$ -й системе координат манипулятора.

Тогда, умножая на  $A_1^{-1}$  (матрицы  $A_i$  невырожденные), имеем

$$A_1^{-1}(q_1) T_N = A_2 \dots A_{N-1} A_N.$$

Т.к. матрица  $T_N$  известна, то получено решение относительно  $q_1$ .

Если удастся найти  $q_1$ , то процесс повторяется для  $q_1, q_2, \dots, q_N$ .

# Обратная позиционная задача

## Численные методы решения обратной задачи. Метод Ньютона

Рассматривается задача поиска корня уравнения

$$f(q) = s^*,$$

где  $s^*$  - заданное положение схвата.

Если для решения некоторого скалярного уравнения

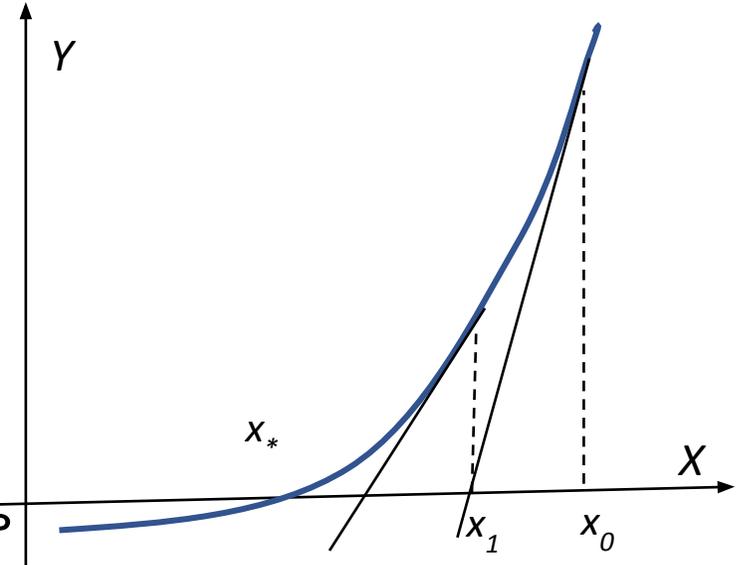
$$\varphi(x) = 0$$

выбрать некоторое начальное приближение  $x_0$  и построить

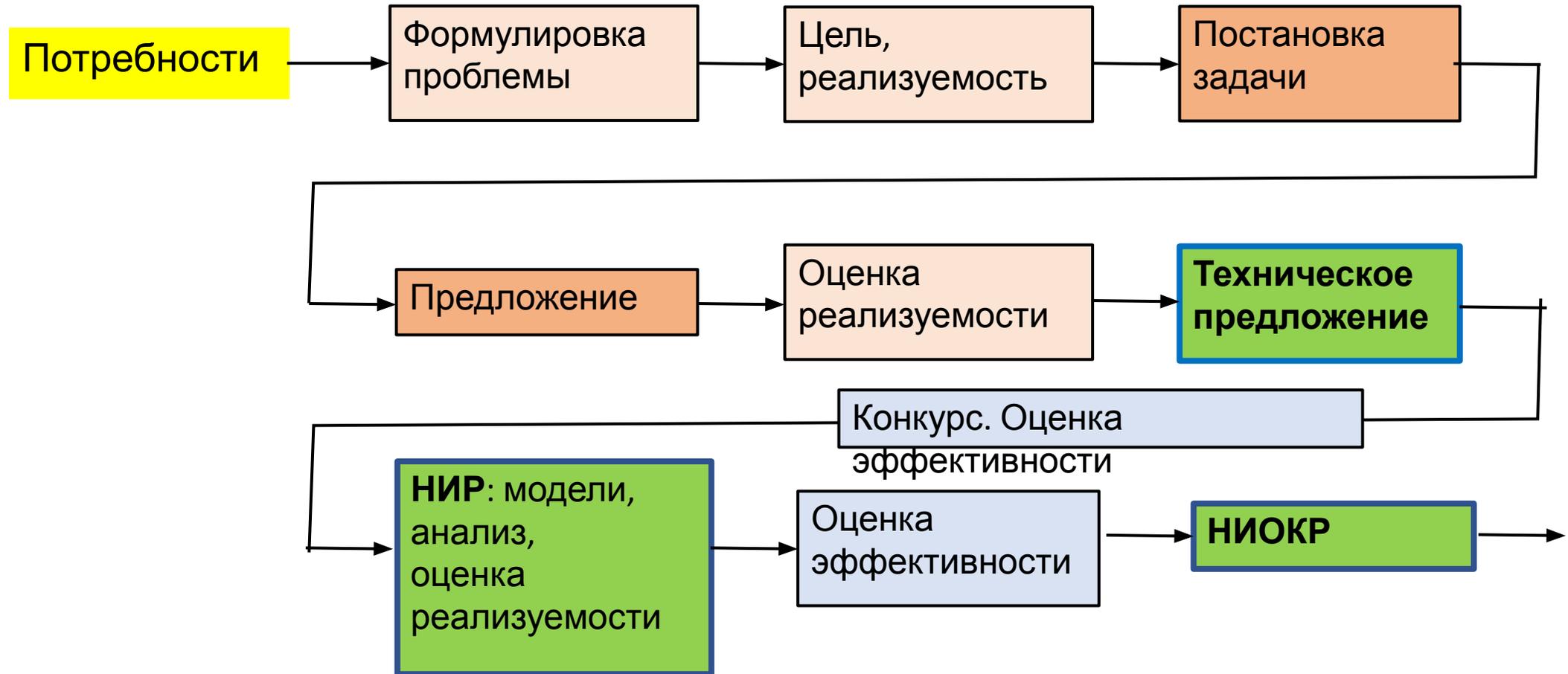
следующее приближение  $x_1$  как точку пересечения касательной

к графику функции  $\varphi(x) = 0$  в точке  $x_0$  с осью  $X$ , то полученное

значение  $x_1$  будет «ближе» к корню  $x^*$ , чем  $x_0$ .



# Лк. 17, 18. Формирование облика ТС



# Формирование облика ТС

**Решаемые задачи (структурно-параметрический, структурный, параметрический синтез).**

- Требуемые исходные данные (критерии, уравнения состояния и наблюдения, условия функционирования, действующие дестабилизирующие факторы, ограничения).
- Поиск технических решений (ТР): при неизвестных решениях, при неограниченном наборе вариантов, при ограниченном наборе вариантов, при известной структуре проектируемой системы.
- Формирование рабочих вариантов – алгоритмические и эвристические методы поиска ТР.
- Анализ вариантов с учетом выбранных критериев. Выбор оптимального варианта (метод границ и ветвей).
- Реализация технических систем (ТС) на базе ТР.

1. Часто наиболее сложными и творческими, определяющими эффективность проекта, являются этапы ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ и формирование ПРЕДЛОЖЕНИЯ (ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ). Возможные Заказчики оценивают востребованность предлагаемой технической системы (ТС), экономическую эффективность, оригинальность (новизну) и пр.
2. На этапе НИР проводится оценка реализуемости предлагаемых основных технических решений (ТР). Формируется предварительный аппаратно-алгоритмический (программно-аппаратный) облик ТС.
3. По результатам НИОКР оценивается эффективность разрабатываемой ТС. Определяется программно-аппаратный облик ТС, включая основные конструкторские решения.

# НИР. Формирование облика

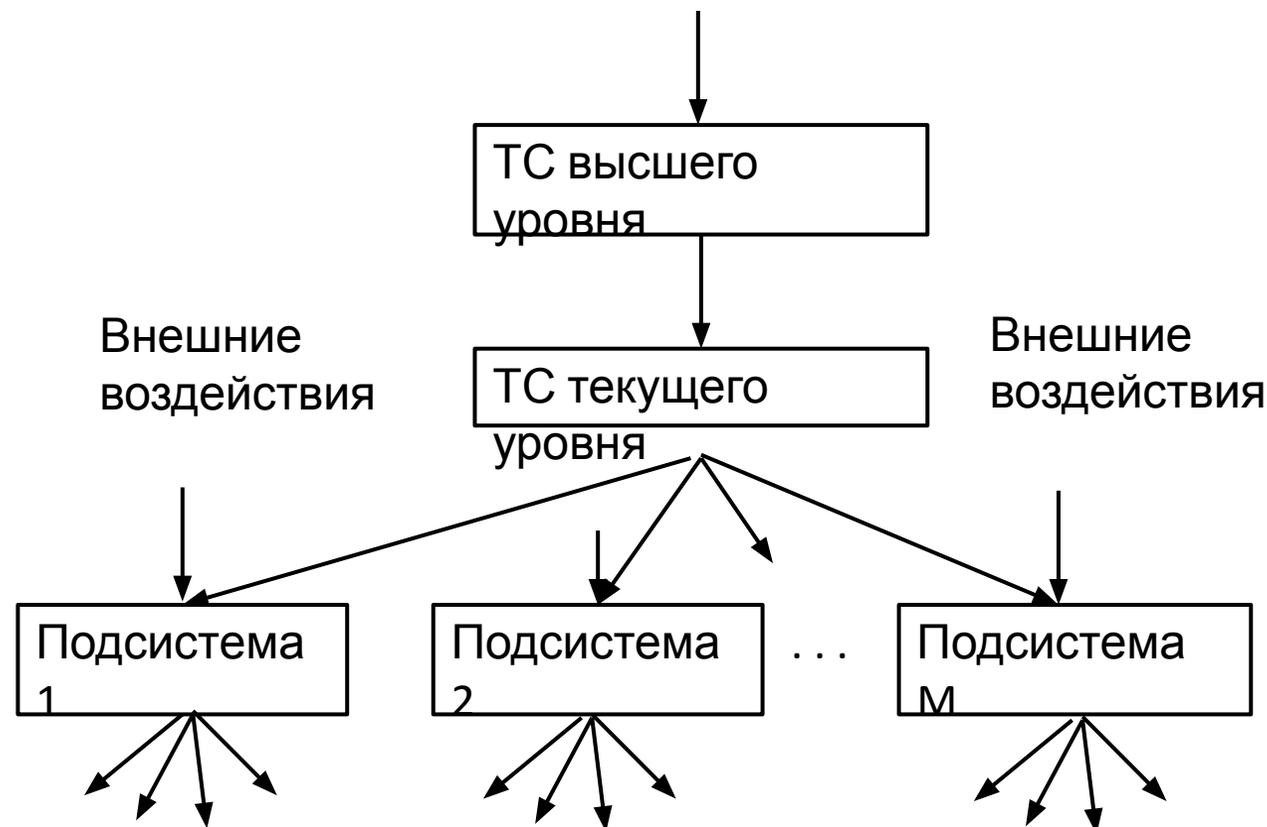
Реализуемость и работоспособность ТС должны оцениваться на различных уровнях. Так, работоспособная ТС может быть не реализуема в ТС высшего уровня.

Необходимо определить требования от ТС высшего уровня.

Необходимо определить ограничения на работоспособность и реализуемость ТС, в т.ч.:

т.ч.:

- точность, надежность, производительность;
- физические ограничения на параметры ТС, в частности, конструктивные;
- условия применения;
- с учетом требований от ТС данного (текущего уровня);
- с учетом требований от ТС низших



## Общая методика оценки работоспособности ТС

1. Разработка алгоритма исследований;
2. Формирование моделей ТС высшего уровня;
3. Формирование моделей подсистем ТС текущего и низших уровней;
4. Определение параметров, обеспечивающих работоспособность всех ТС различного уровня;
5. Моделирование процессов решения целевых задач ТС различных уровней;
6. Определение параметров ТС;
7. Определение условий, обеспечивающих работоспособность предлагаемых решений.

# Формирование облика системы автоматической посадки на необорудованный аэродром

Посадка самолета является одной из наиболее важных и сложных задач самолетовождения. Из-за сложности и опасности этого этапа процесс захода на посадку происходит около половины всех авиакатастроф.

Реализация режима автоматической посадки самолета может не только обеспечить выполнение полетов независимо от погодных условий, но и повысить степень безопасности полета, в т.ч. в аварийных ситуациях, когда, например, пилот не в состоянии управлять самолетом.

Автономные методы определения навигационных параметров без использования аэродромных радиомаячных средств целесообразны во многих случаях, требующих автоматической посадки.

В ряде работ рассматриваются структуры навигационных систем, основанных на ИНС, с использованием систем наблюдения (СН) земной поверхности и других датчиков. В то же время в этих работах не рассматривается ряд важных вопросов, например, таких как:

- оценка потенциальной точности работы подобных навигационных систем в режиме автоматической посадки гражданского самолета на аэродром, необорудованный радиомаячными системами;
- соответствие точности навигационной системы регламентированной точности категорированной посадки.

По материалам кандидатской диссертации Хюн Ен Мока. Научн. рук. Н.В. Ким.

**Цель работы.** Основной целью исследований является: оценка потенциальной точности работы навигационной системы (НС), в режиме автоматической посадки гражданского самолета на аэродром, необорудованный радиомаячными системами, в соответствие с регламентированными точностями категорированной посадки.

### **Научная новизна работы.**

Разработана методика исследования точности работы НС, включающую ИНС, GPS-приемник, радиовысотомер (РВ) и систему наблюдения (СН).

Разработана методика определения требований к НС, обеспечивающих автоматическую посадку, включающая:

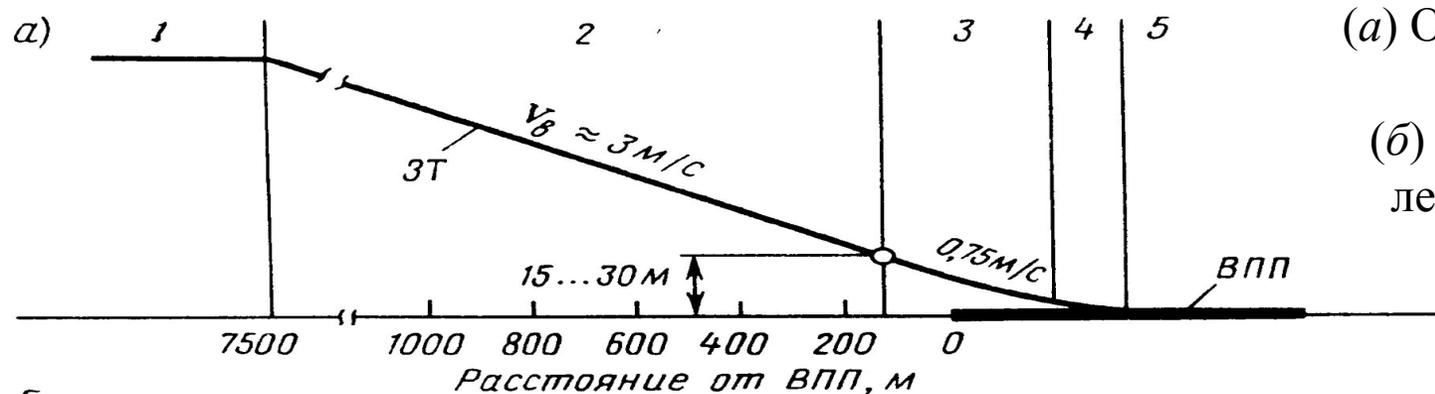
- оценку возможности измерения навигационных параметров полета самолета с заданной точностью;
- определение требований к алгоритмам вычисления навигационных параметров.

Показано, что при определенных условиях рассматриваемый вариант НС потенциально позволяет обеспечить посадку самолета в дневное время суток:

- в боковом направлении - в соответствии с категорией III;
- в вертикальном направлении - в соответствии с категориями I и II.

**Практическая ценность результатов работы** заключается в том, что определены требования к характеристикам НС, которые позволяют повысить точность оценки навигационных параметров и показана возможность использования рассматриваемого облика навигационной системы для навигационной системы, обеспечивающей автоматическую посадку самолета.

# Автоматическая посадка самолета



(а) Опорная траектория в вертикальной плоскости,

(б) Допустимые боковые отклонения летательного аппарата от оси ВПП



1. Выход на глиссаду;
2. Снижение по глиссаде;
3. Выравнивание перед посадкой, самолет переходит к снижению по траектории с малым углом наклона;
4. Устранение сноса при наличии боковой составляющей скорости ветра;
5. Заключительный этап от касания самолета взлетно-посадочной полосы (ВПП) до окончания его пробега по ВПП.

## Требования к точности

Требования к точности посадочного оборудования (таблица 1.1) определяются федеральным навигационным планом. Ширина этого участка у среднего маркерного радиомаяка (примерно 1000 м от начала ВПП) не более  $\pm 100$  м относительно оси ВПП.

Размеры зоны в вертикальной плоскости выбирают из условия безопасного пролета при заходе самолета на посадку.

Заданная (опорная) траектория движения ЛА лежит в центральной части зоны и совпадает с положениями номинальных линий курса и глиссады.

Категория посадки	Высота* (h) [м]	Требуемая точность по отклонению [м]	
		Боковому ( $2\sigma_{l,тр}$ )	Вертикальному ( $2\sigma_{h,тр}$ )
I	30	$\pm 9,1$	$\pm 3,0$
II	15	$\pm 4,6$	$\pm 1,4$
III	2,4	$\pm 4,1$	$\pm 0,4$

\*Высота над земной поверхностью, для которой регламентирована точность

# Программа исследования

Цель проводимых исследований состоит в определении условий работоспособности НС.

Оценка работоспособности будет проводиться методами математического моделирования процесса автоматической посадки ЛА.

Анализ полученных данных позволит оценить работоспособность исследуемой НС и определить требования к характеристикам СН.

Для моделирования посадки ЛА необходимо разработать комплекс моделей: математические модели ЛА и НС, в том числе модели отдельных подсистем навигационной системы, а также алгоритм оценки параметров полета ЛА.

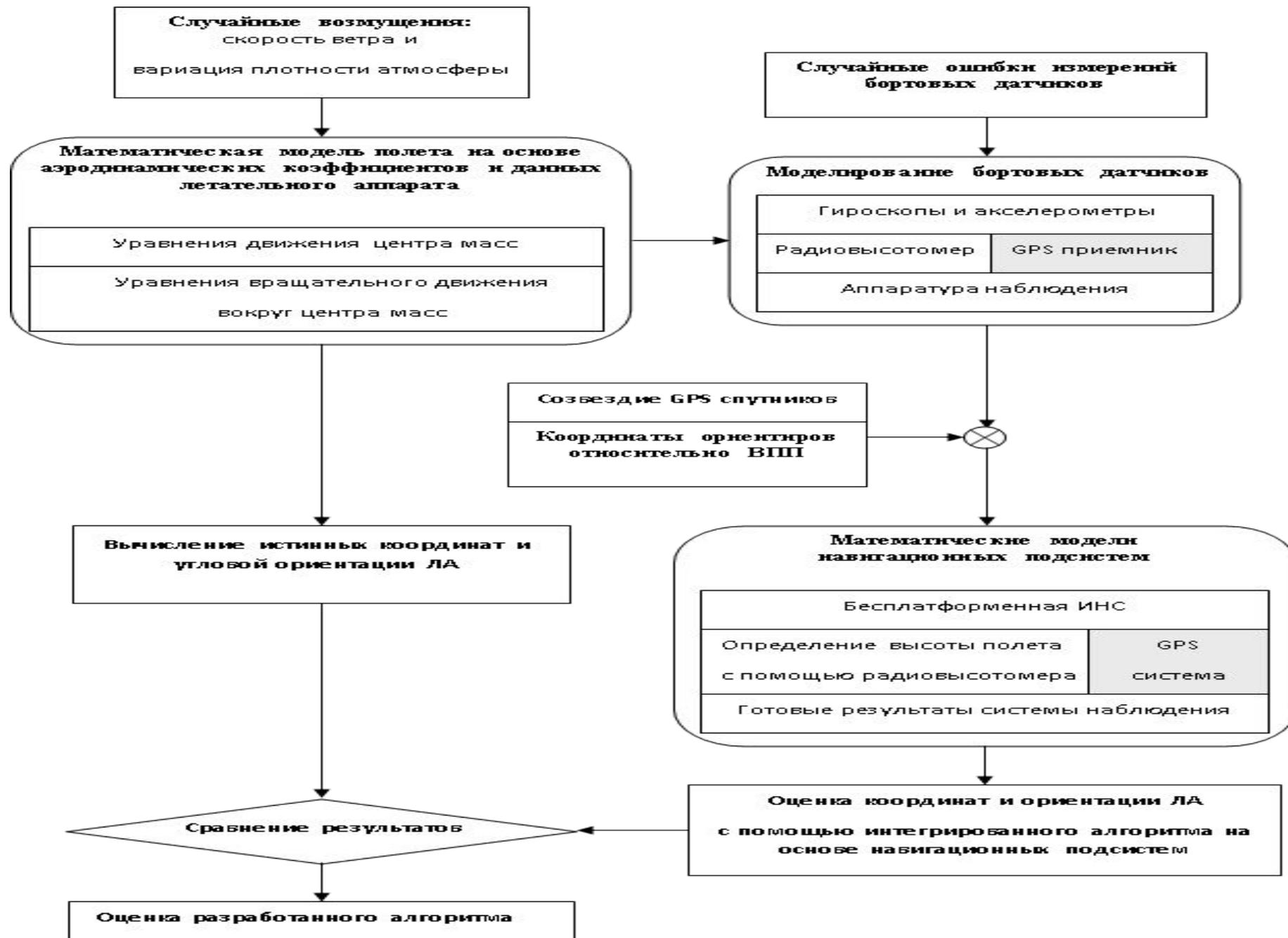
# Методика исследования точности работы НС

В процессе подготовки математического моделирования посадки самолета необходимо определить область существования параметров СН, обеспечивающих работоспособность системы.

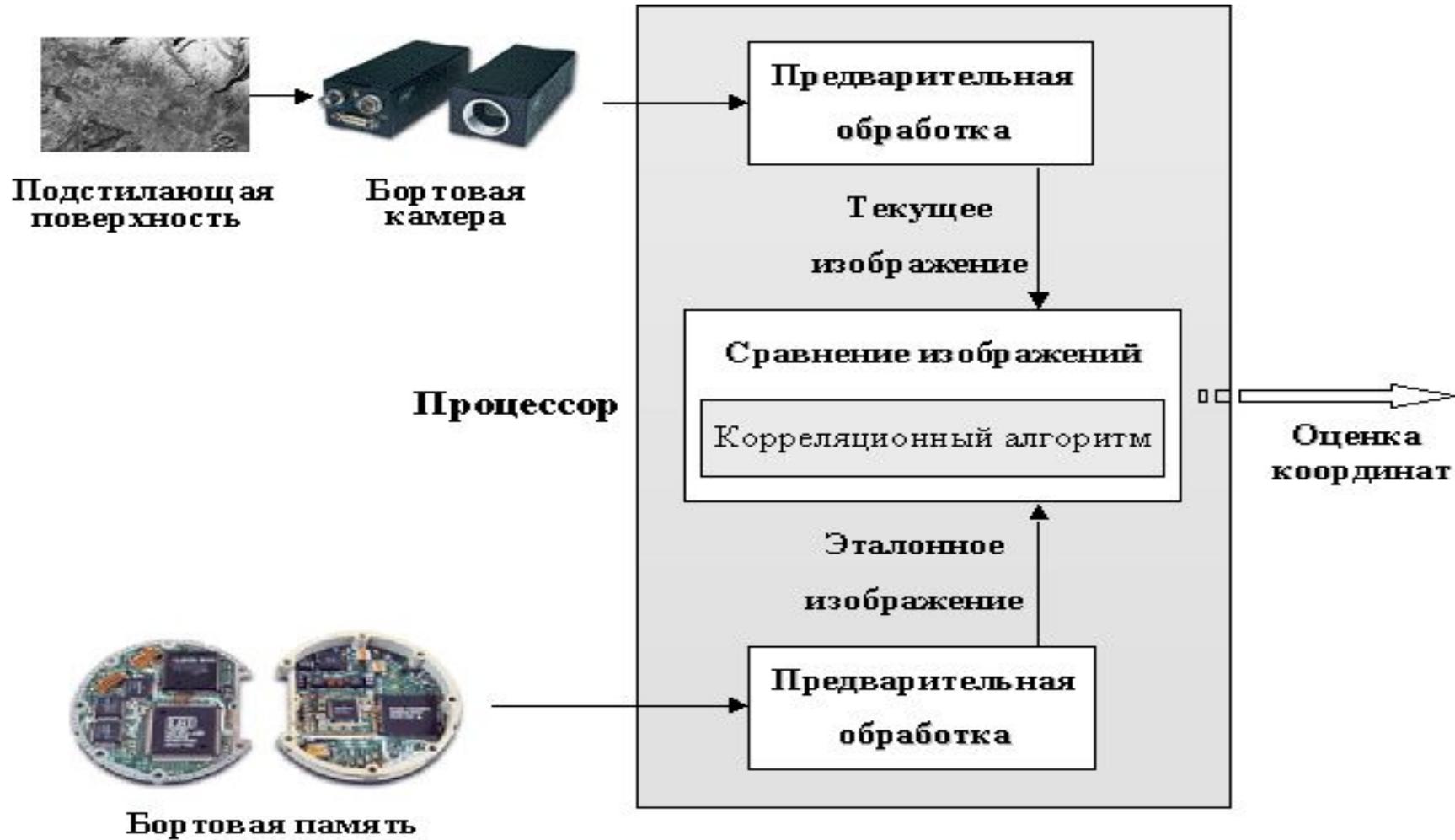
## **Методика исследования точности работы НС**

**с учетом известных характеристик ИНС, СНС, РВ и неизвестных характеристик СН:**

1. Формирование модели ЛА;
2. Формирование моделей подсистем НС;
3. Определение параметров, обеспечивающих работоспособность СН;
4. Моделирование полета ЛА в режиме посадки с различными начальными условиями;
5. Определение точности оценки параметров полета ЛА с помощью НС;
6. Определение условий наблюдения, обеспечивающих категорированную посадку ЛА.

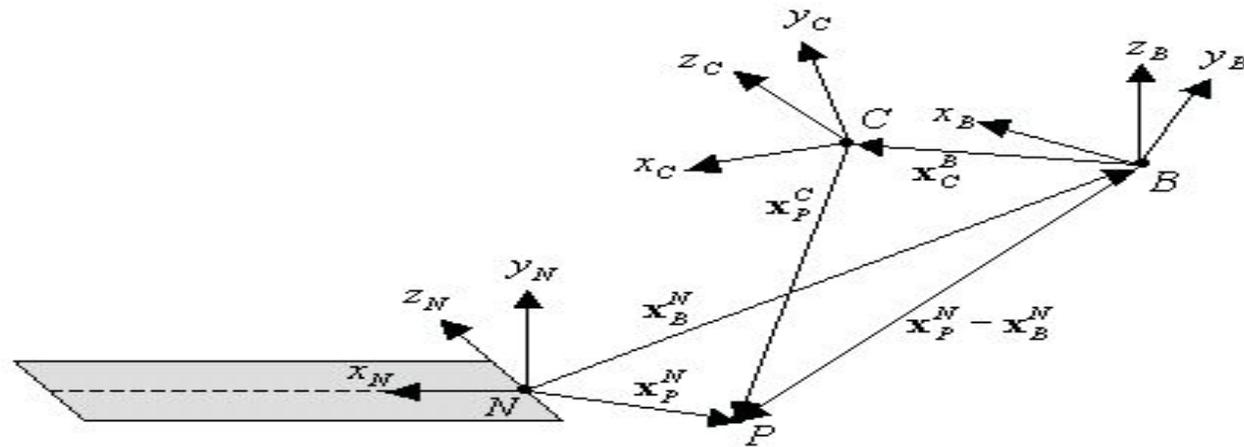


# Структура СН

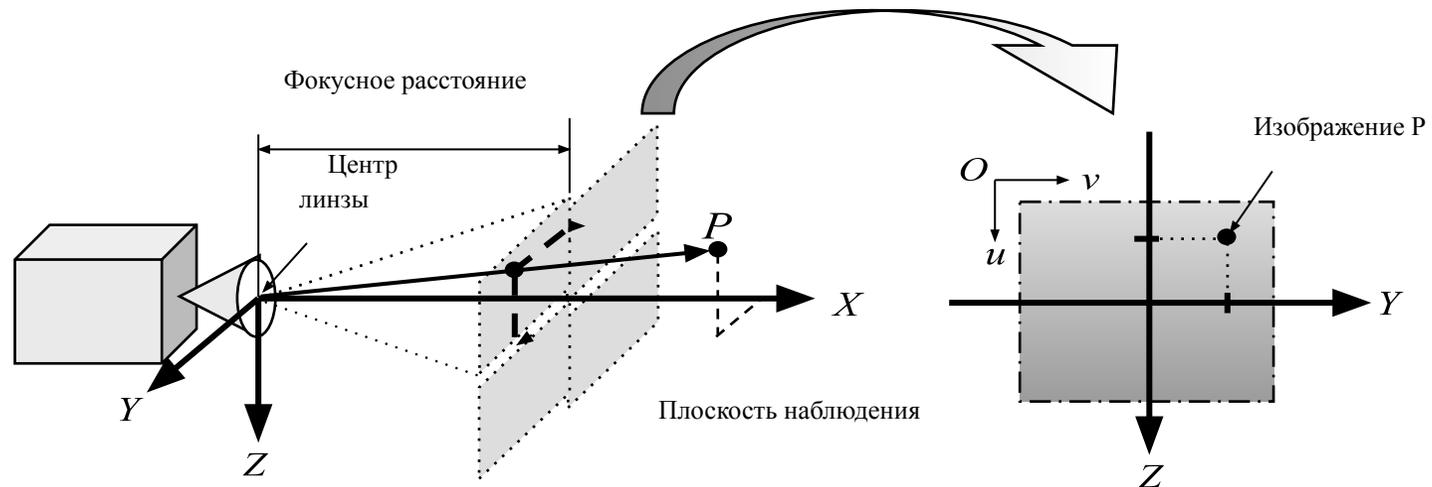


# Системы координат и модель бортовой СН

(a)



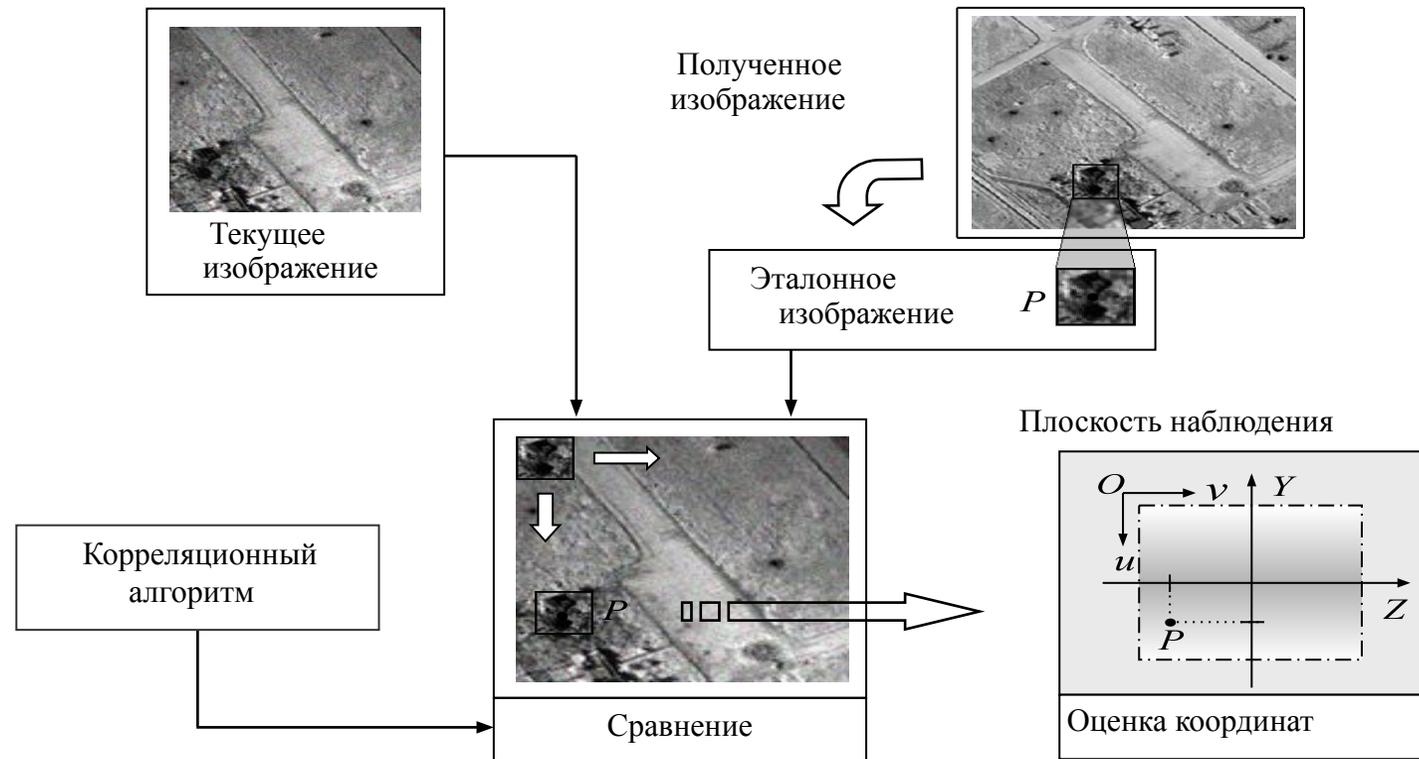
(б)



# Структура общего алгоритма наблюдения

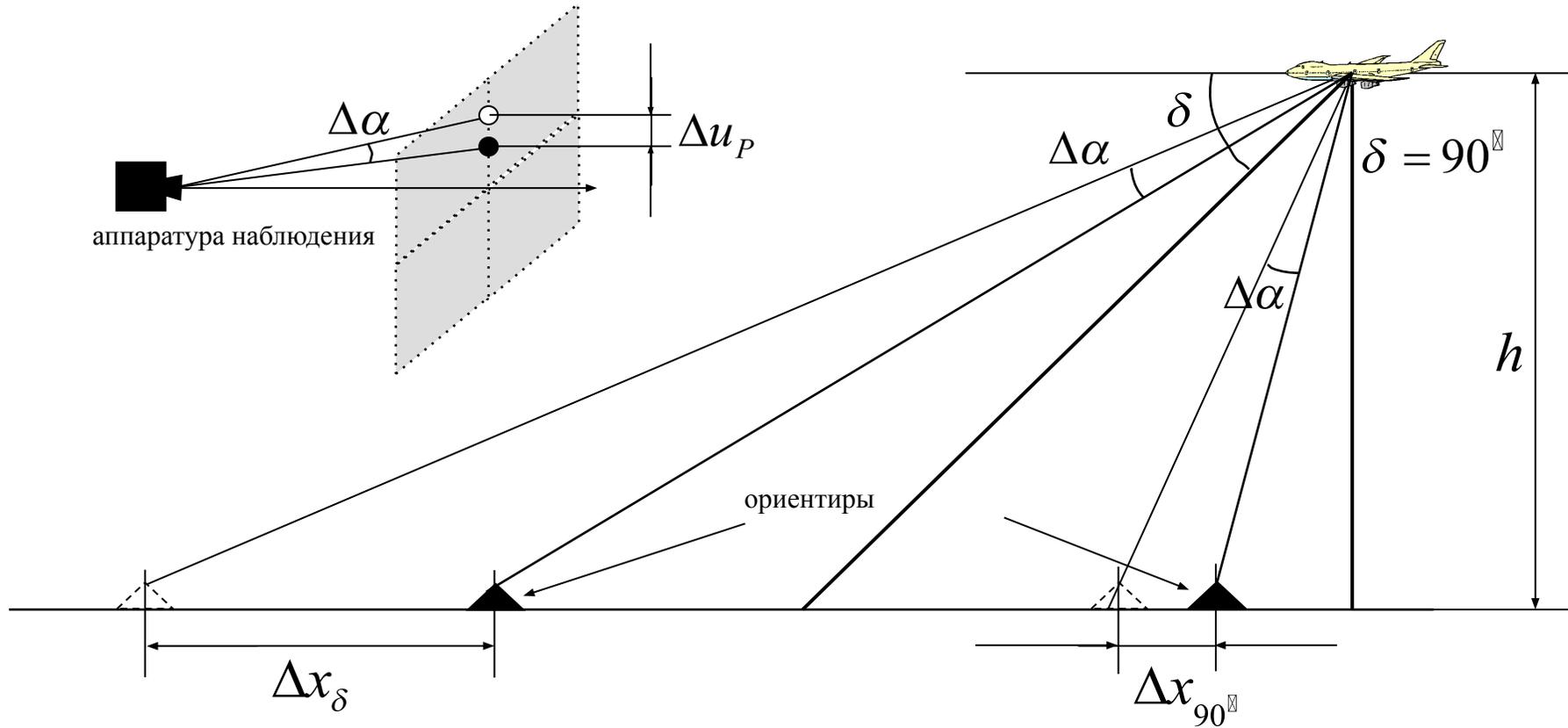
Предполагается, что использующий GPS-приемник обеспечивает начальную привязку изображений с ошибкой, не превышающей радиус корреляции изображений ( $< 15 \div 20$  м).

С помощью АОИ требуется только оценить относительные смещения изображений без решения задач поиска и распознавания ориентиров.

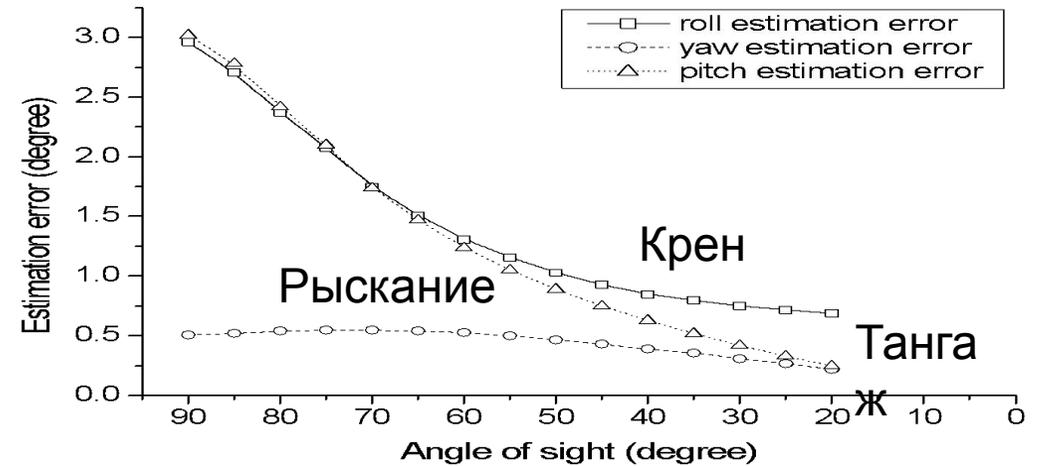
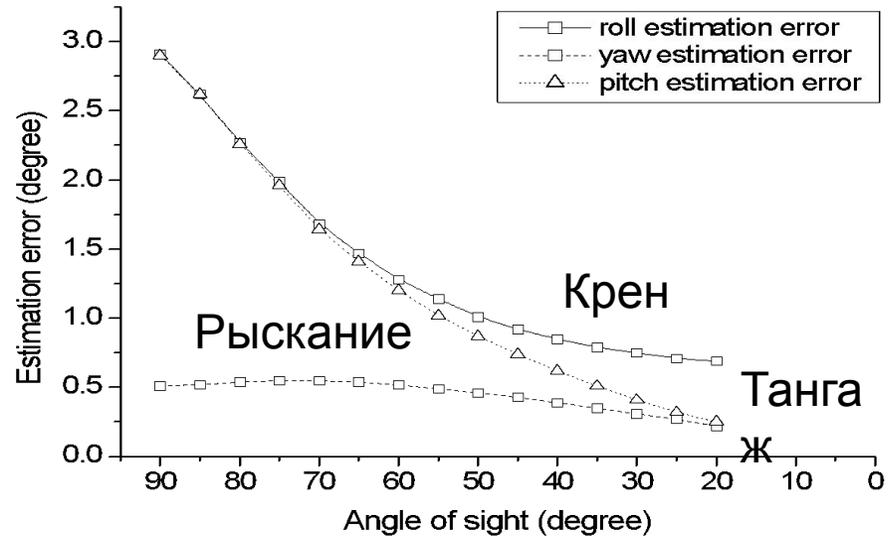
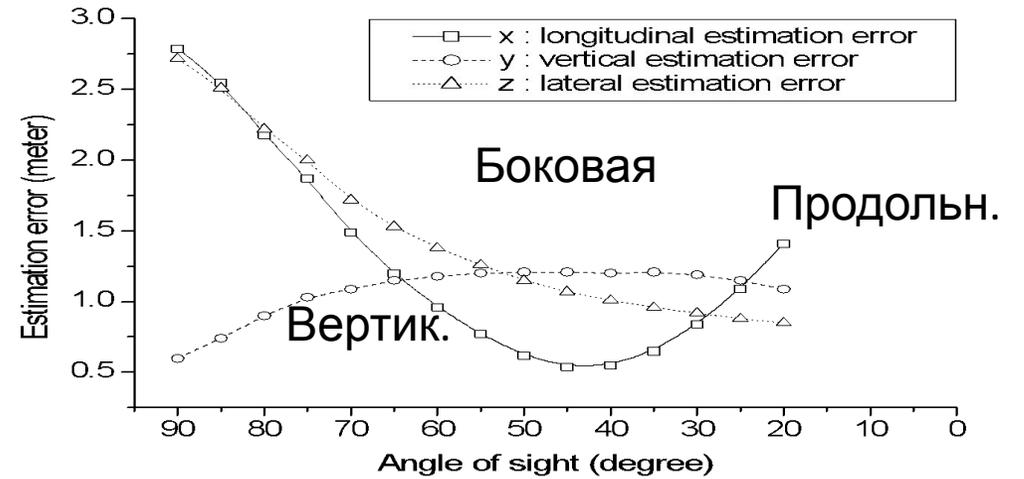
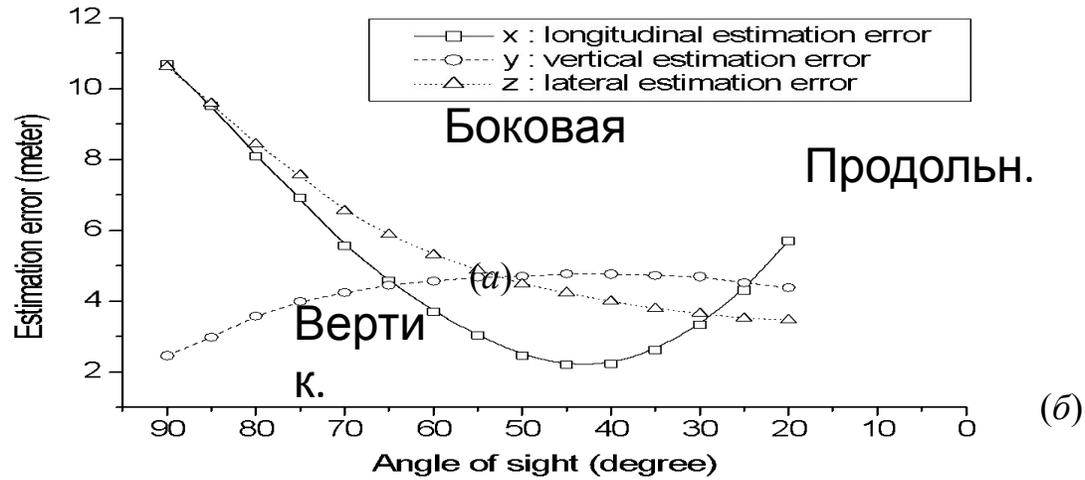


# Углы установки камеры

Влияние отклонения угла визирования наблюдаемых ориентиров ( $\Delta\alpha$ ), которое вызвано ошибкой совмещения ЭИ и ТИ ( $\Delta u_p$ ), на мнимое расстояние ( $\Delta x_\delta$ ), проецированного на Землю, в вертикальной плоскости в зависимости от угла установки аппаратуры наблюдения. Оценка координат и ориентации проводилась на основе фильтра Калмана

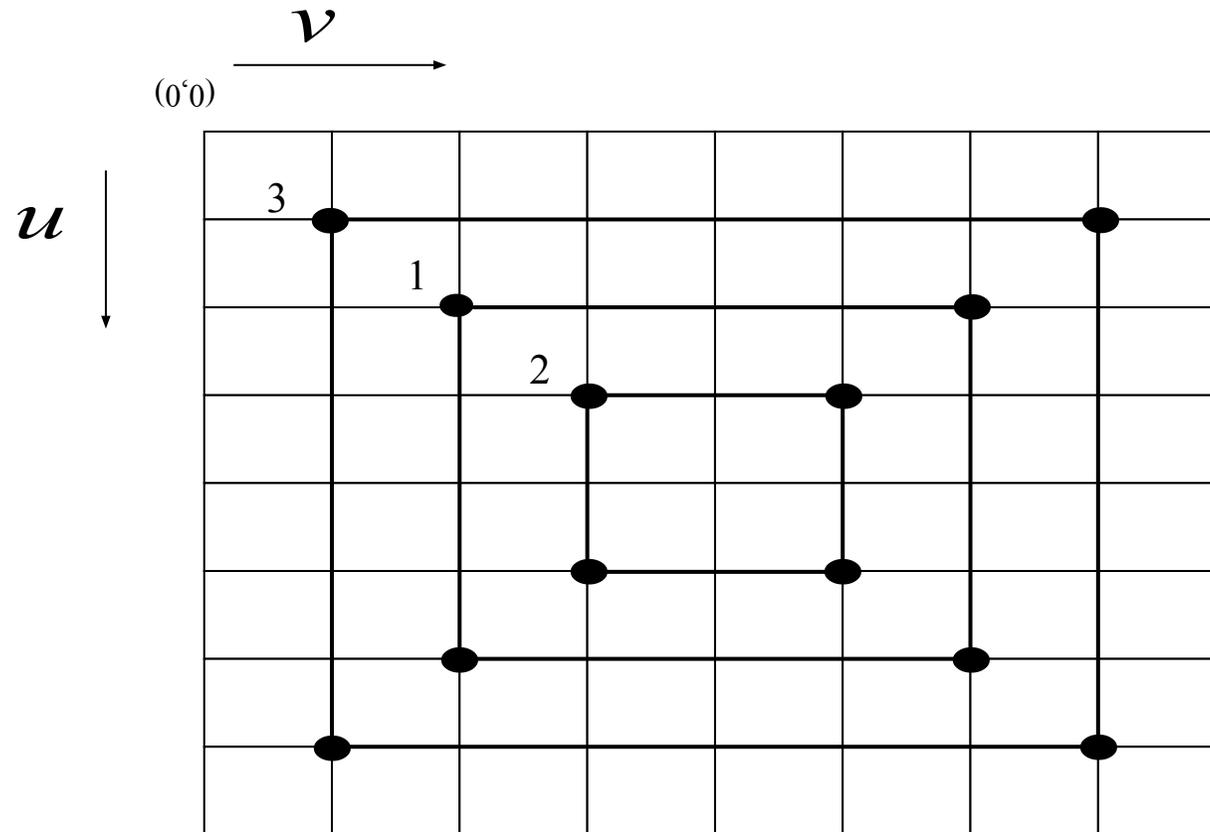


# Погрешности оценки координат и ориентации ЛА в зависимости от угла установки аппаратуры наблюдения (высота 200 м (а) и 50м (б))



Положение элементов	Угол установки ( $\delta$ )	Погрешности оценки координат [м]			Погрешности оценки ориентации [градус]		
		$x$	$y$	$z$	$\gamma$	$\psi$	$\vartheta$
1	90°	10,69	2,47	10,63	2,91	0,51	2,90
	75°	6,92	3,99	7,56	1,99	0,55	1,96
	60°	3,72	4,58	5,32	1,28	0,52	1,20
	45°	2,21	4,78	4,24	0,92	0,43	0,74
	30°	3,34	4,70	3,66	0,75	0,31	0,41
2	90°	35,67	6,90	35,46	10,04	1,11	10,00
	75°	16,62	9,46	18,15	4,95	1,20	4,92
	60°	7,86	9,86	11,25	2,80	1,08	2,68
	45°	4,38	10,06	8,61	1,91	0,88	1,62
	30°	7,04	9,97	7,3	1,51	0,61	0,91
3	90°	5,18	1,41	5,16	1,34	0,33	1,33
	75°	3,89	2,28	4,24	1,05	0,34	1,04
	60°	2,33	2,78	3,29	0,76	0,33	0,69
	45°	1,47	2,96	2,72	0,58	0,28	0,43
	30°	2,11	2,89	2,42	0,49	0,21	0,25

# Расположение ориентиров на изображении

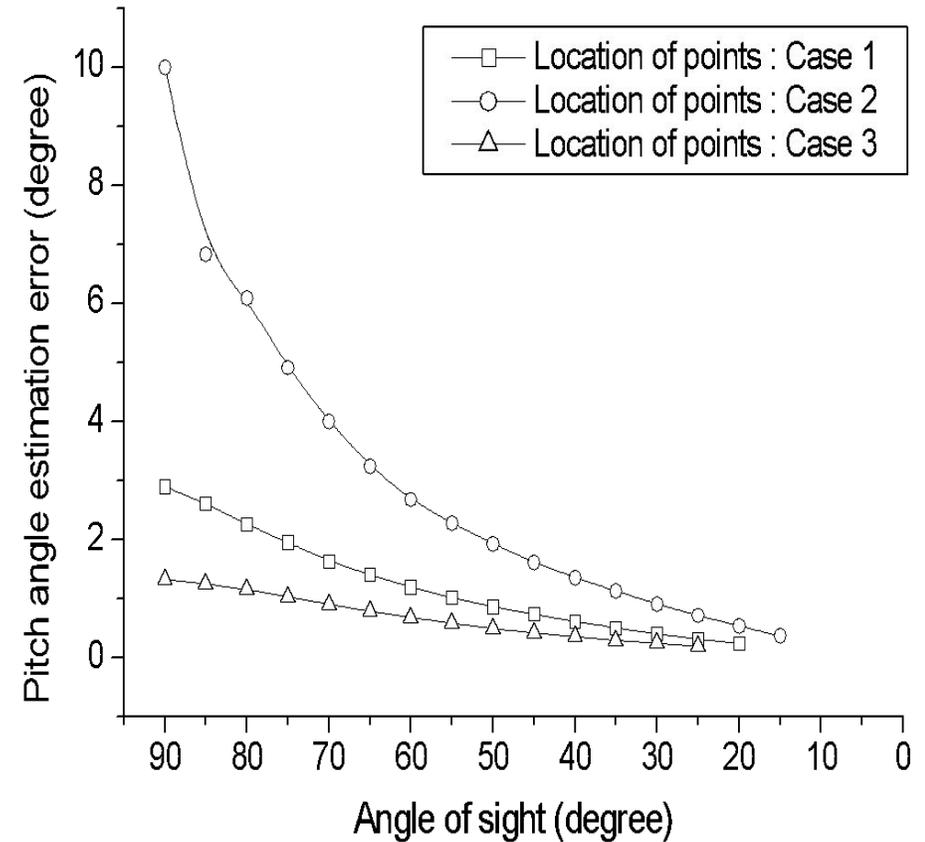
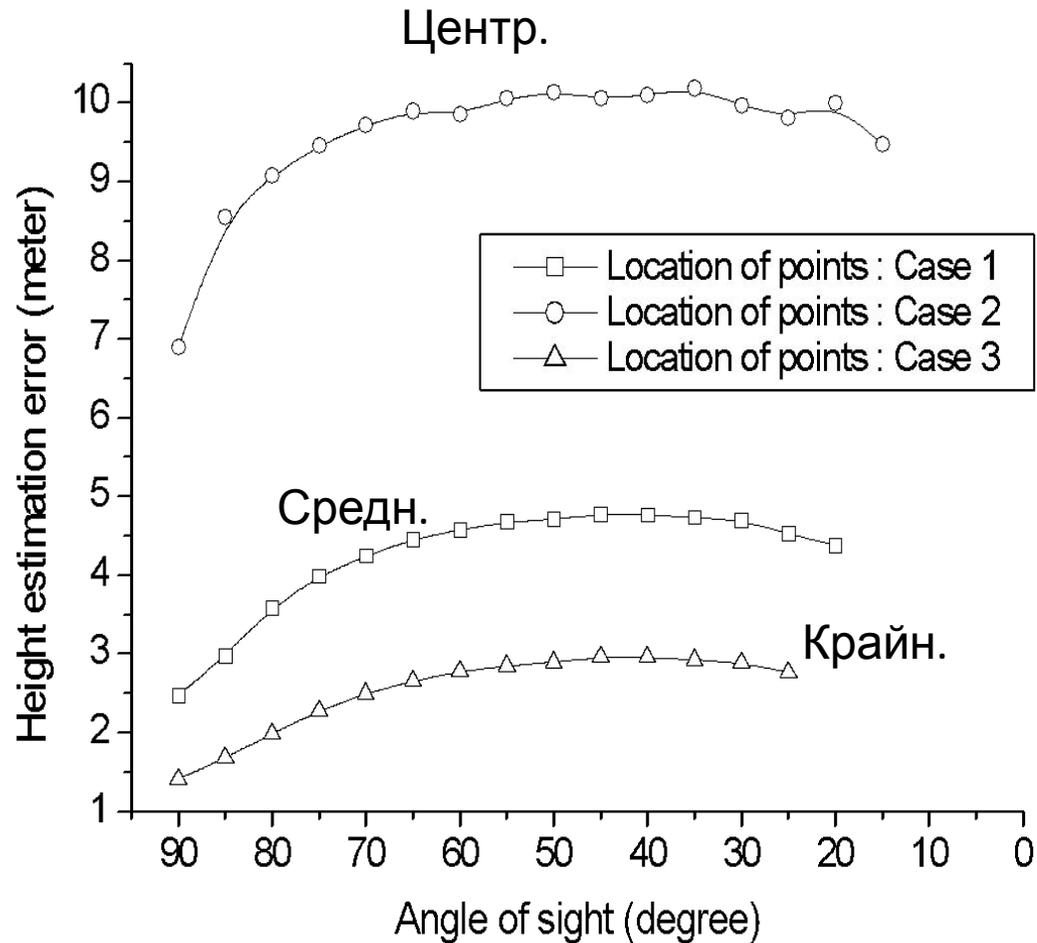


1. (128,128), (128,384),  
(384,384), (384,128)

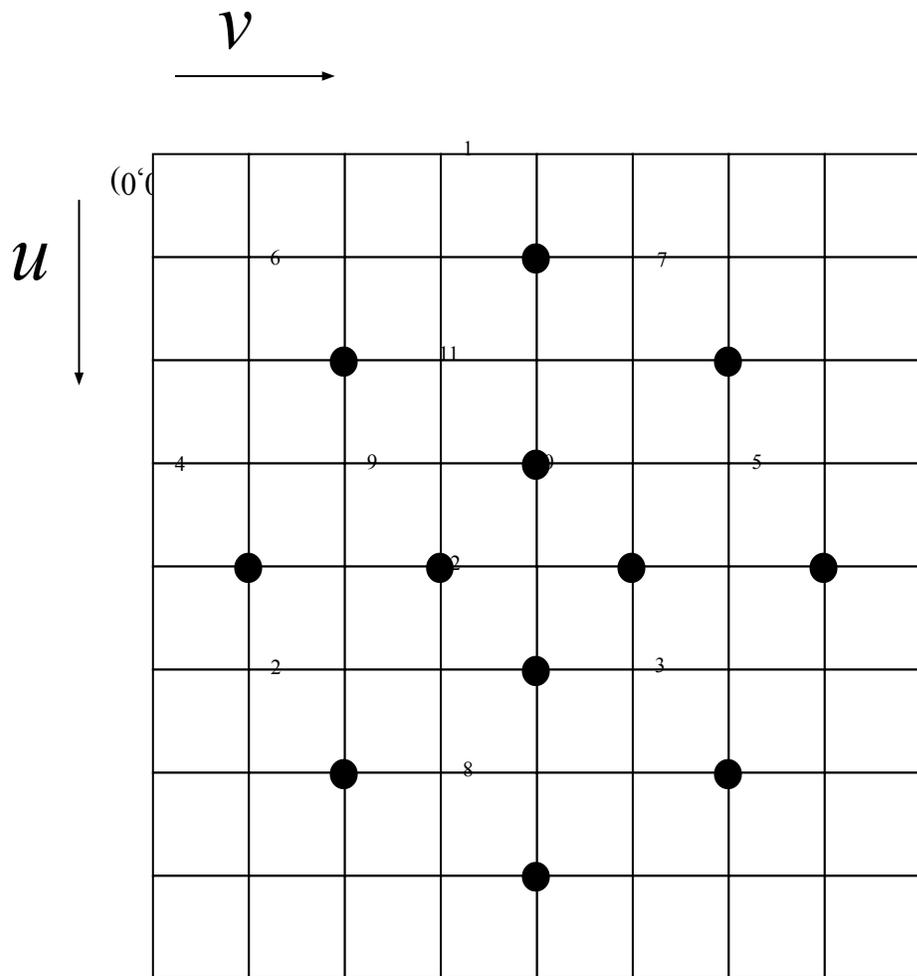
2. (192,192), (192,320),  
(320,320), (320,192)

3. (64,64), (64,448),  
(448,448), (448,64)

# Ошибки оценки высоты полета и угла тангажа в зависимости от расположения наблюдаемых ориентиров



# Схема размещения ориентиров



1. (64,256)

2. (384,128)

3. (384,384)

4. (256,64)

5. (256,448)

6. (128,128)

7. (128,325)

8. (448,256)

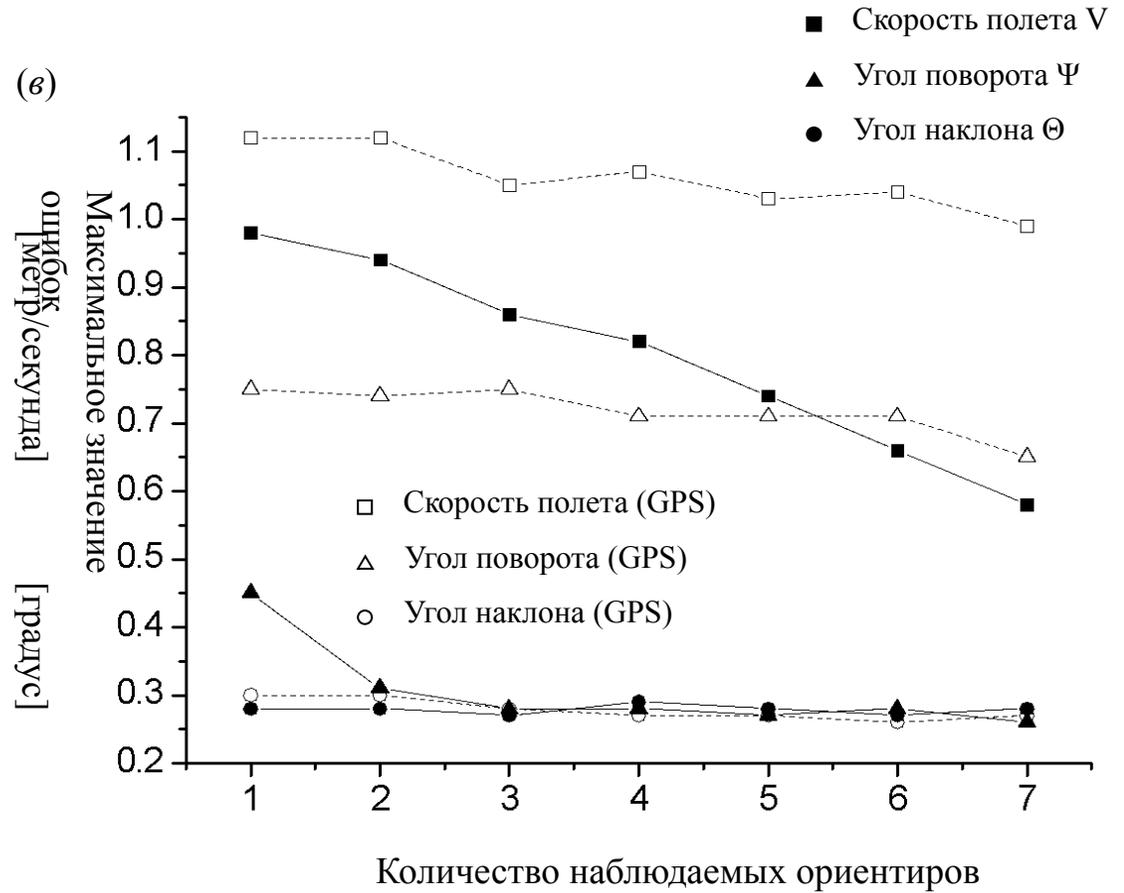
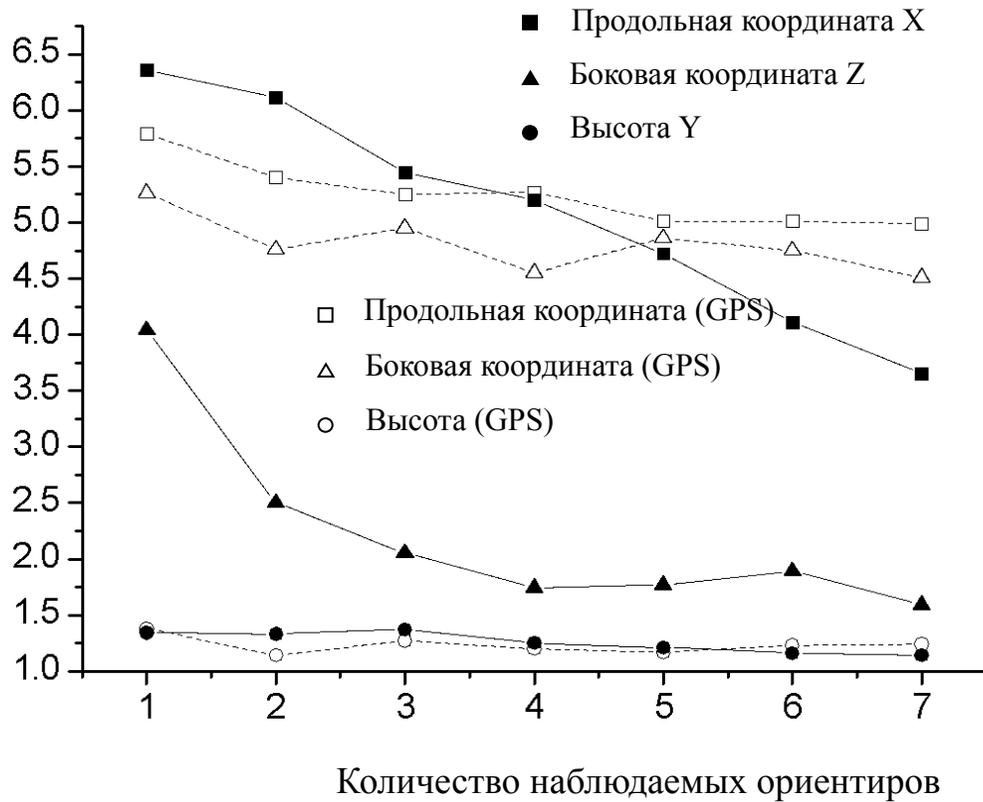
9. (256,192)

10. (256,320)

11. (192,256)

12. (320,256)

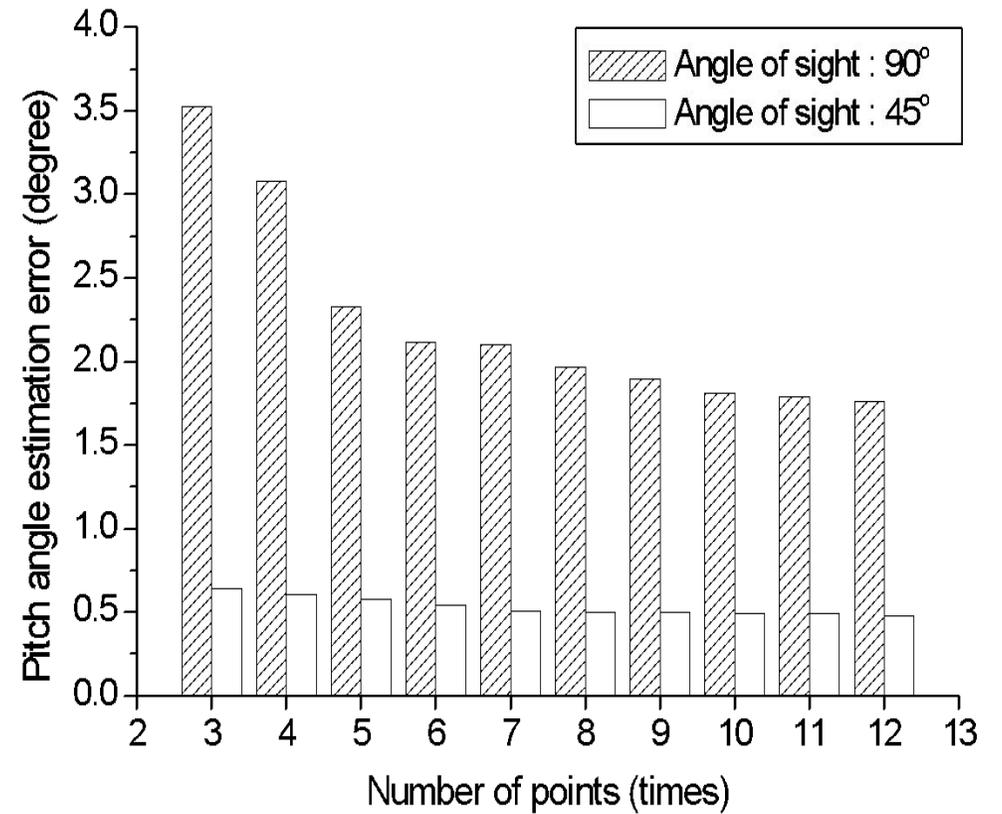
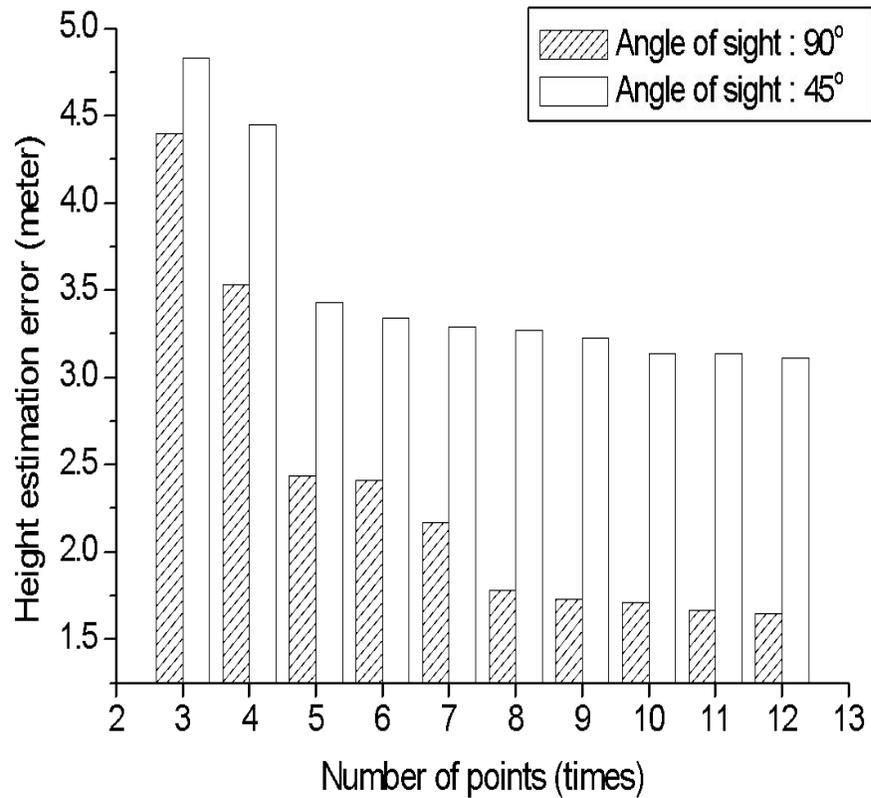
# Графики ошибок от количества ориентиров



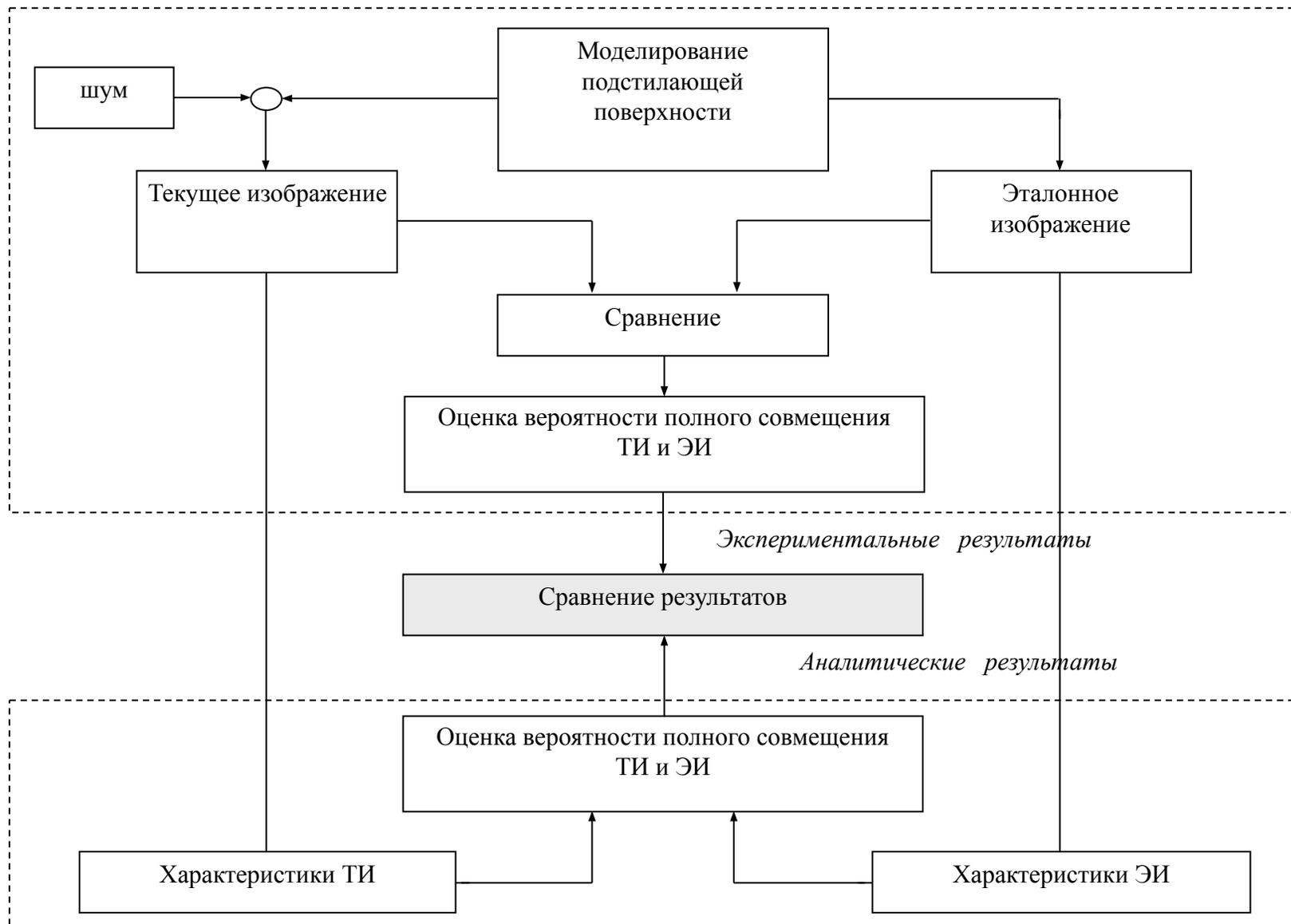
## Погрешности оценки координат и ориентации ЛА в зависимости от количества наблюдаемых ориентиров при угле установки $90^\circ$ и $45^\circ$ ( $2\sigma$ )

Количество Элементов ( $N_{\text{но}}$ )	Погрешности оценки координат [м]			Погрешности оценки ориентации [градус]		
	x	y	z	$\gamma$	$\psi$	$\vartheta$
3	13,21 (2,27)	4,40 (4,83)	21,58 (7,38)	6,03 (1,79)	0,59 (0,50)	3,53 (0,64)
4	11,5 (2,21)	3,53 (4,45)	12,46 (5,18)	3,44 (1,19)	0,56 (0,46)	3,08 (0,61)
5	8,49 (2,07)	2,44 (3,43)	10,30 (4,22)	2,80 (0,85)	0,42 (0,44)	2,33 (0,58)
6	7,74 (1,96)	2,41 (3,34)	9,59 (3,78)	2,60 (0,77)	0,40 (0,38)	2,12 (0,54)
7	7,68 (1,80)	2,17 (3,29)	8,43 (3,56)	2,29 (0,72)	0,39 (0,35)	2,10 (0,51)
8	7,26 (1,54)	1,78 (3,27)	7,30 (3,06)	2,00 (0,68)	0,36 (0,30)	1,97 (0,50)
9	6,98 (1,54)	1,73 (3,23)	7,14 (3,04)	1,97 (0,67)	0,36 (0,30)	1,90 (0,50)
10	6,62 (1,53)	1,71 (3,14)	6,94 (2,99)	1,92 (0,66)	0,35 (0,30)	1,81 (0,49)
11	6,53 (1,52)	1,67 (3,14)	6,73 (2,99)	1,87 (0,66)	0,34 (0,29)	1,79 (0,49)
12	6,41 (1,49)	1,65 (3,11)	6,72 (2,94)	1,81 (0,66)	0,34 (0,29)	1,76 (0,48)

Ошибки оценки высоты полета и угла тангажа в зависимости от количества наблюдаемых ориентиров ( $N_{HO}$ ) и углов установки аппаратуры наблюдения ( $\delta$ ) при одинаковых условиях наблюдения



# Схема исследований влияния размеров ЭИ



Математическое ожидание  $m_0$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_0$  этого минимального значения вычисляются как

$$\begin{aligned}
 m_0 &= \int_{-\infty}^{\infty} |x_N| f(x_N) dx_N = \int_0^{\infty} x_N f(x_N) dx_N - \int_{-\infty}^0 x_N f(x_N) dx_N \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \left[ \int_0^{\infty} x_N \cdot e^{-\frac{x_N^2}{2\sigma_N^2}} dx_N - \int_{-\infty}^0 x_N \cdot e^{-\frac{x_N^2}{2\sigma_N^2}} dx_N \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \left[ \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{\sigma_N^2}} dt - \int_{\infty}^0 e^{-\frac{t}{\sigma_N^2}} dt \right] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \left[ -2\sigma_N^2 \cdot e^{-\frac{t}{\sigma_N^2}} \right]_0^{\infty} = \sigma_N \sqrt{\frac{2}{\pi}}. \\
 \sigma_0^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} |x_N - m_0|^2 f(x_N) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x_N^2 f(x_N) dx - 2m_0 \int_{-\infty}^{\infty} x_N f(x_N) dx + m_0^2 = \sigma_N^2 + m_0^2. \\
 \sigma_0 &= \sqrt{\sigma_N^2 + m_0^2} = \sigma_N \sqrt{1 + \frac{2}{\pi}}.
 \end{aligned}$$

При смещении ТИ и ЭИ, математическое ожидание  $m_P$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_P$  разности яркостей эталонного и текущего изображения определяются по формулам:

$$m_P = m_{RI} - m_{CI}, \quad \sigma_P = \sqrt{\sigma_{RI}^2 + \sigma_{CI}^2},$$

а математическое ожидание  $m_{\Delta}$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\Delta}$  функции среднего модуля разности ( $K_{P\Delta}(\Delta i, \Delta j) = M[ | RI(i, j) - CI(i+\Delta i, j+\Delta j) | ]$ ) имеют следующие значения

$$\begin{aligned}
m_{\Delta} &= \int_{-\infty}^{\infty} |x_p| f(x_p) dx_p = \int_0^{\infty} x_p f(x_p) dx_p - \int_{-\infty}^0 x_p f(x_p) dx_p \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \left[ \int_0^{\infty} x_p \cdot e^{-\frac{(x_p-m_p)^2}{2\sigma_p^2}} dx_p - \int_{-\infty}^0 x_p \cdot e^{-\frac{(x_p-m_p)^2}{2\sigma_p^2}} dx_p \right] \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \left[ \int_{-m_p}^{\infty} (t+m_p) \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt - \int_{-\infty}^{-m_p} (t+m_p) \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt \right] \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \left[ \int_{-m_p}^{\infty} t \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt - \int_{-\infty}^{-m_p} t \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt \right] + \frac{m_p}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \left[ \int_{-m_p}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt - \int_{-\infty}^{-m_p} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt \right] \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \left[ \int_{m_p^2/2}^{\infty} e^{-\frac{u}{\sigma_p^2}} du - \int_{\infty}^{m_p^2/2} e^{-\frac{u}{\sigma_p^2}} du \right] + \frac{m_p}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \int_{-m_p}^{m_p} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt \\
&= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \left[ -2\sigma_p^2 \cdot e^{-\frac{u}{\sigma_p^2}} \right]_{\frac{m_p^2}{2}}^{\infty} + 2m_p \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \int_0^{m_p} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_p^2}} dt \\
&= \sigma_p \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{m_p^2}{2\sigma_p^2}} + 2|m_p| \left[ \Phi\left(\frac{|m_p|}{\sigma_p}\right) - 0.5 \right].
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\Delta}^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} |x_p - m_{\Delta}|^2 f(x_p) dx = \int_{-\infty}^{\infty} (x_p - m_{\Delta})^2 f(x_p) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x_p^2 f(x_p) dx - 2m_{\Delta} \int_{-\infty}^{\infty} x_p f(x_p) dx + m_{\Delta}^2 \\
&= \sigma_p^2 + m_p^2 + m_{\Delta}^2 - 2m_{\Delta}m_p = \sigma_p^2 + (m_{\Delta} - m_p)^2,
\end{aligned}$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_p^2 + (m_{\Delta} - m_p)^2}.$$

где  $\Phi(\cdot)$  - табулированный интеграл вероятности.

При правильном совмещении ЭИ и ТИ математическое ожидание  $m_0$  функции среднего модуля разности должно быть меньше, чем математическое ожидание  $m_\Delta$  при любом смещении  $\Delta i$  или  $\Delta j$  не равном нулю.

Считая, что ЭИ имеют квадратную форму ( $n \times n$ ), получим:

$$n^2 \cdot m_0 + n \cdot t_\alpha \sigma_0 \leq n^2 \cdot m_\Delta - n \cdot t_\alpha \sigma_\Delta,$$

где  $n$  - размер окна эталонных изображений;  $t_\alpha = \arg \Phi \{(1+\alpha) / 2\}$  - значение аргумента  $\Phi(\cdot)$  от заданной доверительной вероятности  $\alpha$ .

Откуда, минимальное значение размера ЭИ вычисляется по формуле:

$$n_{\min} = \left| \frac{t_\alpha (\sigma_0 + \sigma_\Delta)}{m_\Delta - m_0} \right|. \quad (3.3)$$

Таким образом, чем больше разница между математическими ожиданиями  $m_\Delta$  и  $m_0$ , и чем меньше среднеквадратическое отклонение  $\sigma_\Delta$ , тем меньше размеры ТИ.

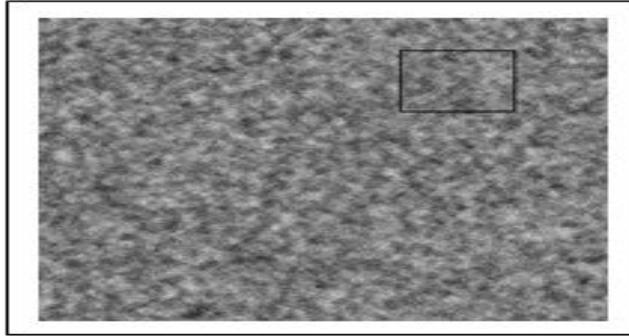
# Оценка точности совмещения ЭИ и ТИ

Оценка точности проводилась на основе моделирования процесса совмещения ТИ и ЭИ.

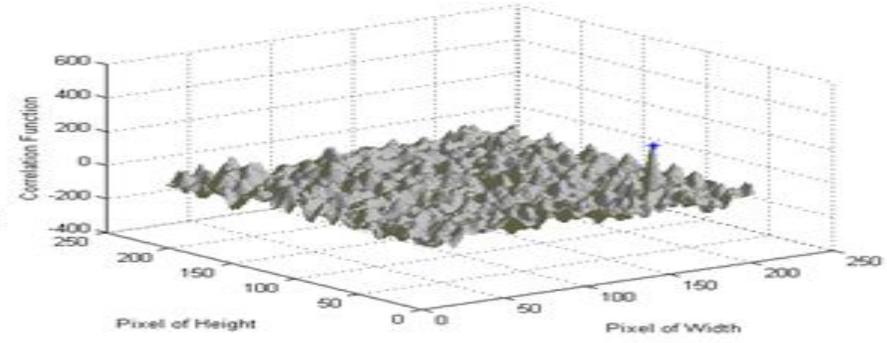
Выбранные фрагменты ЭИ и ТИ сравнивались с помощью критериальной функции «Модуль разности» (MAD).

При моделировании изменялись:

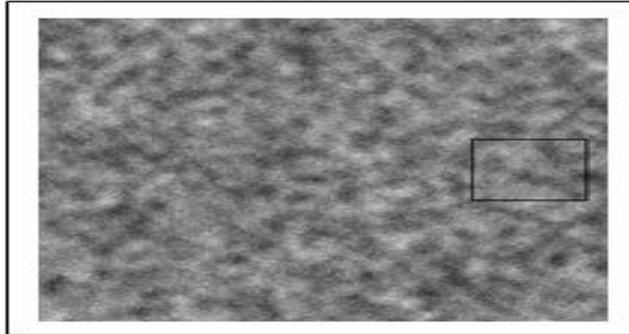
- Координаты сравниваемых фрагментов,
- Размеры сравниваемых фрагментов  $n$  ( $n$  – сторона квадрата в пикселях),
- Радиусы корреляции,
- Отношения сигнал/шум.



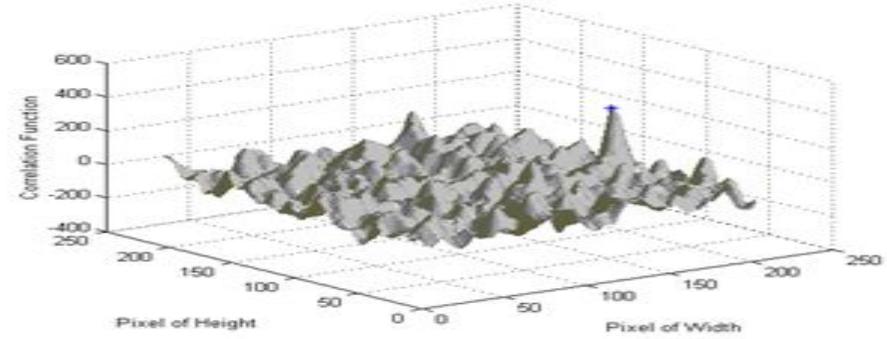
Корреляционная  
функция



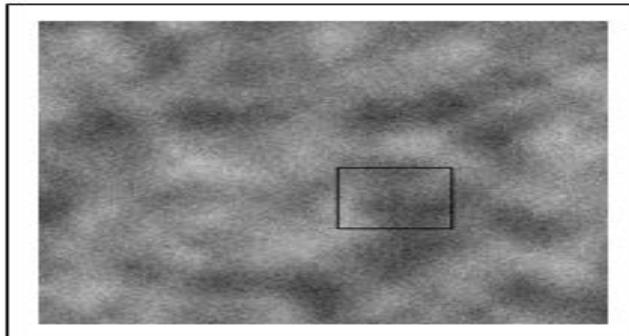
(a) при высоте 500м



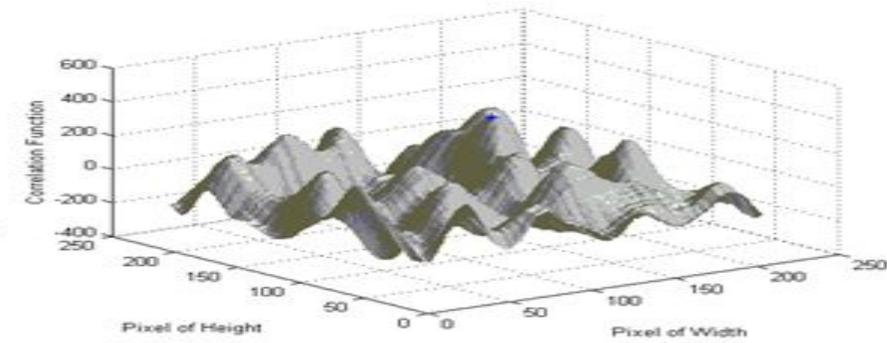
Корреляционная  
функция



(б) при высоте 300м

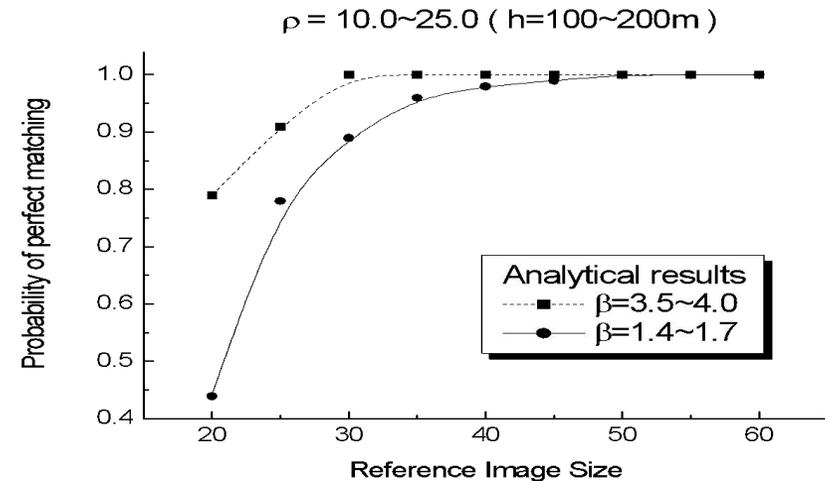
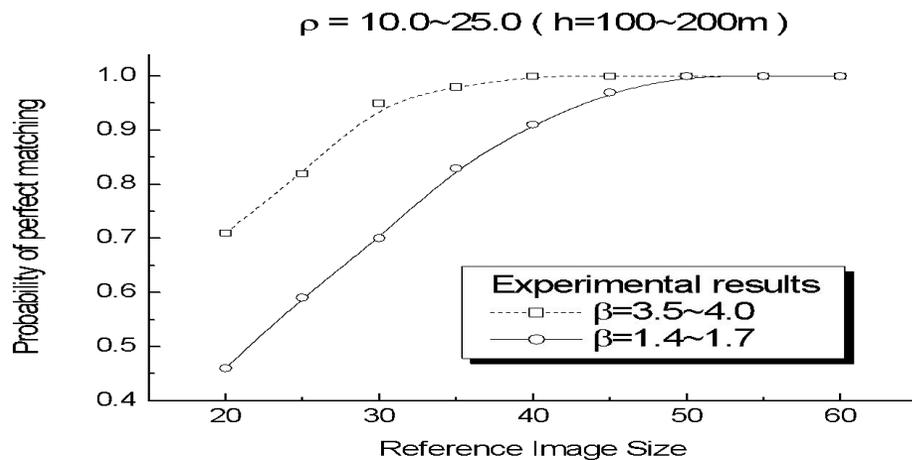
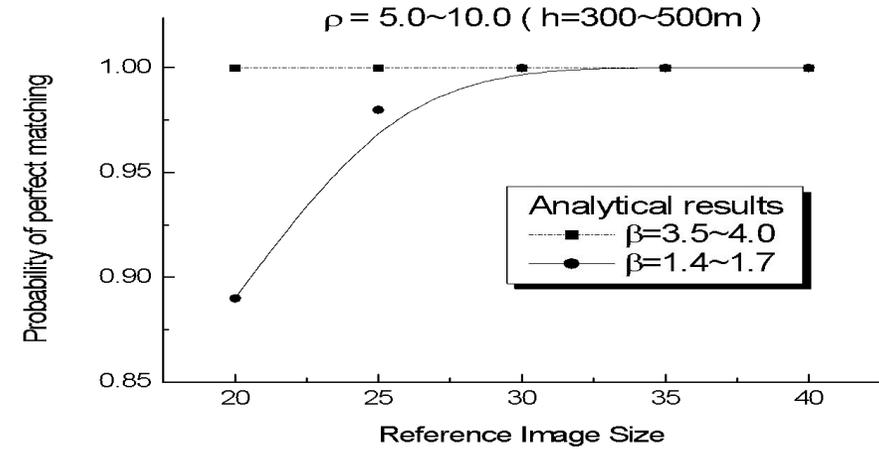
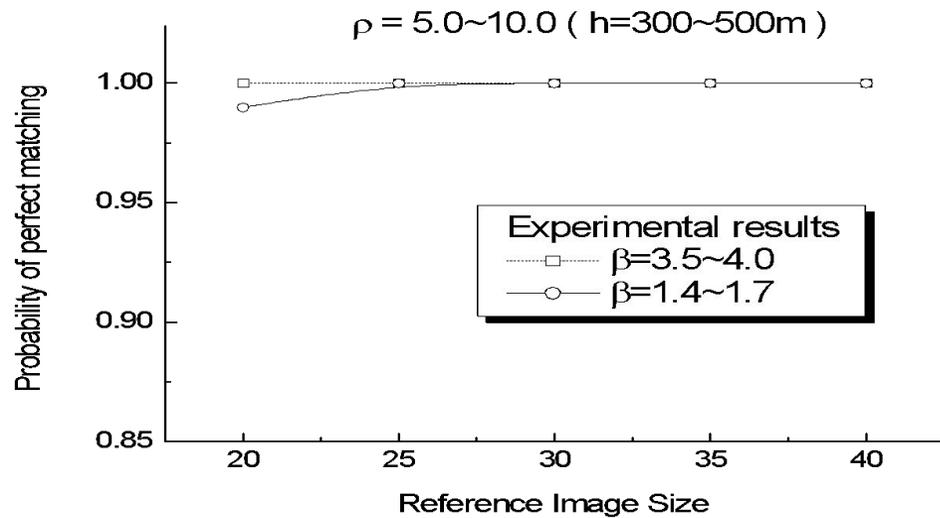


Корреляционная  
функция



(c) при высоте 100м

Вероятности, полученные в результате моделирования и с помощью аналитических расчетов для различных значений отношения сигнал/шум  $\beta$  и радиусов корреляции  $\rho$  ( $t_\alpha = 3$  от доверительной вероятности 0,9973)



# Оценка работоспособности частных алгоритмов обработки изображений

Результаты исследований должны подтвердить возможность оценки координат наземных ориентиров с заданной точностью с помощью выбранных алгоритмов обработки изображений, т.е. при выбранной структуре общего алгоритма наблюдения.

Эксперименты проводились с использованием оборудования авиационного тренажера КТС-16.

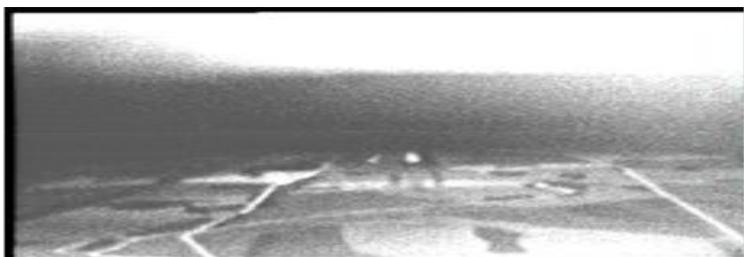
В состав тренажера входят:

- кабина самолета с органами управления и приборным оборудованием;
- вычислитель динамики полета (математической модели) самолета и навигационных параметров;
- панорамная ТВ система «Триоскоп»;
- макет местности и взлетно-посадочной полосы (ВПП) с ТВ - камерой;
- имитаторы радиолокационной системы (РЛС), тепlopеленгатора (ТП), системы автоматического управления (САУ), радиотехнической системы ближней и дальней навигации (РСБН, РСДН);
- пульт инструктора.

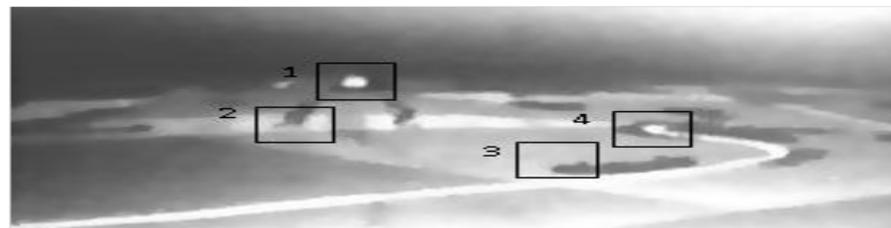
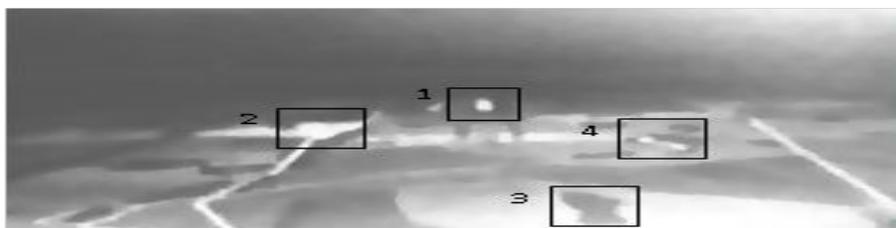
# Обработка изображений методами полунатурного моделирования

## Методика оценки работоспособности АОИ

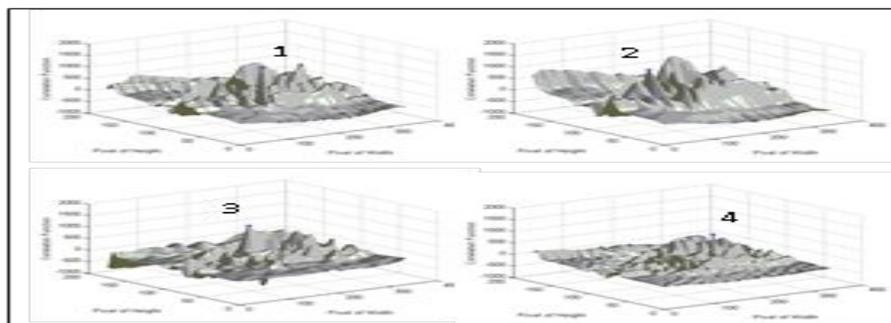
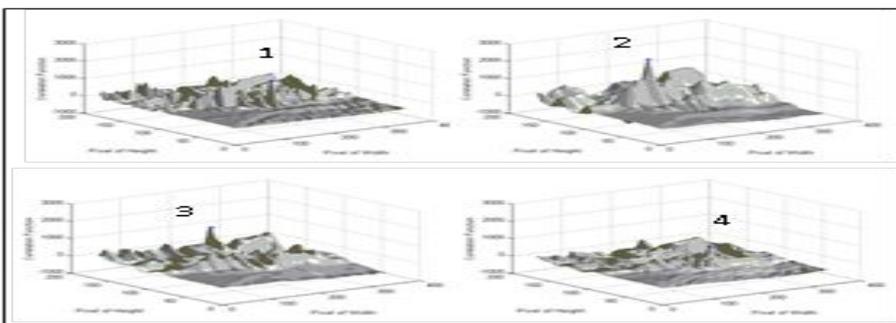
1. Моделирование посадки ЛА на тренажере с запоминанием информации об условиях полета;
2. Прием видеоинформации (изображений местности) с помощью тренажерной аппаратуры наблюдения;
3. Перевод видеоинформации, полученной в процессе посадки, в цифровую форму (для дальнейшей компьютерной обработки ТИ);
4. Улучшение качества полученных изображений, выбор ЭИ;
5. Оценка относительных координат ТИ и ЭИ;
6. Уточнение оценок координат и ориентации ЛА с целью корректирования БИНС с использованием полученных оценок от системы наблюдения и данных от радиовысотомера;
7. Оценка работоспособности системы наблюдения на основе полученных данных.



Полученные кадры



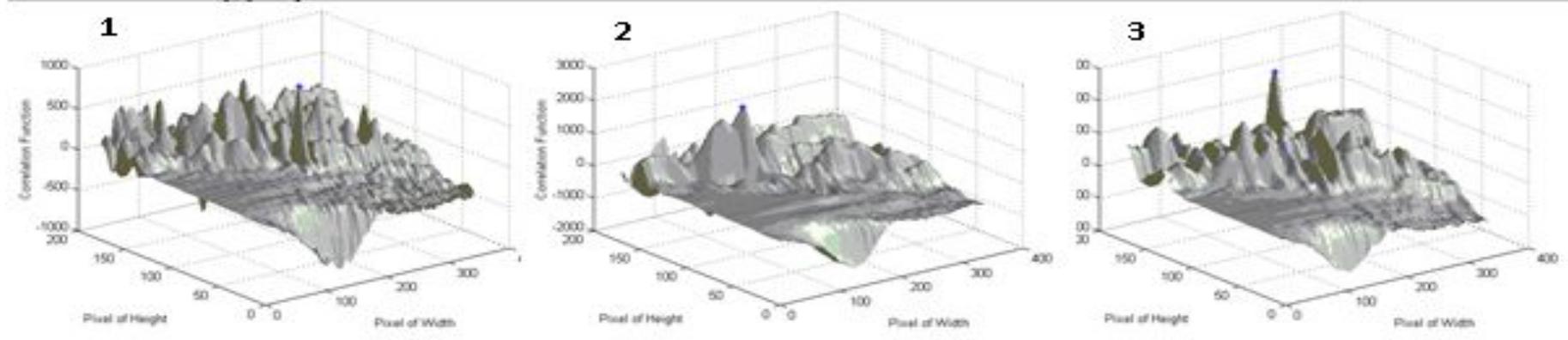
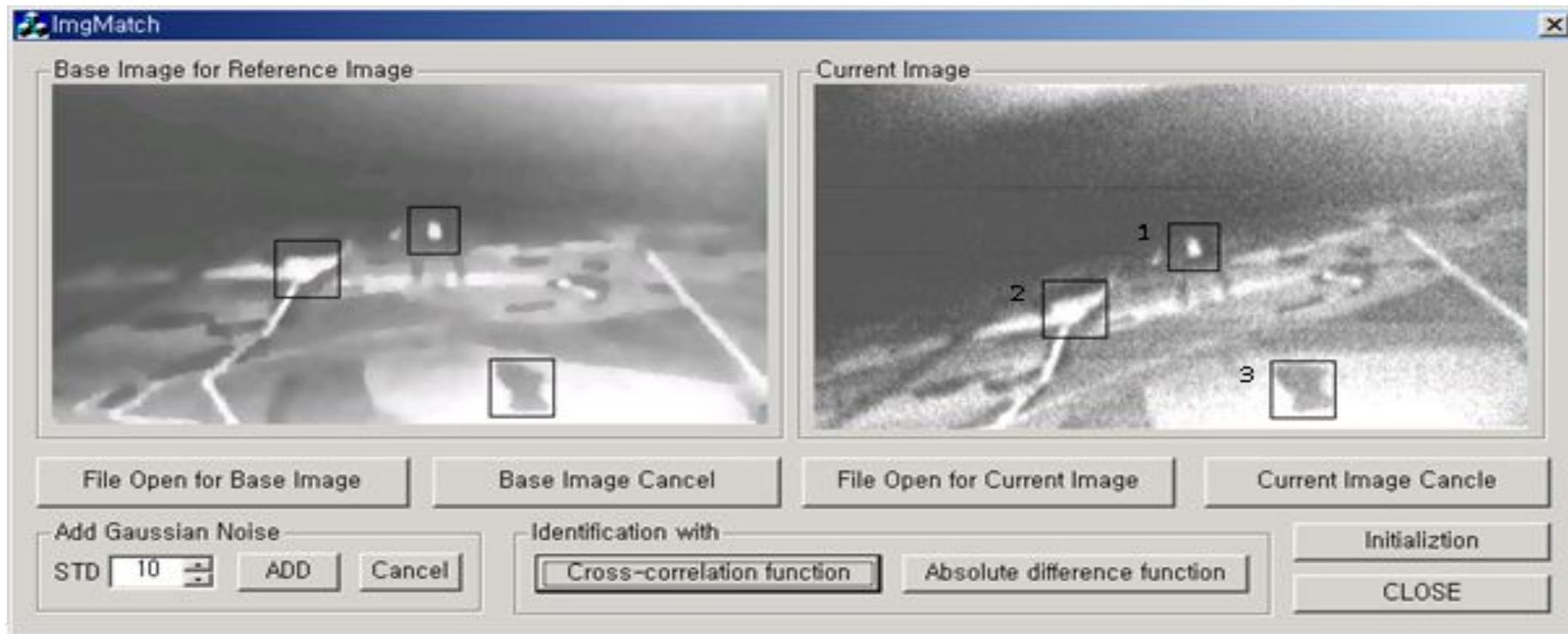
Предварительная обработка изображений

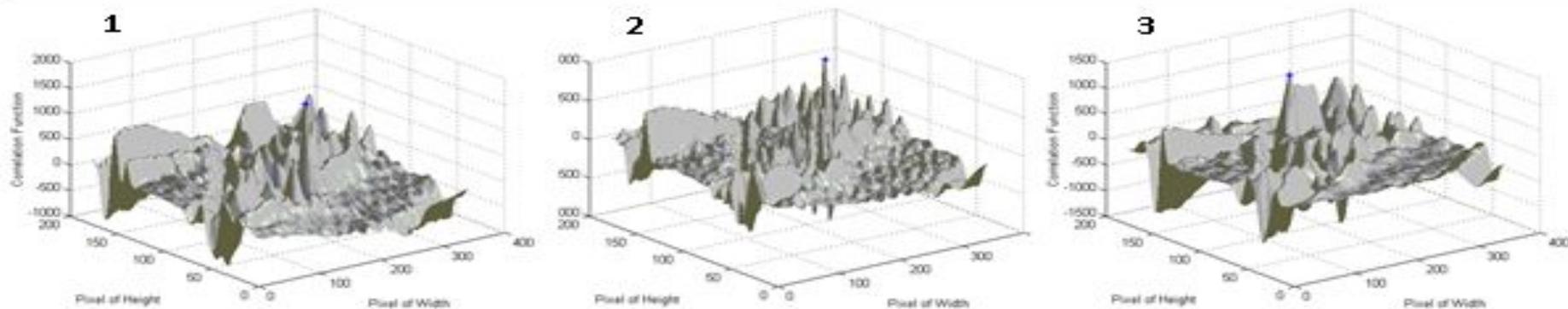
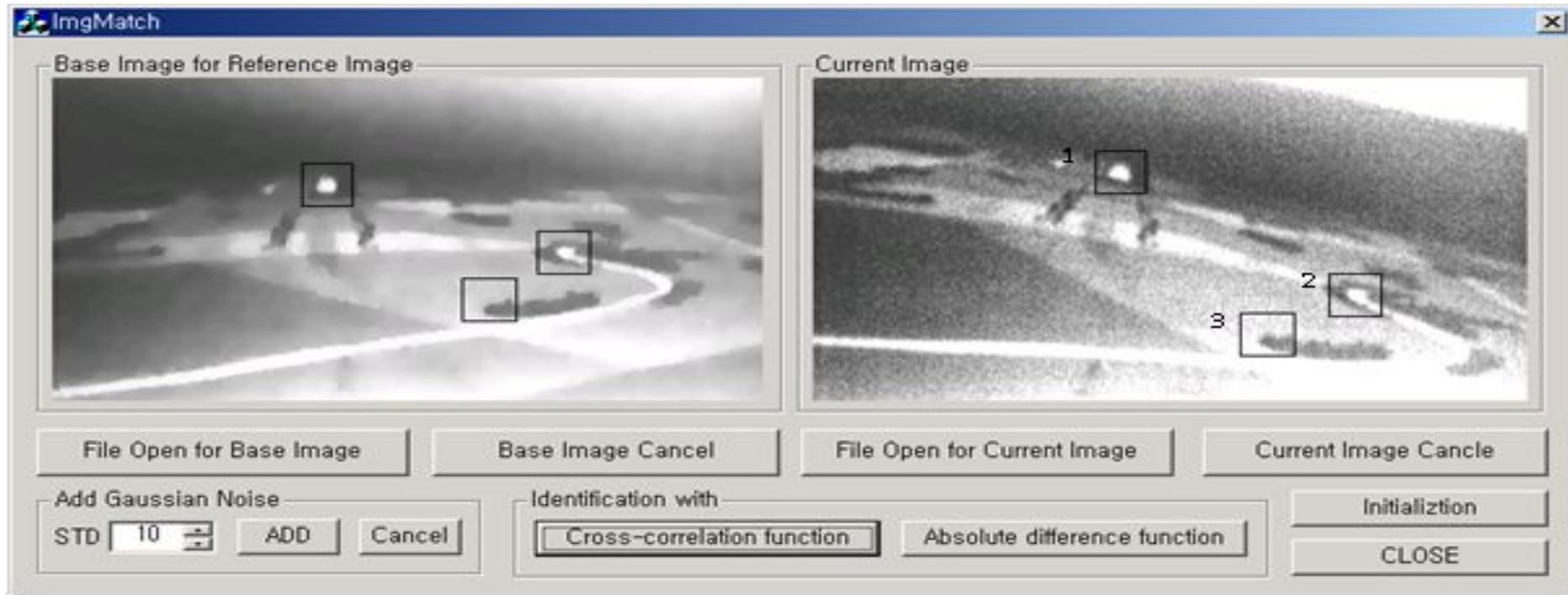


Выбор эталонных изображений



Описание эталонных изображений





Анализ результатов полунатурного моделирования подтверждает работоспособность (по точности) выбранных АОИ и результаты исследований на основе математического моделирования.

## Характеристики точности используемых навигационных подсистем

В этой таблице характеристики точности БИНС и GPS приемник (DGPS) получены на основе паспортных данных инерциального устройства – LN-94 (Litton, [35]) и паспортных данных приемника GPS – The Cargo Utility GPS Receiver (CUGR, Trimble, [37]).

Навигационная подсистема	Характеристики точности
БИНС	До 1,7 км/час
Радиовысотомер	Среднеквадратическая ошибка – 1,5 м
GPS приемник (DGPS)	Среднеквадратическая ошибка – 5...10 м
Система наблюдения	Выбранная ошибка: 0...10 пиксель

## Характеристики бортовых подсистем

Характеристика аппарат. набл.	Значение
Относительное фокусное расстояние бортовой аппаратуры	600 пикселей
Размер принимаемого изображения	512 × 512 пикселей
Угловое поле	45 градусов

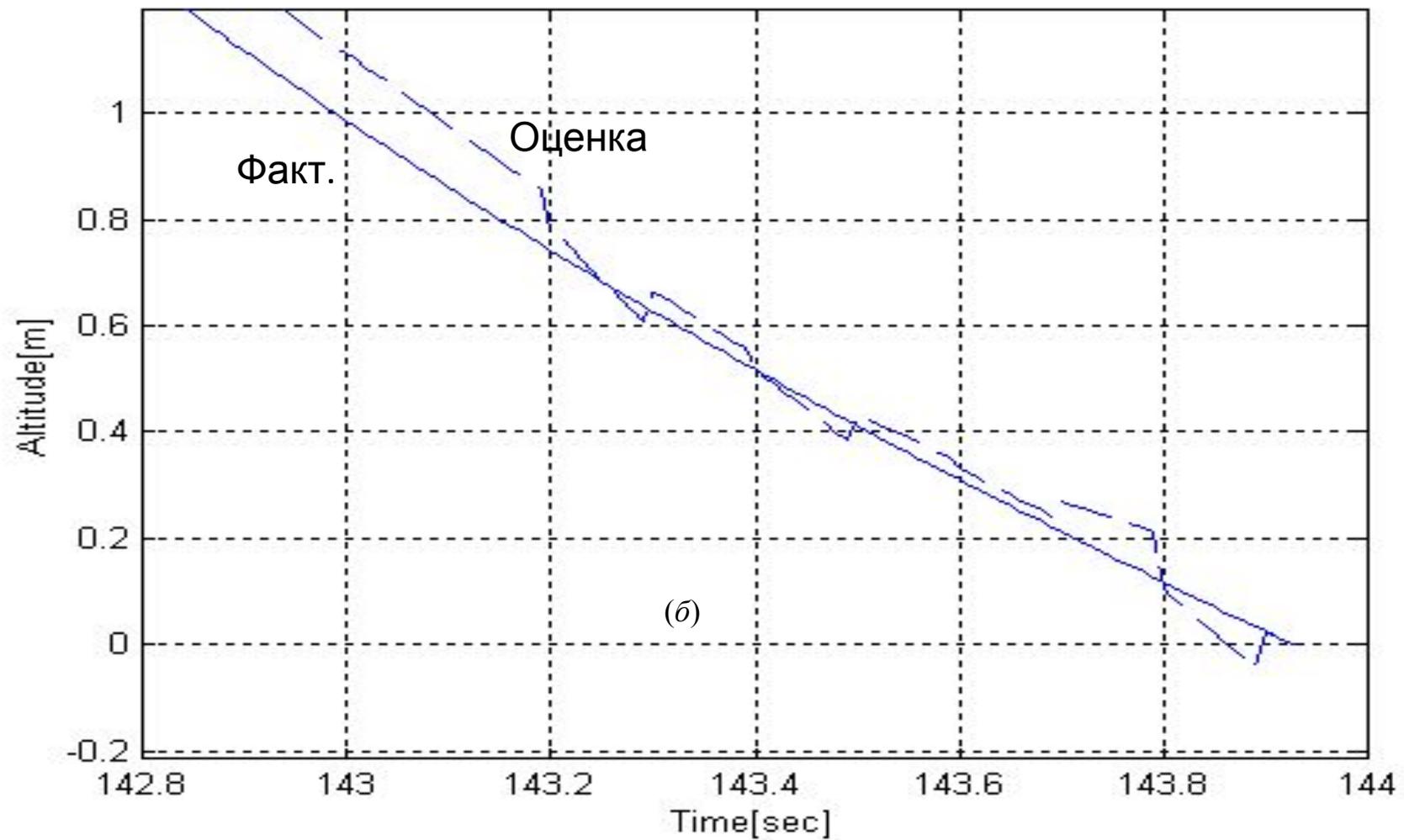
Вид погрешности	Величина погрешности
Постоянные погрешности (1σ)	$0,25 \times 10^{-4} \text{ g}$
Коэффициенты затухания корреляционных функций для случайных погрешностей	0,05 1/с
Среднеквадратические отклонения случайных измерительных шумов	$10^{-4} \text{ g}$
Погрешности масштабных коэффициентов	$4 \times 10^{-5}$

Вид погрешности радиов.	Величина погрешности
Постоянная погрешность (1σ)	1,5 м
Коэффициент затухания корреляционных функций для случайной погрешности	0,1 1/с
Среднеквадратическое отклонение случайного измерительного шума	0,3 м
Другие погрешности определения высоты на основе радиовысотомера	0,5 м

Вид погрешности гириск.	Величина погрешности
Постоянные погрешности (1σ)	0,01 градус/час
Коэффициенты затухания корреляционных функций для случайных погрешностей	0,005 1/с
Среднеквадратические отклонения случайных измерительных шумов	0,01 градус/час

Погрешности измерения псевдодальности	Среднеквадратическая ошибка [метр]		
	Постоянная	Случайная	Сумма
Погрешность, вносимая навигационной аппаратурой потребителя	0,5	0,2	0,5
Погрешность, вносимая бортовой аппаратурой спутника	20,0	0,7	20,0
Погрешность координат спутника	2,1	0,0	2,1
Погрешность, вызванная ионосферной задержкой сигнала	4,0	0,5	4,0
Погрешность, вызванная тропосферной задержкой сигнала	0,5	0,5	0,7
Погрешность, вызванная эффектом многолучевости	1,0	1,0	1,4
Все погрешности (rms)	20,5	1,4	20,6
Координаты контрольно-корректирующей станции (ККС) относительно ВПП	(-1000 м, 30 м, 3000 м)		

# Пример оценки высоты полета в режиме посадки



## Условия реализации автоматической посадки

Вар.	Условие реализации СН			Высота 30 м		Высота 15 м		Высота 2,4 м		Соответствие требований [Категория]	
	$\Delta П$ [п.]	$N_{но}$	$f_{СН}$ [Гц]	$2\sigma_l$ [м]	$2\sigma_h$ [м]	$2\sigma_l$ [м]	$2\sigma_h$ [м]	$2\sigma_l$ [м]	$2\sigma_h$ [м]	Бок.	Вер.
1	0,5	5	10	0,12	0,30	0,42	0,64	1,04	0,64	III	II
2			10	0,13	0,35	0,47	0,67	1,22	0,68	III	II
3		3	5	0,23	0,64	0,63	0,86	1,53	0,86	III	II
4			2	0,69	1,43	1,64	1,47	3,56	1,54	III	I
5			1	10	0,20	0,35	0,87	0,62	2,24	0,70	III
6	5,5	3	10	0,30	0,52	0,98	0,69	2,41	0,68	III	II
7			5	0,44	0,75	1,30	0,95	2,91	0,91	III	II
8			2	0,76	1,53	1,71	1,55	3,59	1,55	III	I

В таблице показаны категории посадки, которые могут быть реализованы, при различных условиях работы СН.

В частности, по варианту 1 (из табл.): при условиях, что обеспечивается точность совмещения ЭИ и ТИ - 0,5 пикселя, использованы 5 ориентиров и бортовой процессор позволяет реализовать алгоритм обработки изображений с частотой не менее 10 Гц,

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы

Определены требования к навигационной системе, обеспечивающей автоматическую посадку самолета на аэродром, необорудованный радиомаячными системами.

Разработана методика исследования точности работы НС, включающей ИНС, СНС, РВ и СН, основанная на математическом моделировании режима посадки самолета при различных условиях и сравнении оценок и фактических параметров полета самолета.

Разработаны исследовательские модели и алгоритмы работы навигационных подсистем.

Разработана методика и получена аналитическая зависимость для расчета размеров эталонных изображений (ЭИ), требуемых для совмещения ЭИ и текущих изображений наземных ориентиров с заданной точностью.

Проведено моделирование работы исследовательской модели НС в составе: БИНС, GPS-приемник, РВ и СН с целью определения потенциальной возможности обеспечения автоматической посадки.

Разработана методика определения условий реализации автоматической посадки ЛА.

Показано, что при определенных условиях рассмотренный вариант НС, позволяет в дневное время суток обеспечить посадку самолета:

в боковом направлении - в соответствии с категорией III;

в вертикальном направлении - в соответствии с категориями I и II.

# Лк. 19, 20. Комплексование изображений разных диапазонов спектра в МСН

По материалам кандидатской диссертации М.С. Михеева «КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗНЫХ ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ». Научн. рук. Н.В. Ким.

**Тепловизионный канал (ТПВ)** предназначен для получения на экране монитора изображения в инфракрасном диапазоне спектра (3,7...4,8 мкм). Данный канал позволяет обнаруживать и идентифицировать объекты, обладающие тепловым контрастом.

**Телевизионный канал (ТВ)** обладает цветовым контрастом и предназначен для получения изображения наблюдаемой сцены в видимом диапазоне спектра (0,38...0,76 мкм).

Полезная информация, необходимая для принятия решения человеком-оператором, может быть распределена между изображениями разного спектра. В этом случае оператор вынужден анализировать несколько изображений и сопоставлять их между собой, что приводит к задержкам в принятии решения. По этой причине целесообразно выводить на дисплей единое комплексированное изображение, синтезированное из исходных ТПВ и ТВ кадров. Такой режим позволяет повысить информативность системы, сконцентрировав на одном кадре детали наблюдаемой сцены в инфракрасном и в видимом диапазонах спектра.

# Проблемы

- В настоящее время не существует единой методики комплексирования изображений в МСН. В существенной степени это связано с тем, что **оценка качества предъявляемых изображений является субъективной и зависит от психофизиологических особенностей оператора, решаемой задачи и условий наблюдения.**
- Разработанные на данный момент алгоритмы синтеза имеют одну общую особенность: **объединение информации происходит без учета целевой задачи.**
- В то время как в ряде применений МСН целевой задачей оператора является поиск, распознавание и слежение за объектами интереса (живой силы и техники). комплексированное изображение должно обеспечивать:
  1. Отображение основной информации, содержащейся в исходных ТВ и ТПВ изображениях;
  2. Максимально точную привязку ТВ и ТПВ изображений;
  3. Выделение предполагаемых объектов интереса в соответствии с решаемой целевой задачей.

# Цель исследований

Повышение качества предъявляемых оператору изображений за счет комплексирования исходных изображений разных диапазонов спектра и выделения (контрастированием и/или маркировкой) предполагаемых объектов интереса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ существующих методов привязки с целью выбора наиболее эффективного критерия сравнения разносектральных изображений.
2. Разработка методики оценки ошибки привязки разносектральных изображений.
3. Разработка методики повышения качества предъявляемых оператору изображений на основе выделения объектов интереса.
4. Разработка алгоритмов поиска предполагаемых объектов интереса.
5. Разработка алгоритма комплексирования ТВ и ТПВ изображений, основанного на пространственном совмещении изображений и выделении объектов интереса с помощью их контрастирования или маркировки.

# Научная новизна полученных результатов

1. Предложена новая методика привязки изображений разных диапазонов спектра, основанная на критерии максимума взаимной информации.
2. Разработана методика оценки качества алгоритмов привязки ТВ и ТПВ изображений, основанная на вычислении радиуса корреляции изображений. Методика позволяет получить оценку точности использованного критерия.
3. Предложен новый подход к повышению качества предъявляемых оператору изображений, основанный на адаптивной сегментации ТПВ изображения, обнаружении предполагаемых объектов интереса, наложении выделенных фрагментов ТПВ изображения на основное ТВ изображение и маркированиидвигающихся объектов.

# Практическая ценность

полученных в диссертационной работе результатов:

1. Разработанная методика привязки изображений разных диапазонов спектра на основе критерия максимума взаимной информации обеспечивает более точную оценку, чем распространенные в задачах регистрации корреляционные методы. В частности, средняя ошибка определения смещения в 10-15 раз меньше, чем при использовании метода суммы модуля разности, а ошибка определения изменения масштаба меньше на 20-25%.
2. Разработанная методика локального синтеза, основанная на вычислении адаптивного порога сегментации ТПВ изображения и выделении предполагаемых объектов интереса позволяет повысить качество предъявляемых оператору изображений в 1.5-2 раза.
3. Комплексование ТВ и ТПВ изображений многоканальной системы наблюдения позволит снизить информационную загруженность оператора и повысить надежность его работы.

# Подготовка технического предложения

- Обзор и анализ литературных источников по данной проблеме.
- Анализ существующих методов синтеза изображений.
- Постановка задачи исследований.
- Формирование технического предложения.

## Анализ источников

Проектируемые в настоящее время многоканальные системы наблюдения имеют очевидный недостаток – человек–оператор комплекса вынужден анализировать и сопоставлять ТВ и ТПВ изображение, поступившие на один момент времени.

Как последовательное, так и параллельное (на нескольких мониторах) предъявление оператору изображений приводит к чрезмерной психофизической нагрузке на него. Зрительная система человека является одноканальной поэтому комплексирование двух изображений и представление результата на одном общем кадре позволяет увеличить информативность поступающих видеоданных и снизить, таким образом, нагрузку на человека-оператора.

В литературе имеется описание ряда методов комплексирования изображений разного спектра, однако основная часть работ не учитывает конструктивных особенностей МСН. Поэтому актуальной является решаемая задача систематизации методов комплексирования изображений и определения путей их развития для создания условий их применения в МСН.

# Сложность реализации

Прямое применение описанных методов синтеза в МСН невозможно по причине различного разрешения и относительной пространственной деформации исходных изображений

Различное разрешение обусловлено форматом матрицы тепловизионного датчика. На сегодняшний день доступные тепловизионные матрицы уступают телевизионным в разрешении в 1.5-3 раза.

Пространственная деформация вызвана рядом факторов:

- Проблема параллакса. Между изображениями образуется относительная деформация, зависящая от расстояния между параллельными визирными осями видеокамеры и тепловизора. Наблюдаемые изображения, в зависимости от дальности наблюдения и угла зрения будут смещены относительно друг друга в вертикальной и горизонтальной плоскости.
- Ошибка выставки одинакового угла зрения в двух каналах. Результаты эксперимента подтверждают (таблица 1.1), что средняя ошибка составляет 15%. Данный фактор приводит к тому, что наблюдаемые изображения имеют разный масштаб.

# Ошибка выставки угла зрения для ТПВ канала

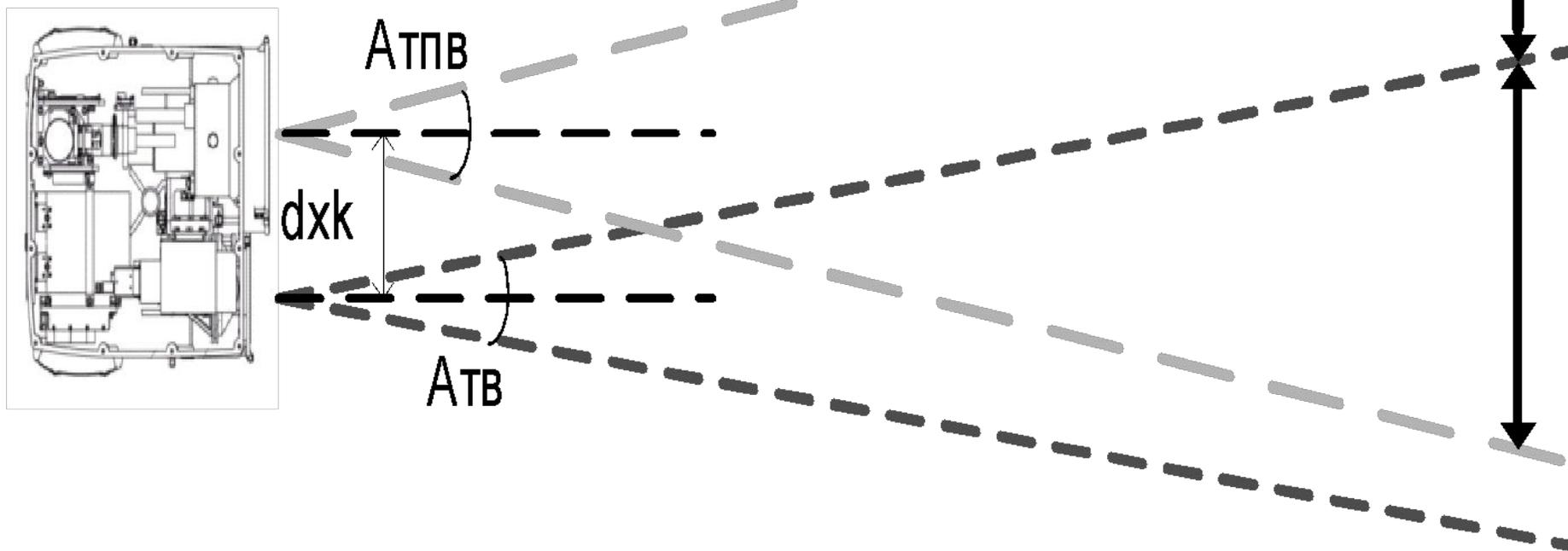
Табл.1.1

<b>Измеренный фокус (мм)</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>28</b>	<b>50</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>240</b>
<b>Истинный фокус (мм)</b>	12	16	25	44	88	115	<b>240</b>
<b>Ошибка (%)</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>0</b>

# Поля зрения ТВ и ТПВ каналов в горизонтальной плоскости

Изображения имеют:

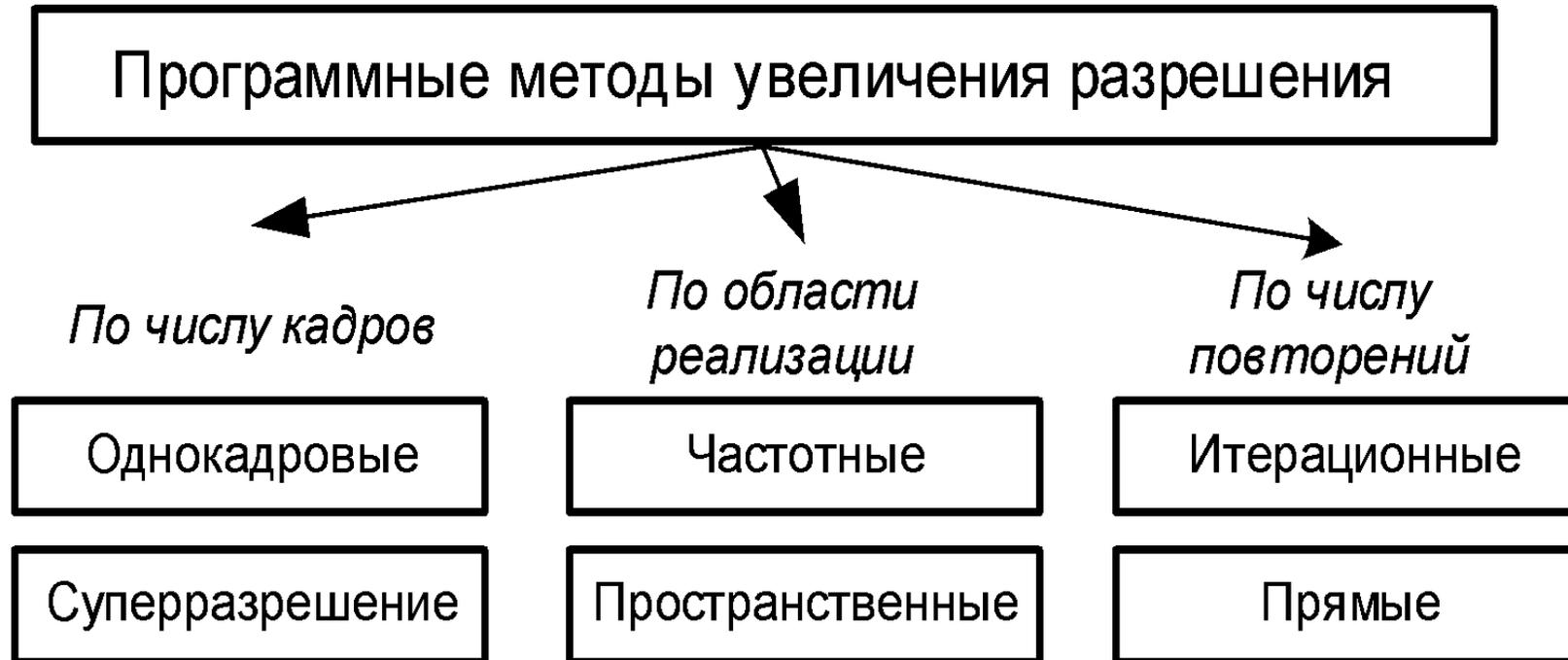
1. Различное разрешение;
2. Горизонт. и верт. смещения;
3. Различный масштаб;
4. Различное содержание.



# Повышение разрешения изображения

При синтезе ТПВ и ТВ изображений необходимо, чтобы их размеры (разрешение) были согласованы.

Повышение разрешения необходимо по причине того, что разрешение ТПВ кадра (320x240) приблизительно в 1.5-3 раза меньше разрешения ТВ кадра (1024x768).



Классификация методов увеличения разрешения

# Схема метода быстрого суперразрешения



Метод быстрого суперразрешения

# Повышение разрешения изображений

На первом этапе кадры исходной видеопоследовательности низкого разрешения интерполируются методом бикубической интерполяции.

На следующем этапе определяется межкадровое движение между опорным кадром и остальными кадрами интерполированной видеопоследовательности.

Затем с учетом найденного межкадрового движения интерполированные кадры исходной видеопоследовательности совмещаются усреднением. Результатом этого этапа является размытое совмещенное изображение высокого разрешения.

На последнем этапе происходит устранение размытости фильтром Винера и формируется результирующее изображение высокого разрешения.

Базовыми методами оценки межкадрового движения являются корреляционный метод и метод Лукаса-Канаде.

Корреляционный метод основан на сравнении регионов. Целевой функцией для лучшего соответствия блоков является функция SAD

$$K_{dx,dy} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{i \max} \sum_{j=1}^{j \max} |B_{i,j}(f-1) - B_{i+dx,j+dy}(f)|$$

$$(dx, dy) = \arg \min_{(dx,dy) \in D} (K_{dx,dy})$$

# Метод Лукаса-Канаде

Метод Лукаса-Канаде для оценки межкадровых движений использует пространственно-временные производные и основан на уравнении оптического потока и дополнительных ограничениях на структуру оптического потока

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i I_x(q_i)^2 & \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) \\ \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) & \sum_i I_y(q_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_i I_x(q_i)I_t(q_i) \\ -\sum_i I_y(q_i)I_t(q_i) \end{bmatrix}$$

где  $q_i$  – пиксели внутри окна,  $I_x(q_i)$ ,  $I_y(q_i)$ ,  $I_t(q_i)$  – частные производные в т.  $q_i$ .

Метод Лукаса-Канаде обладает высокой субпиксельной точностью. Недостатками метода являются существенное увеличение ошибки при увеличении межкадровых движений.

# Задача привязки изображений

Под привязкой изображений понимают процесс приведения к одной системе координат двух изображений сцены. Изображения могут быть сделаны в разное время, и/или с разной точки наблюдения, и/или с разных датчиков.

Привязка является ключевым шагом всех задач анализа изображений, в которых финальная информация получается из комбинации различных источников данных, таких как синтез изображений, детекция изменений и восстановление изображений.

Обычно привязка требуется в дистанционном зондировании:

- мониторинг окружающей обстановки;
- мозаичность, прогноз погоды;
- создание изображений суперразрешения;
- интегрирование информации в географических системах;
- медицина (комбинирование данных компьютерной томографии и ядерного магнитного резонанса для получения более полной информации о пациенте);
- картография (обновление карт);
- компьютерное зрение (локализация цели, автоматический контроль качества).

# Методика привязки изображений

Большинство методов привязки изображений состоит из четырех шагов:

- **Детекция особых точек.** Вручную, либо автоматически детектируются выделяющиеся и отличительные детали (регионы близкие к границам, контурам, пересечение линий углы и т.п.). Для дальнейшей обработки данные объекты могут быть представлены точками (центр масс, концы линий), которые называются контрольными точками.
- **Привязка особых точек.** На этом шаге устанавливается соответствие между объектами, обнаруженными на текущем и опорном кадре. Для этой цели используются различные меры описания и сходства объектов наряду с пространственными связями между объектами.
- **Оценка модели трансформации.** Оцениваются тип и параметры так называемой отображающей функции, выравнивающей принимаемое и опорное изображение. Параметры отображающей функции вычисляются посредством установленного соответствия объектов.
- **Передискретизация и трансформация изображения.** Принятое изображение трансформируется посредством отображающей функции. Значения изображения в нецелочисленных координатах вычисляются подходящей техникой интерполяции.

## Использование особых точек

Недостаток алгоритмов, использующих особые точки (рисунок), – низкая производительность, что обусловлено высокой вычислительной сложностью операций по поиску и сопровождению особых точек. При этом следует отметить преимущества таких алгоритмов:

- Позволяет существенно снизить количество вычислений, а, следовательно, повысить скорость.
- Позволяет уменьшить влияние шумов, за счет исключения из рассмотрения участков с низким отношением сигнал-шум, что ведет в высокой надежности определения локального движения



Представлено изображение, полученное в ТПВ диапазоне. Крестообразными метками выделены характерные точки, которые были определены алгоритмом, описанным в

## Блочные методы

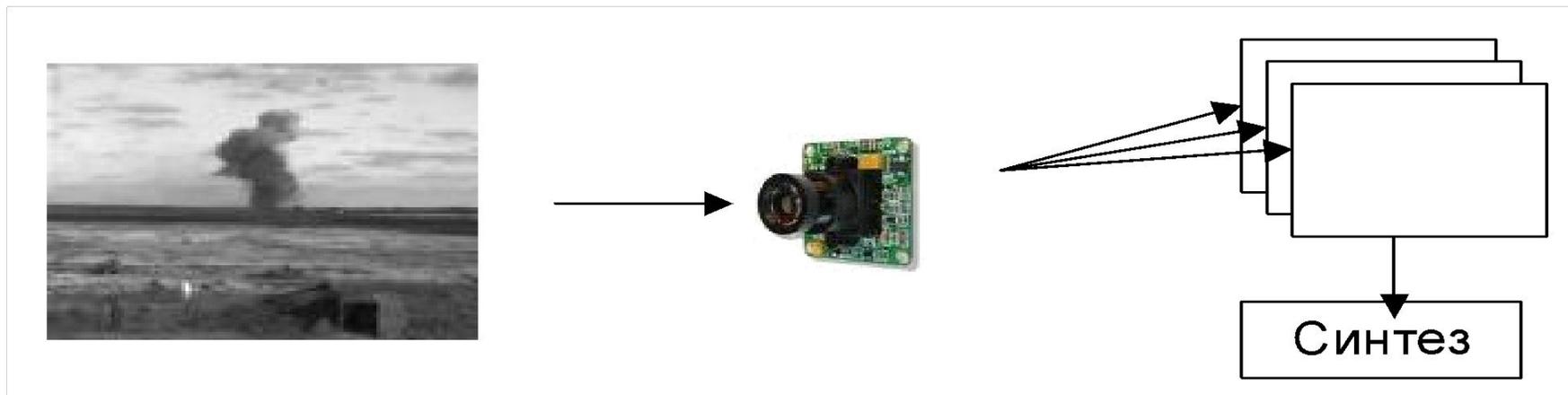
- Блочные методы, называемые также методами корреляционного типа или привязкой по эталону объединяют процедуры детекции особых точек и привязки. Данные методы позволяют обрабатывать изображения без предварительного выделения информативных объектов. Для оценки соответствия используются окна заданного размера или даже целые изображения.
- Ограничение блочных методов связано с параметрами используемых блоков. Во-первых, прямоугольное окно, которое чаще всего используется, может обрабатывать лишь параллельные перемещения. Другой недостаток таких методов в требовании к содержанию блока. Высока вероятность, что блок, содержащий ровный участок сцены без заметных деталей, будет некорректно привязан к другому гладкому участку. Предпочтительно, обнаружить особые точки для привязки на участке изображения.
- Наиболее распространенная мера – кросс-корреляция, включающая взятие блока первого изображения и вычисление кросс-корреляции между ним и различными блоками второго изображения.

# Методы синтеза разноспектральных изображений

**Слияние или синтез изображений (image fusion).** Помимо снижения объема данных, цель слияния в создании новых изображений, которые более удобны с точки зрения восприятия человеком/машиной и для дальнейших задач обработки, таких как сегментация, обнаружения объектов, распознавание цели, применяемых при дистанционном зондировании и в медицинских приложениях. Например видимое и инфракрасное изображения могут быть слиты в единое для помощи пилотам при выполнении посадки в условиях плохой видимости.

Различают системы слияния на основе одного и нескольких датчиков. Первые широко применяются в задачах повышения разрешения многокадровыми методами. В этом случае информация с последовательности кадров используется для формирования единого кадра, разрешение которого превосходит исходное разрешение видеопоследовательности.

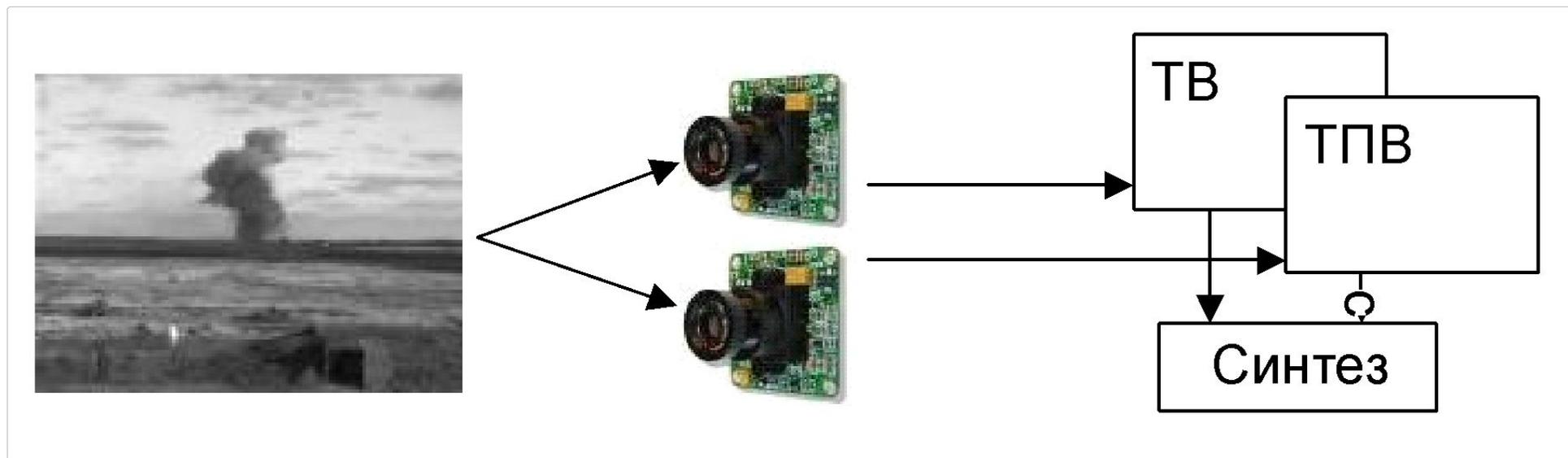
## Однодатчиковая система слияния



Возможности данной системы ограничены характеристиками используемого датчика. Так датчик, работающий в видимом диапазоне спектра, такой как видеокамера, хорошо функционирует в ярко освещенных условиях, но не приспособлен для темных, ночных сцен и неблагоприятных условий, таких как дождь и туман.

# Система слияния на нескольких датчиках

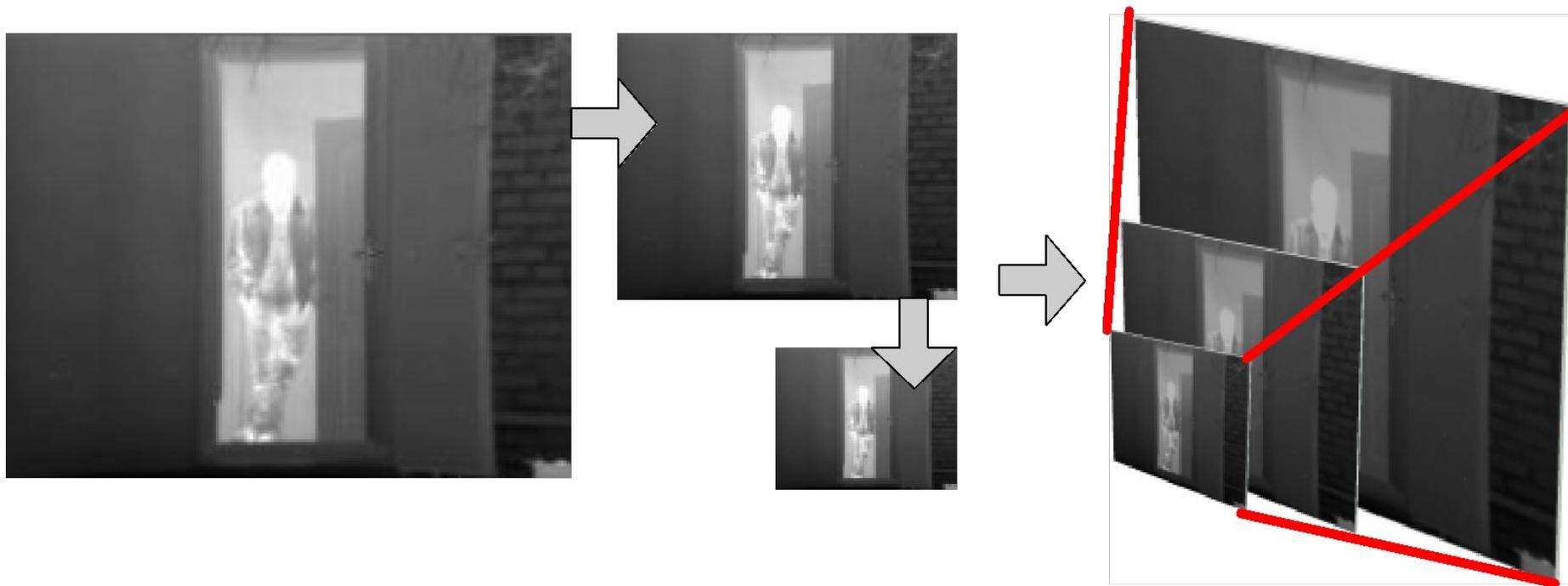
Системы слияния, состоящие из нескольких датчиков, лишены недостатка однодатчиковых, комбинируя несколько изображений с нескольких сенсоров и формируя единое композитное изображение.



В данном примере ТПВ датчик дополняет ТВ камеру и происходит синтез двух изображений. Такой подход преодолевает описанную выше проблему однодатчиковой системы, поскольку телевизионная камера хорошо приспособлена для дневных условий, а тепловизионная камера позволяет получить качественное изображение в слабоосвещенных условиях.

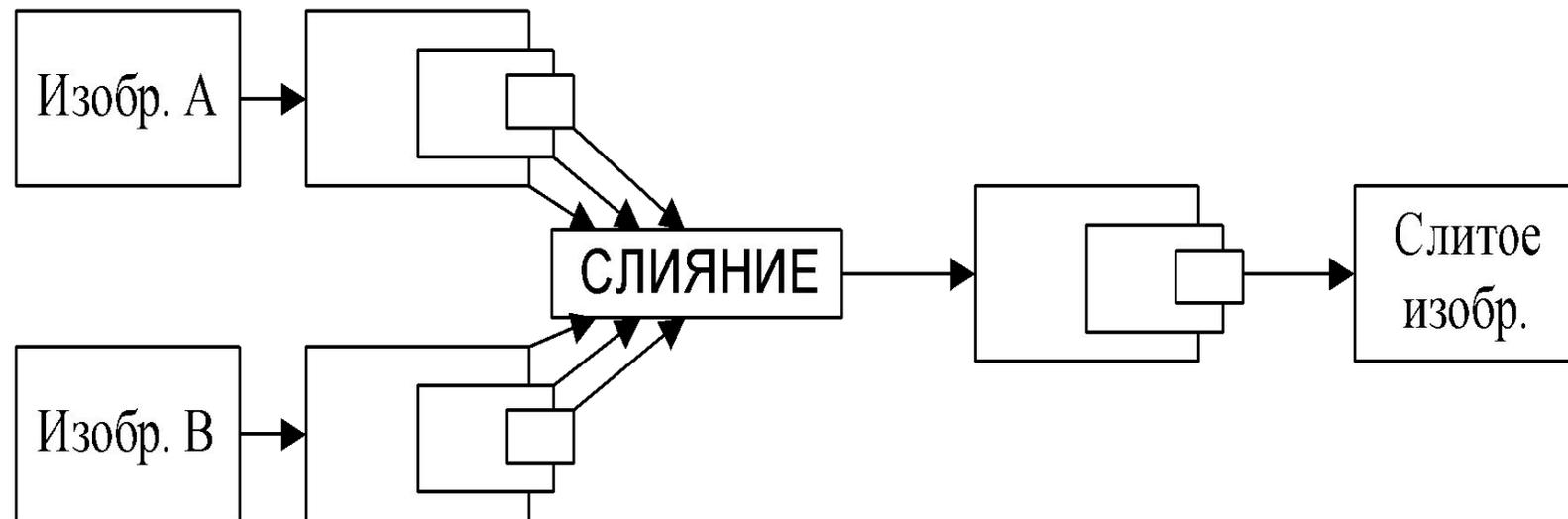
# Пирамидальное многомасштабное представление

Многомасштабное представление изображения, называется пирамидой Гаусс-Лапласианов. Его идея в декомпозиции изображения в набор компонент (обработки полосовым фильтром), каждая из которых представляет различную полосу пространственных частот.



# Пирамидальное многомасштабное представление

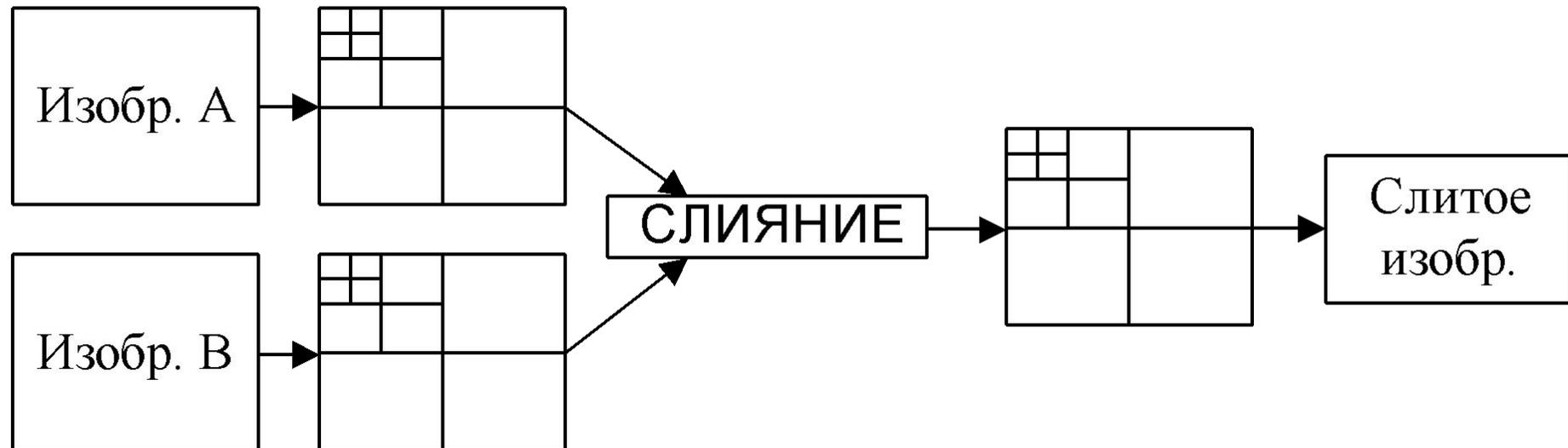
Пирамида – это последовательность изображений, где каждый уровень является отфильтрованной и сжатой копией предыдущего. Самый низкий уровень пирамиды имеет то же разрешение, что и исходное изображение и включает информацию о наивысшем разрешении.



## Вейвлет - синтез

Один из альтернативных подходов к слиянию основан на вейвлет преобразовании.

$LL$  – полоса содержит усредненную информацию, тогда как остальные коэффициенты несут в себе информацию о пространственной ориентации. Наибольшие по абсолютному значению коэффициенты высоких частот соответствуют выделяющимся деталям: границам и линиям.



# Постановка задачи

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Разработка алгоритма привязки изображений различного спектра при начальном различии в разрешении, масштабе и линейном смещении.
2. Разработка методики оценки ошибки привязки изображений.
3. Разработка методики локального синтеза ТПВ и ТВ изображений с учетом выделения объектов интереса на предъявляемом оператору изображении.
4. Разработка и исследование алгоритмов обнаружения предполагаемых объектов по яркости и признакам движения.
5. Разработка алгоритма комплексирования ТВ и ТПВ изображений, включающего процедуры пространственного совмещения и синтеза изображений с выделением объектов интереса.
6. Разработка комплекса программ, реализующего разработанную методику и модели.

## **Лк. 13, 14. Комплексирование изображений разных диапазонов спектра в КСН**

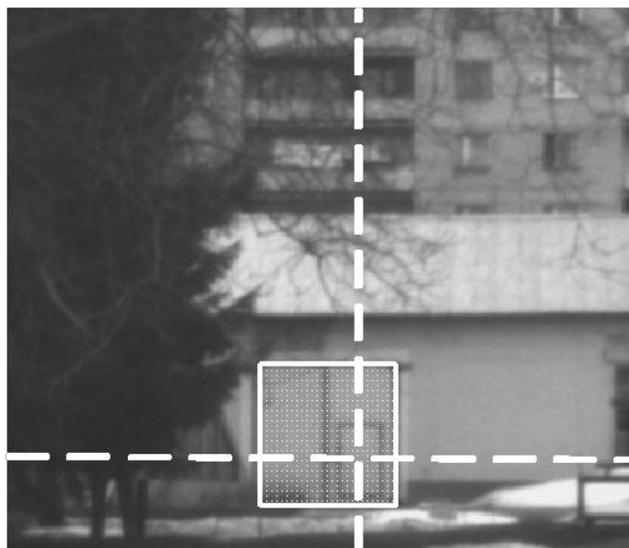
1. Методика привязки изображений;
2. Критерий взаимной информации изображений;
3. Алгоритм отжига;
4. Синтез изображений разных диапазонов спектра;
5. Поиск объектов по яркости;
6. Поиск по признакам движения.

# Методика привязки изображений

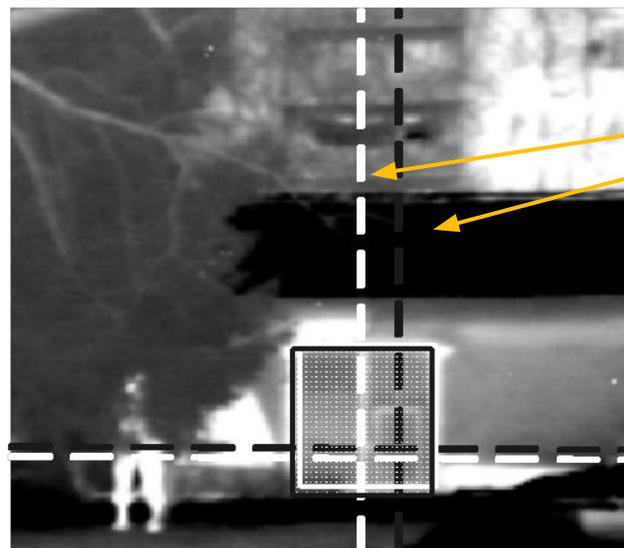
Данная методика пространственного совмещения основана на классической методике привязки изображений. По причине неоднозначности (при выделении на изображениях разного спектра характерных точек) предлагается использовать блочные методы.

Методика привязки состоит из следующих этапов:

- 1) Согласование блоков: формирование блоков и вычисление корреляционной функции для соответствующих блоков.
- 2) Оценка параметров модели трансформации: оцениваются смещения и коэффициенты масштаба между соответствующими блоками.
- 3) Трансформация изображений: выполняется трансформация одного из исходных изображений в соответствии с найденными параметрами.



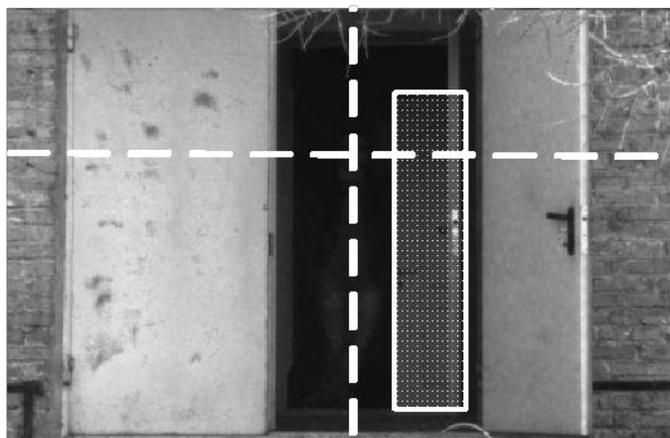
а)



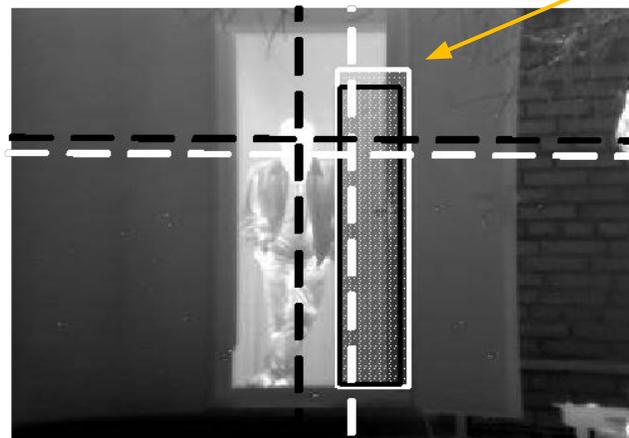
Смещения

Для ТПВ кадра уже  
применено повышение  
разрешения

б)  
Пары ТВ и ТПВ изображений.



в)



Различия  
масштаба

г)

# Критерий максимума взаимной информации

В блочном классе методов сравнение двух изображений осуществляется по прямоугольной окрестности (блоку), внутри которой смещение считается постоянным. Смещение этой окрестности определяется поиском наилучшего совпадения блоков в соответствии с выбранным критерием. В работе предлагается использование нового критерия на основе взаимной информации.

Исходя из полученных оценок эффективности различных методов, предлагается для определения параметров трансформации использовать критерий взаимной информации (ВИ).

ВИ - это статистическая функция двух случайных величин, описывающая количество информации, содержащейся в одной случайной величине относительно другой. Данная мера на примере использования ее при анализе медицинских изображений показала высокую точность и устойчивость при изменении условий освещенности, цвета пикселя, появлении шума, перекрытии сцены и больших значений трансформации.

# Взаимная информация изображений

Взаимная информация  $I(A,B)$  изображений  $A$  и  $B$  определяется собственной энтропией изображений  $H(A)$  и  $H(B)$ , а также совместной энтропией  $H(A,B)$

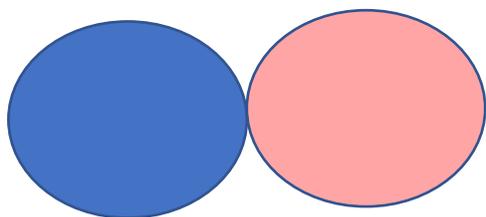
$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B)$$

Собственная энтропия вычисляется по формуле Шеннона

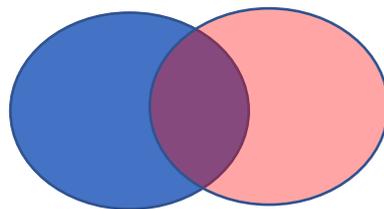
$$H(A) = -\sum_a P_A(a) \log P_A(a); H(B) = -\sum_b P_B(b) \log P_B(b)$$

Совместная энтропия определяется как

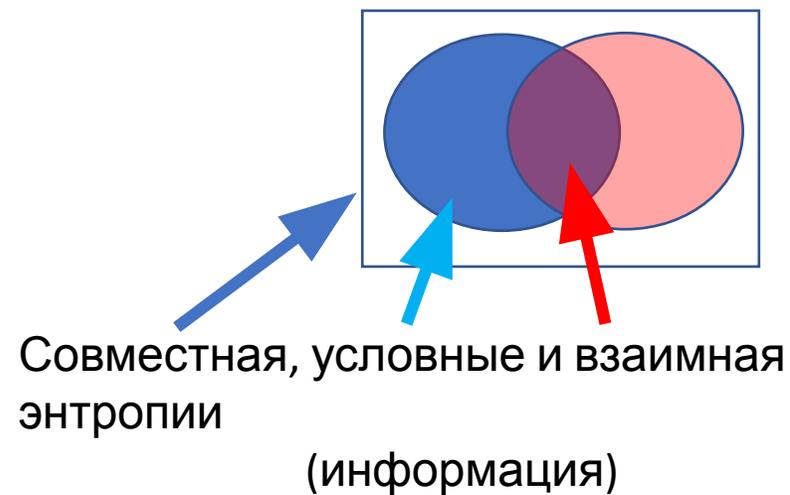
$$H(A, B) = -\sum_a \sum_b P_{AB}(a, b) \log P_{AB}(a, b)$$



$H(A)+H(B)$



$H(A, B)$



# Гистограммы и вероятность

Если рассматривать яркости пикселей изображения  $A$  как отсчеты случайной величины, то распределение частот яркости  $G(a)$ ,  $a = 0..255$  (гистограммы  $A$ ) соответствует плотности распределения вероятности этой величины

$$P_A(a) = G(a) / N_A$$

где  $N$  – размер изображения.

Совместная гистограмма  $G(a,b)$  определяется подсчетом пар пикселей яркости  $a$  на изображении  $A$  и  $b$  на изображении  $B$  ( $a=0...255, b=0...255$ ).

$G(a,b)$  показывает, как часто проявляет себя определенная пара пикселей.

Соответствующая вероятность равна  $P_{AB}(a,b) = G(a,b) / N_A$

# Энтропии процесса

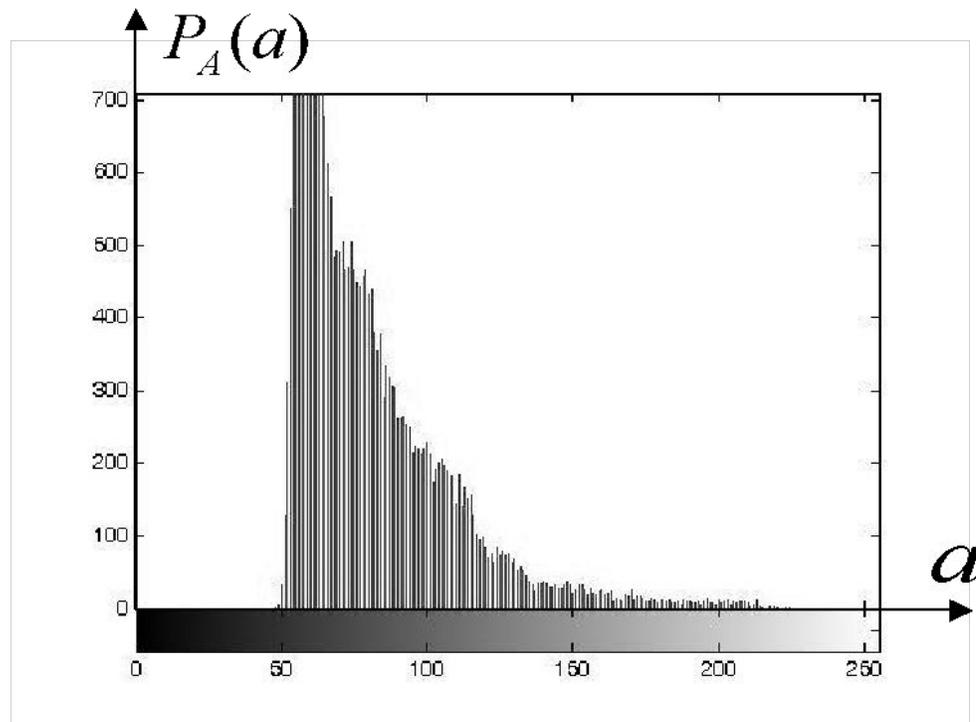
С учетом полученных гистограмм энтропии могут быть представлены в виде

$$H(A, B) = \begin{cases} -\sum_a \sum_b \frac{G(a, b)}{N_A} \log \frac{G(a, b)}{N_A} \\ 0, \text{ при } G(a, b) = 0; \end{cases}$$

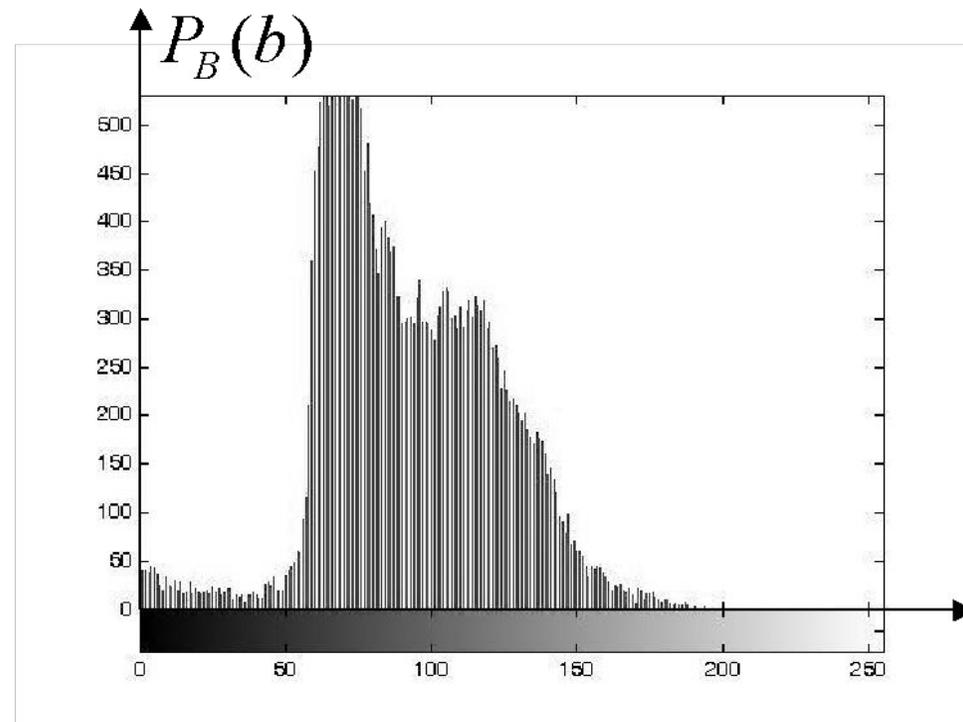
$$H(A) = \begin{cases} -\sum_a \sum_b \frac{G(a)}{N_A} \log \frac{G(a)}{N_A} \\ 0, \text{ при } G(a) = 0; \end{cases} \quad H(B) = \begin{cases} -\sum_a \sum_b \frac{G(b)}{N_A} \log \frac{G(b)}{N_A} \\ 0, \text{ при } G(b) = 0; \end{cases}$$

# Собственные гистограммы

(а) – ТВ, (б) – ТПВ

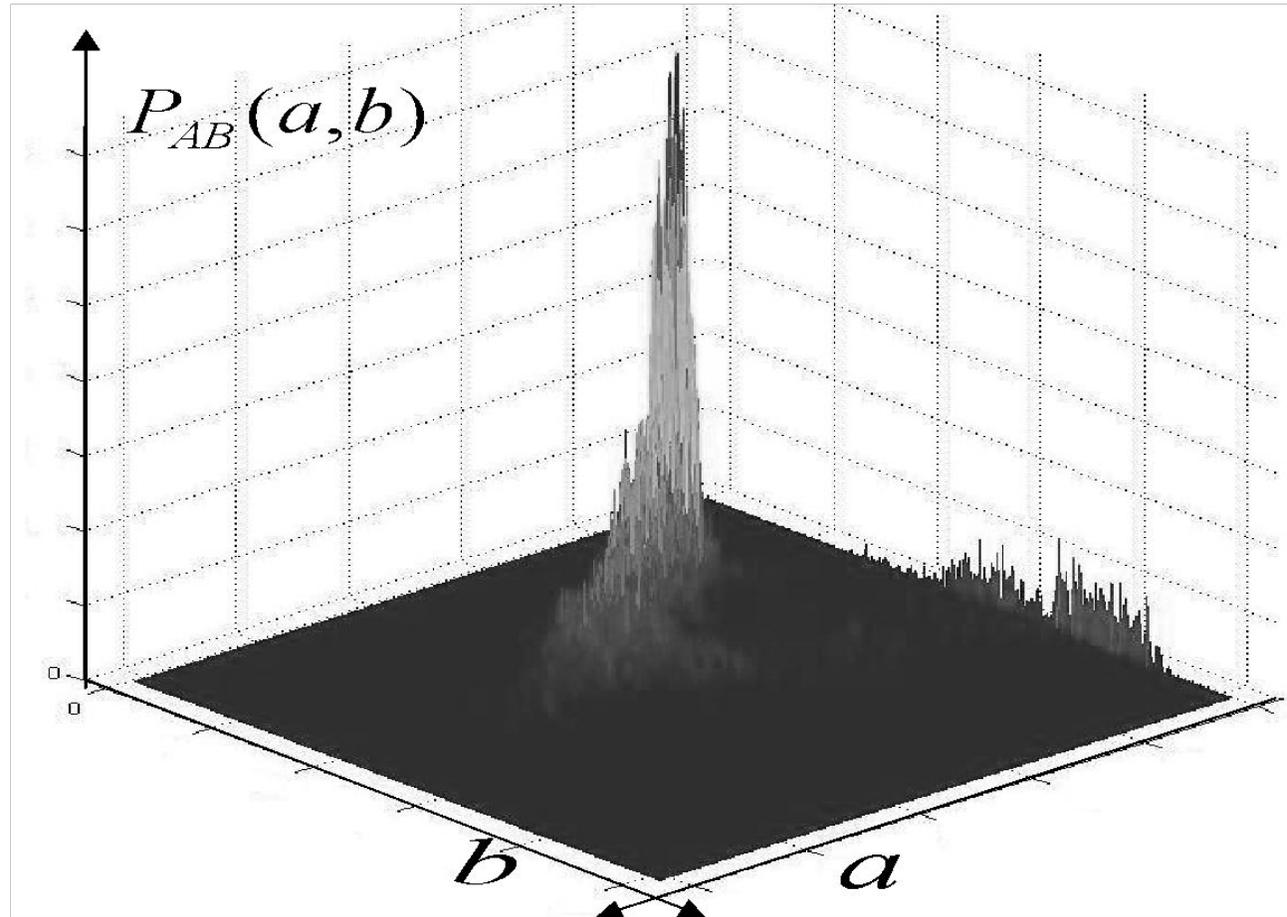


а)

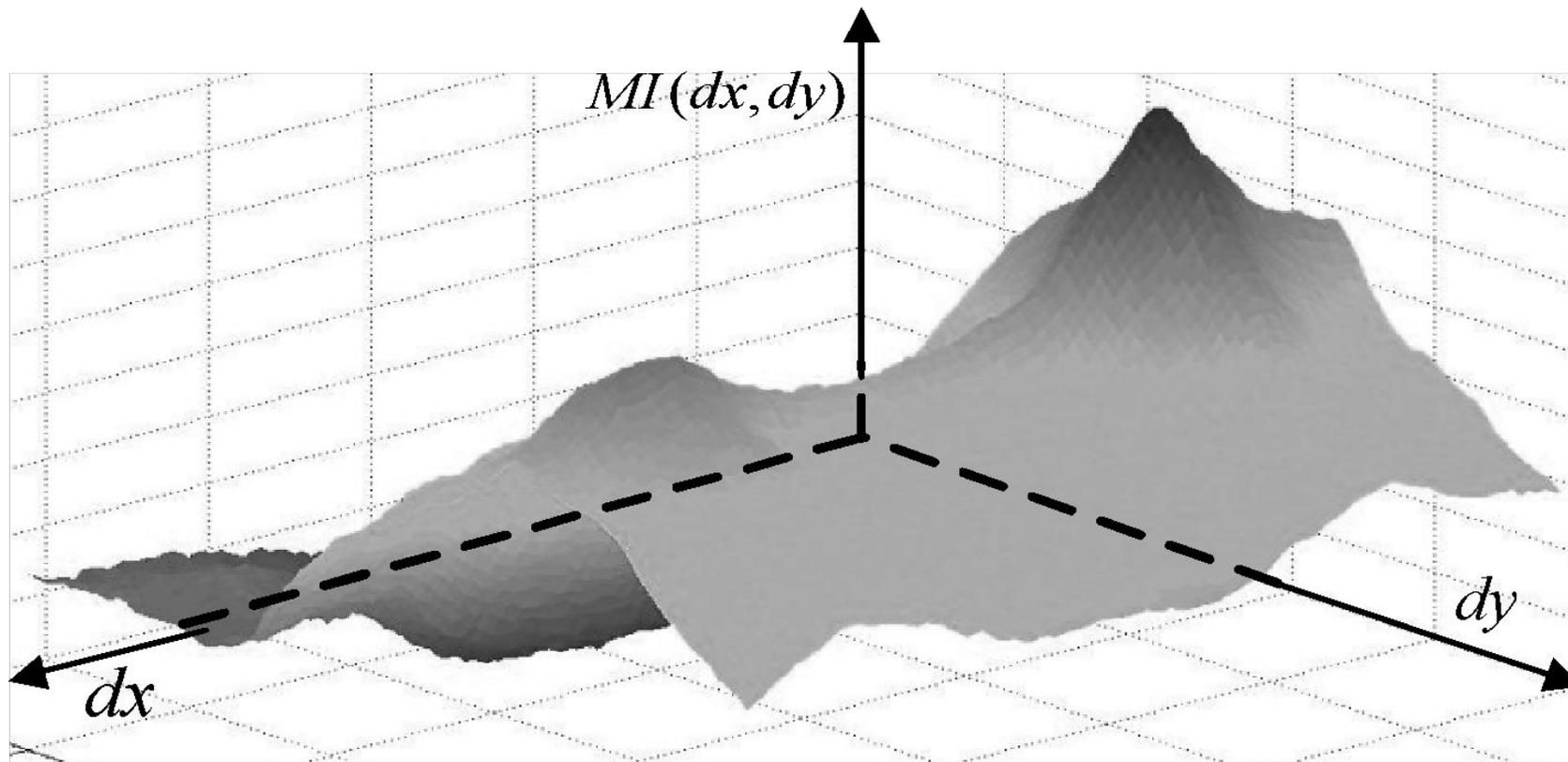


б)

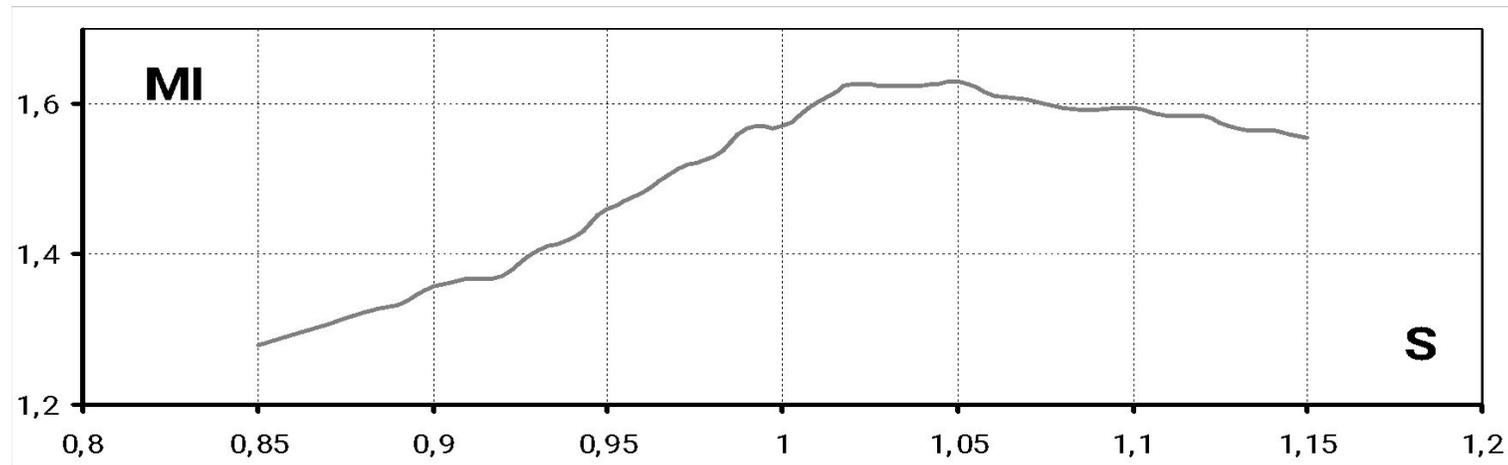
# Совместная гистограмма



# Функция ВИ от смещения



# Функция ВИ от коэффициента масштаба



Можно утверждать, что функция ВИ достигает максимума, когда сравниваемые изображения в наибольшей степени совпадают. Данный максимум соответствует вектору оптимальных параметров  $T$ , которые необходимо определить

$$\max_T I = (T(A), B)$$

На представленных графиках видно, что функция взаимной информации может иметь локальный экстремум, но имеет ярко выраженный максимум в точке оптимального совмещения двух изображений.

# Оптимизация поиска

Вычисление целевой функции осуществляется по каждому блоку. Блок представляет собой квадратный фрагмент изображения.

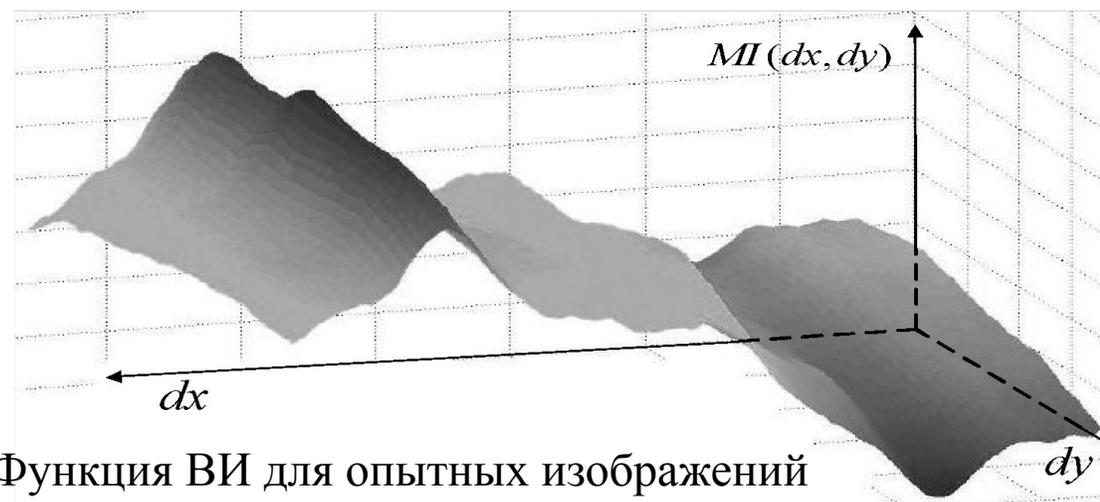
Значительно сократить объем вычислений без потери точности позволяет метод пирамидального сжатия. Изображение подвергается последовательному сжатию до некоторого уровня.

Начиная с самого низкого уровня (с наименьшим разрешением), начинается поиск смещения. Масштабированное решение этого уровня является началом поиска для более высокого уровня, а диапазон поиска определяется степенью сжатия между соседними уровнями.

$$g_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) g_{l-1}(2i + m, 2j + n)$$

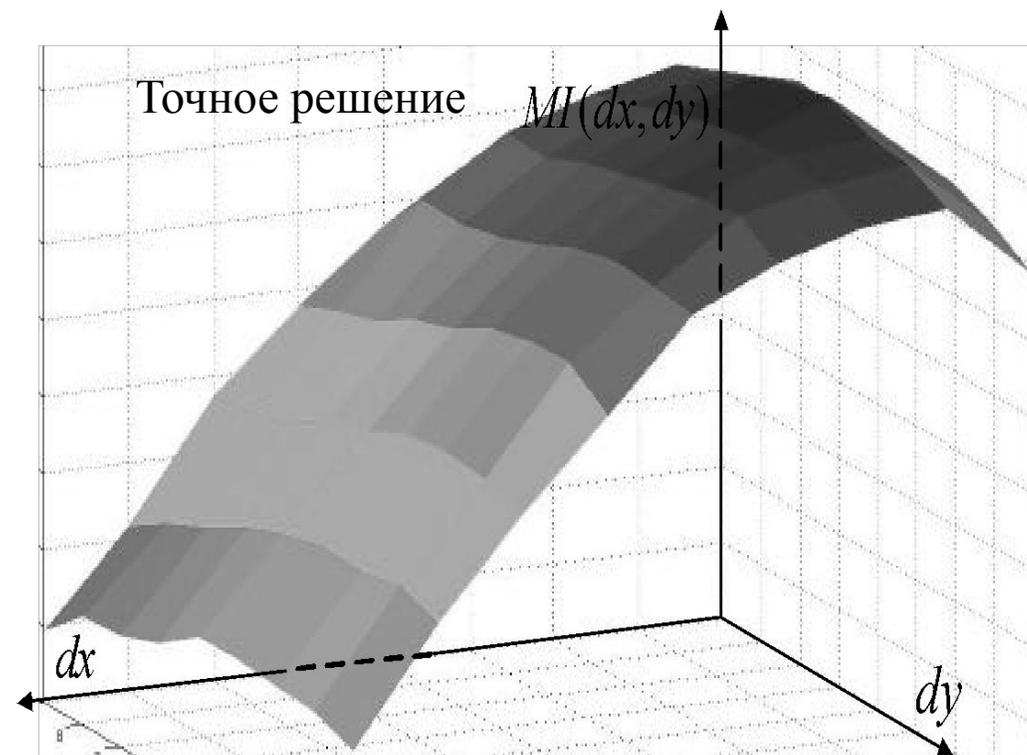
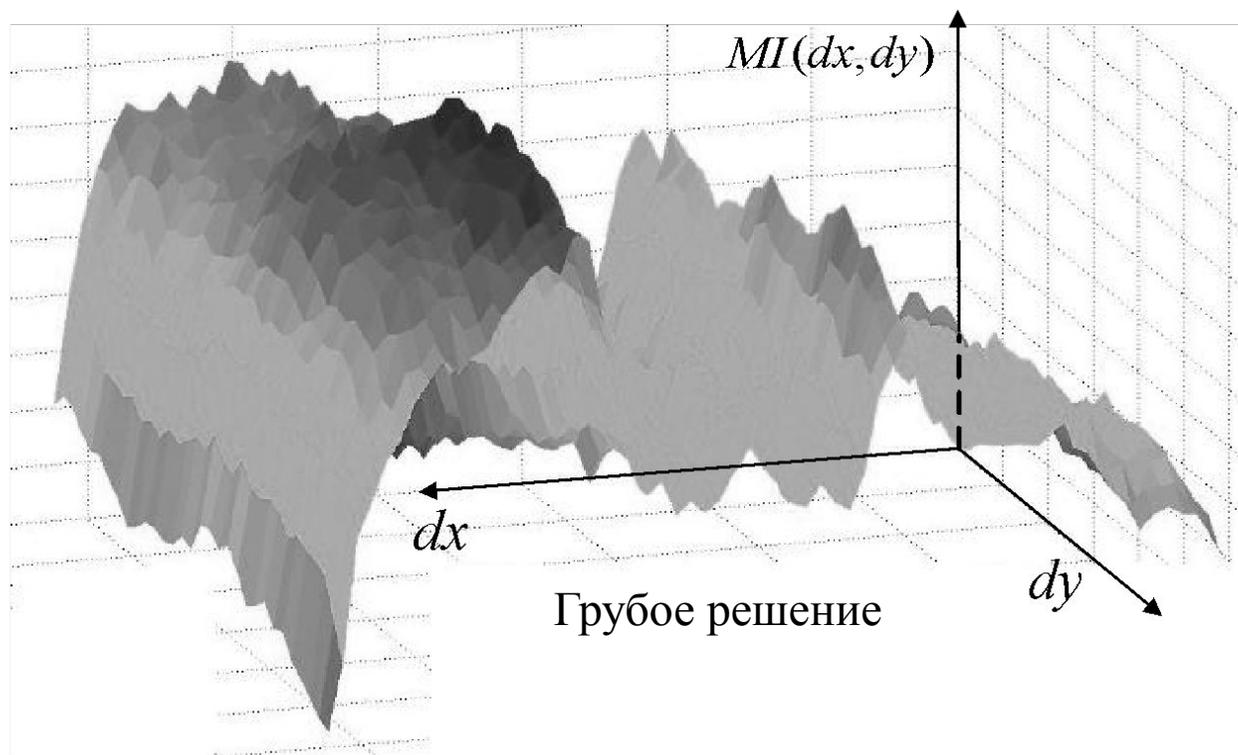
где  $g_l(i, j)$ ,  $g_{l-1}(i, j)$  - соседние уровни пирамиды,  $w(m, n)$  - гауссовский низкочастотный фильтр.

# Последовательное сжатие



Функция ВИ для опытных изображений

Результат последовательного вычисления функции ВИ сначала на масштабированных изображениях до 2-го уровня (Грубое решение), потом уточненных на 0-м уровне (Точное решение). С крупным шагом функция сходится к максимуму. Уточнение по исходным изображениям в окрестности 8x8 позволяет получить точное решение.



# Стратегия поиска. Имитация отжига

С целью уменьшения объема вычислений, в работе предлагается использовать так называемый алгоритм имитации отжига.

Данный метод определения минимума функции (вариант ВИ)

$$I(A, B) = H(A, B) - H(A) - H(B)$$

включает использование 3-х дополнительных функций: функции генерации, функции одобрения и программы отжига.

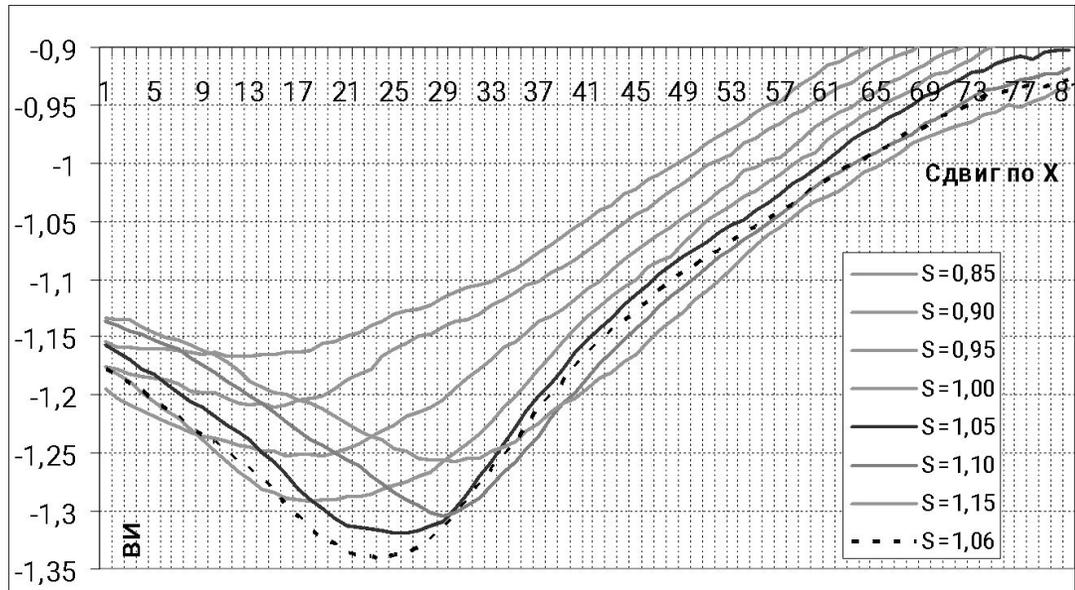
Рассмотрим функцию одной переменной  $f(x)$ , которую необходимо минимизировать.

Пусть значение  $x_c$  является точкой текущего минимума. Следующий шаг имитации отжига – найти новый (тестовый) возможный минимум  $x_n$ .

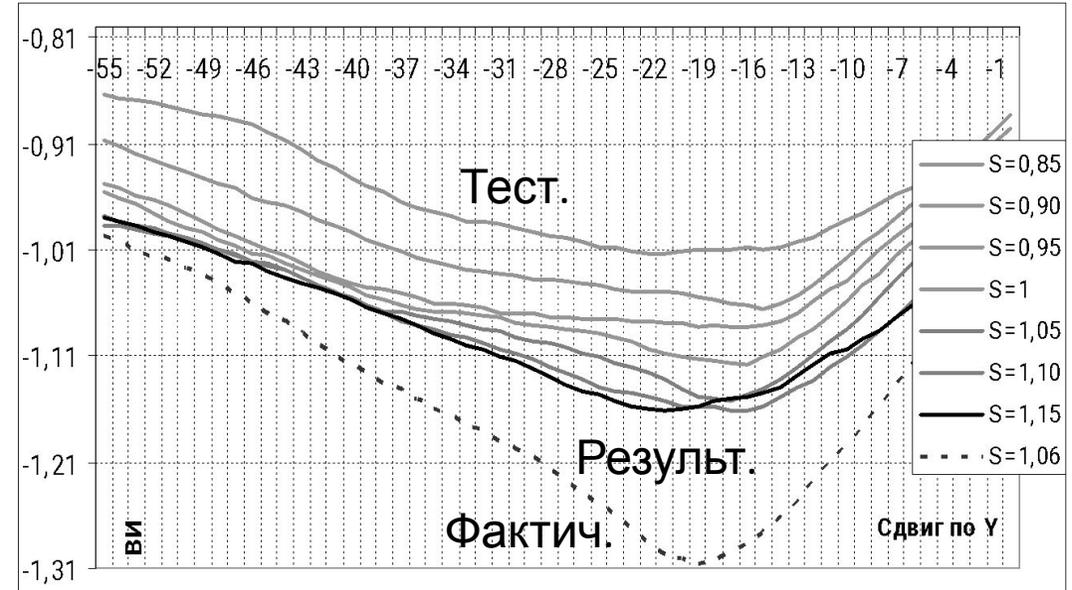
Это новое значение вычисляется при помощи функции генерации, которая позволяет выполнить прыжок на случайную величину (например, по функции Гаусса или Коши) от текущего к тестовому значению. Функции генерации обычно представляют собой колоколообразную плотность вероятности, поскольку вероятность малых прыжков должна быть больше чем для больших прыжков. С продолжением процесса функция постепенно сужается в соответствии с программой отжига. Это называется «понижением температуры» имитации отжига.

Если  $f(x_n) < f(x_c)$ , то тестовое значение становится текущим  $x_c = x_n$ .

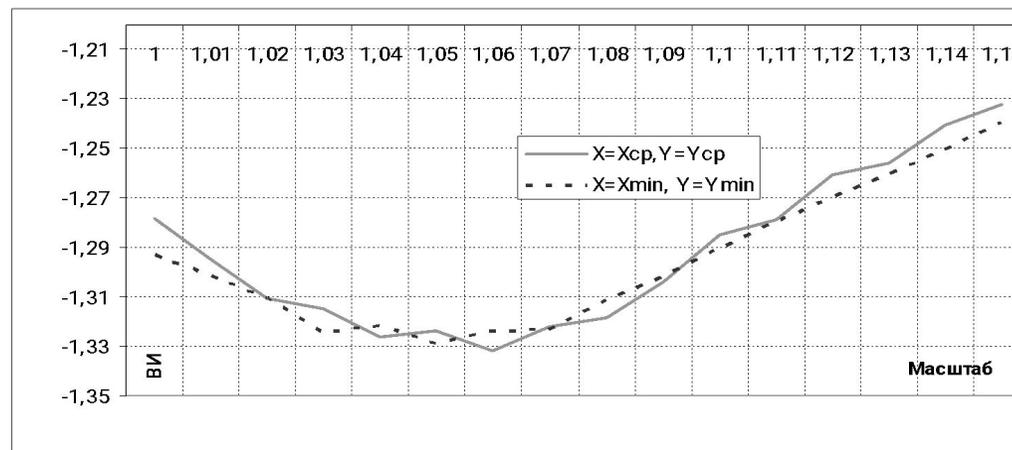
# Поиск минимумов методом отжига



по X



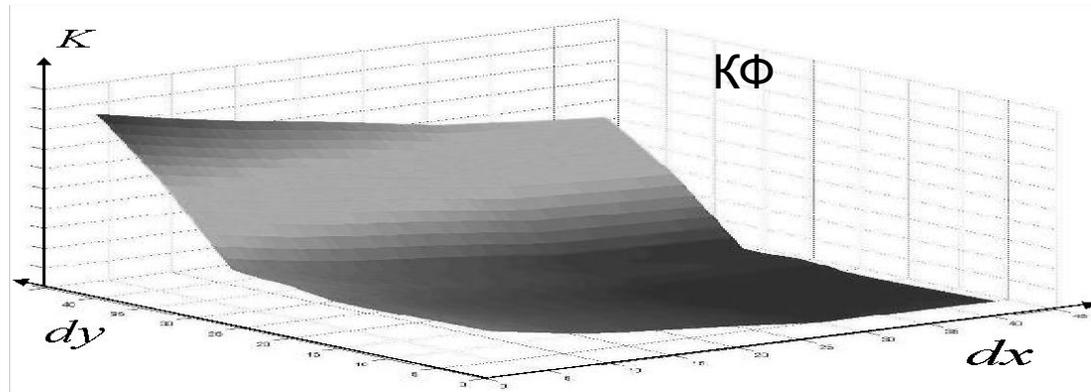
по Y



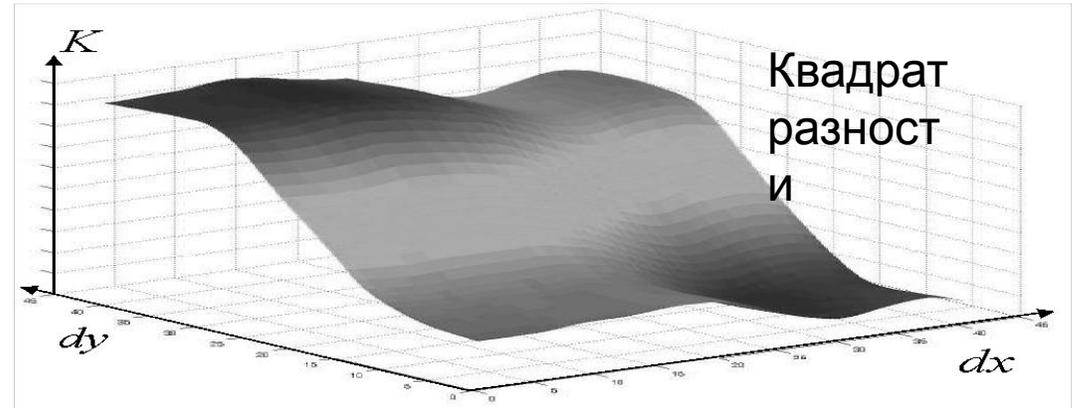
по  
масштабу

# Сравнение критериев согласования

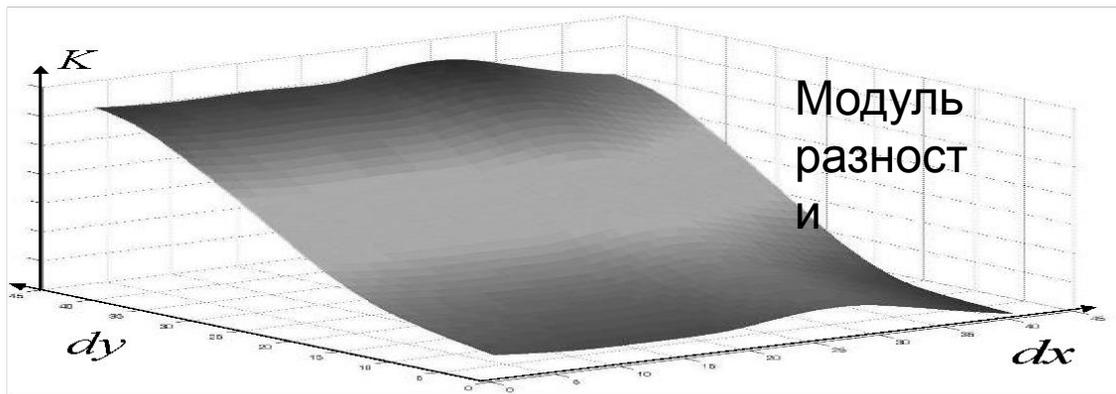
Для оценки эффективности предлагаемых решений было проведено сравнение критериев, оценивающих качество привязки изображений (паре разноспектральных изображений). Ошибка определялась как отношение разницы невязки между полученной оценкой и истинным параметром к радиусу корреляции ТВ изображения.



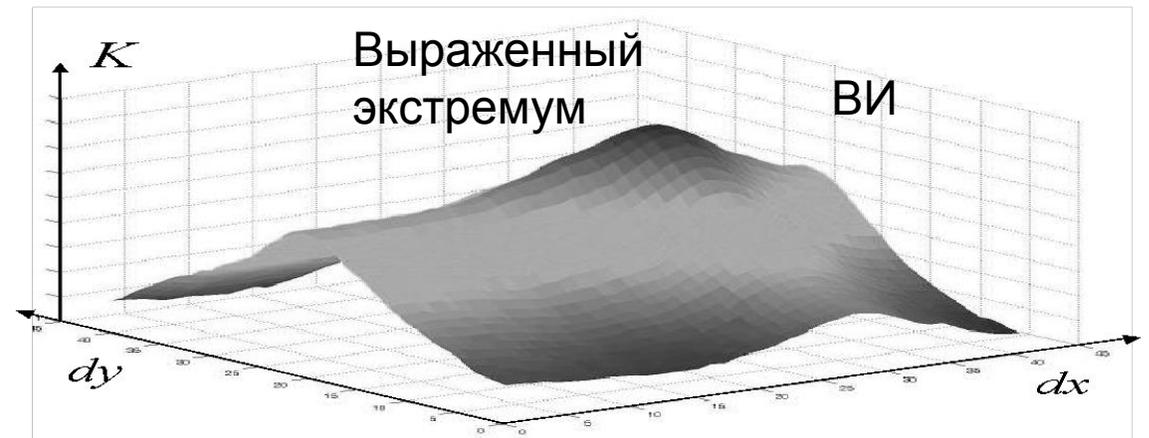
а)



а)



б)

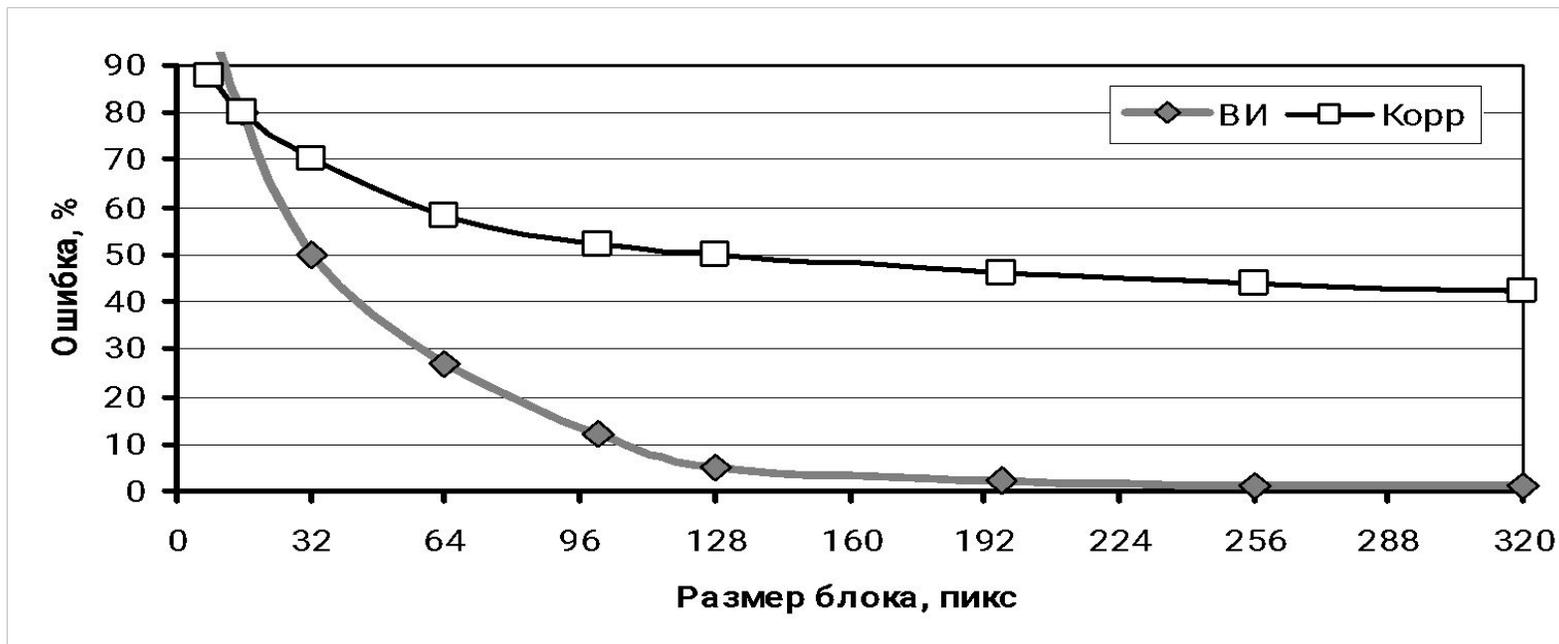


б)

# Влияние размера блока на точность оценки

Корреляционная функция имеет недопустимую точность при любом размере блока.

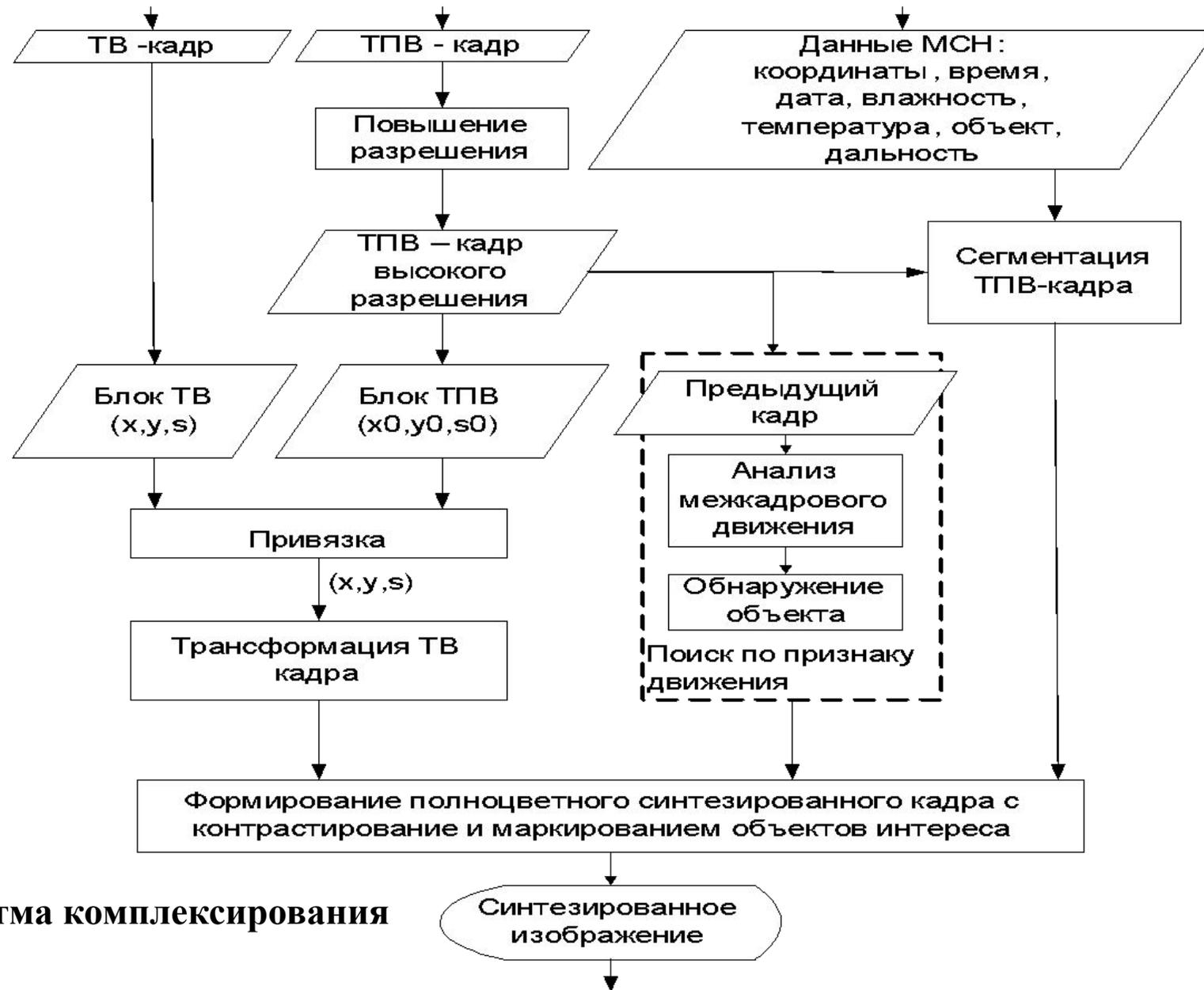
Функция ВИ обеспечивает приемлемую точность на уровне 5% при размере блока от 128 пикселей и обеспечивает точность на уровне 1%, начиная с размера 256 пикселей.



# СИНТЕЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗНЫХ ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

Данный этап комплексирования изображений следует после привязки исходных ТВ и ТПВ кадров. Как показал анализ литературы, существующие методы синтеза, обеспечивающие формирование яркостной составляющей выходного изображения, не учитывают целевой задачи наблюдения. Эти методы, в основном, построены на формальной свертке двух изображений. При этом не рассматривается возможность сохранения полноцветности результирующего кадра при исходном цветном ТВ изображении и полутонном ТПВ. Если объектами интереса являются живая сила и техника, то в ряде случаев, например, в условиях маскировки, задымленности, тумана данные объекты в видимом спектре имеют низкую контрастность. В то же время на ТПВ изображении эти объекты имеют наибольшую яркость. Предлагаемая методика синтеза построена на выделении (контрастированием и/или маркированием) предполагаемых объектов интереса. В качестве критерия поиска объектов были выбраны два признака:

- Яркостной признак обусловлен тем, что живая сила и техника имеют тепловое излучение выше излучения фона и контрастны на ТПВ изображении.
- Признак движения позволяет уменьшить ошибку распознавания в условиях наблюдения, когда тепловое излучение фона близко к излучению объекта: нагревание поверхностей на солнце, маскировка объекта и охлаждение при неблагоприятных погодных условиях, элементы инфраструктуры.



**Блок-схема алгоритма комплексирования**

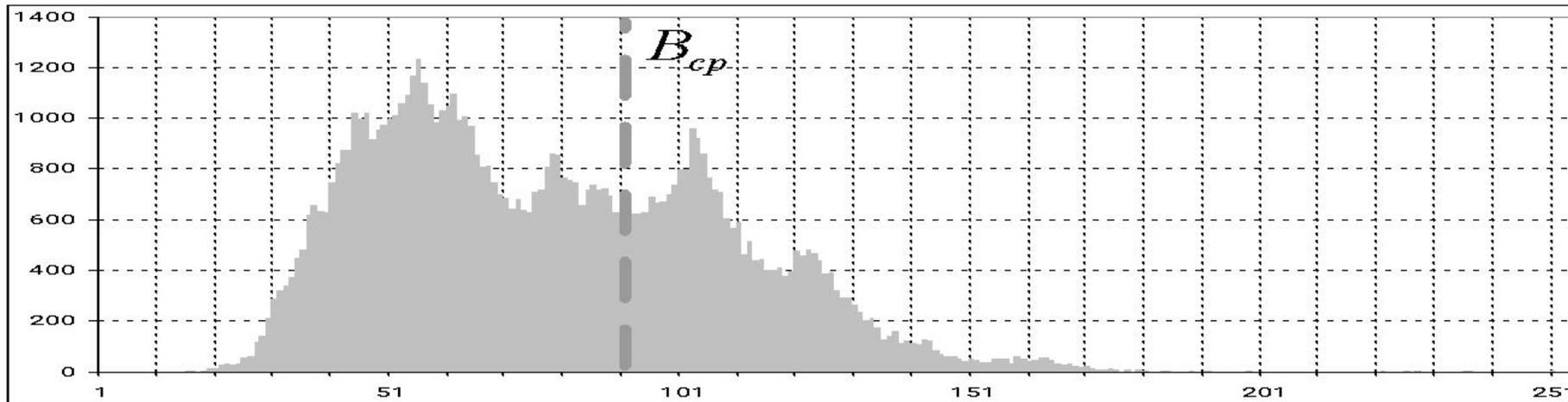
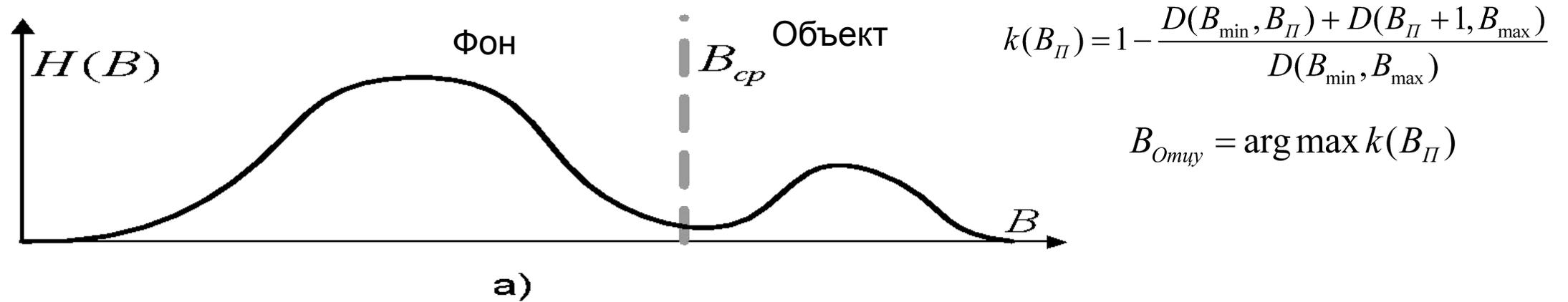
# Обнаружения объектов по яркости

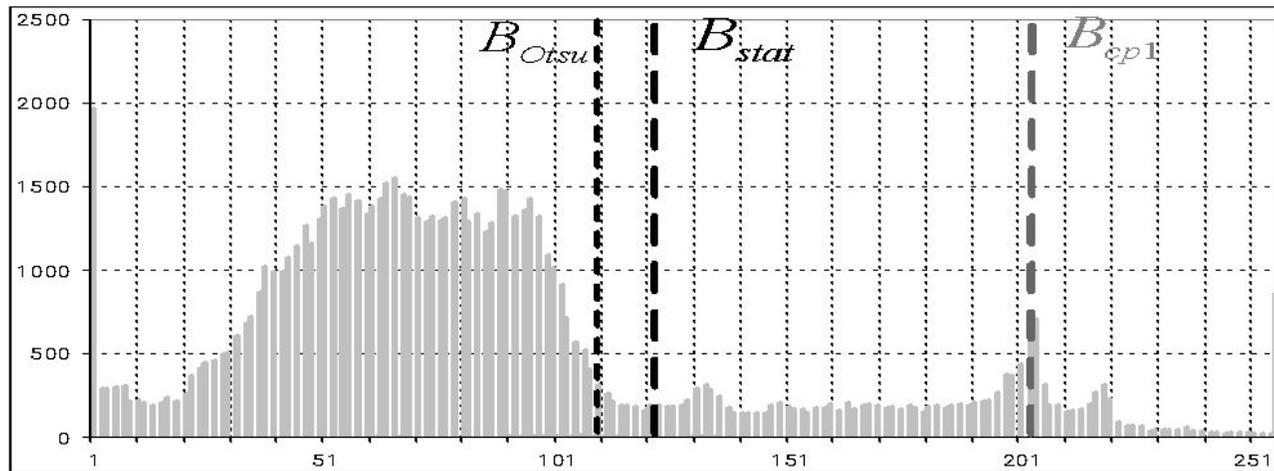
Исследованы 3 подхода к обнаружению объектов:

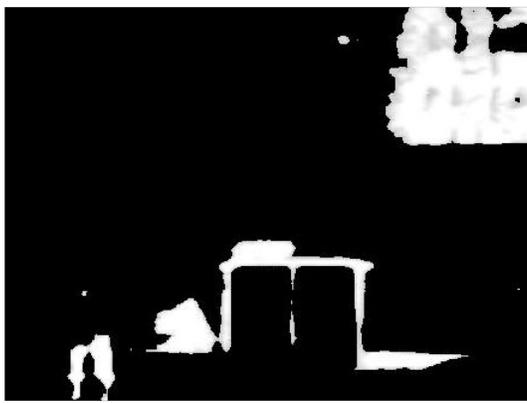
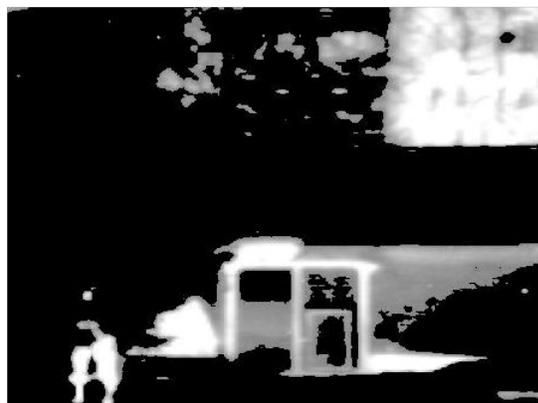
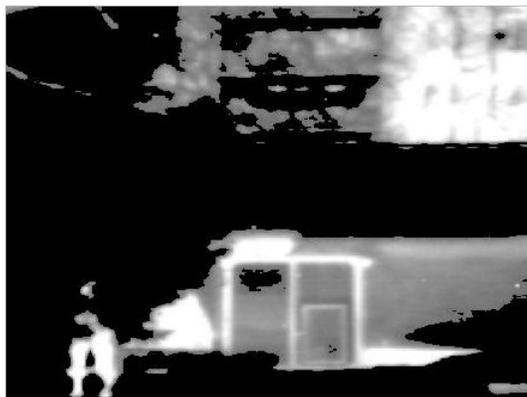
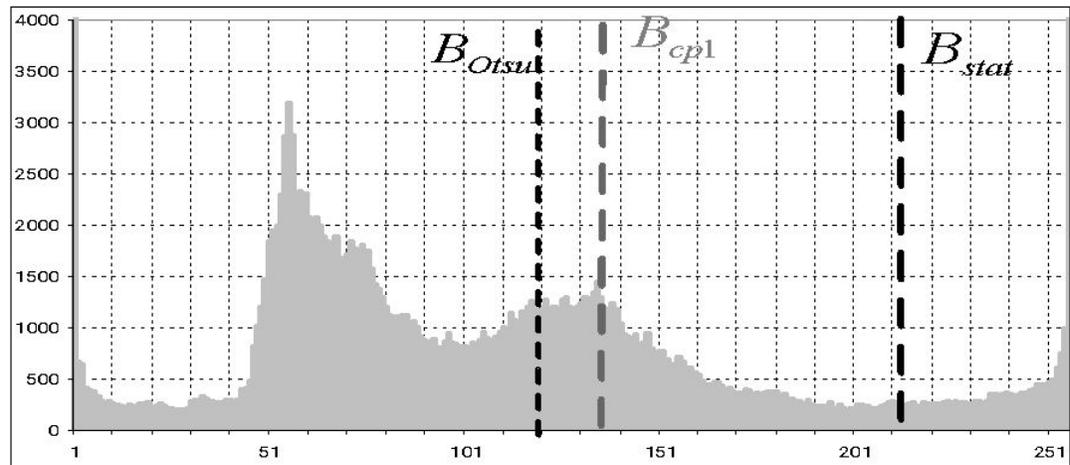
1. Метод, основанный на сегментации Отцу;
2. Модифицированный метод Отцу, учитывающий особенности гистограмм ТПВ изображений;
3. Статистический алгоритм обнаружения по критерию максимального правдоподобия Фишера.

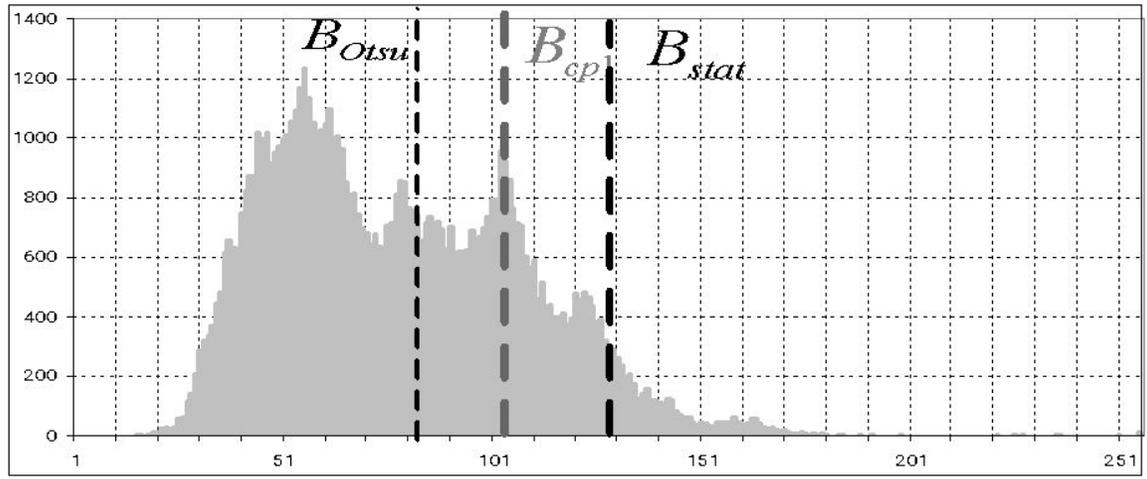
Каждый алгоритм позволяет определить некоторый порог по яркости. Если яркость какого-либо пикселя на текущем изображении превышает найденный порог, то принимается решение об обнаружении искомого объекта. При поиске целевых объектов на ТПВ изображении по яркости, целесообразно перейти к анализу гистограммы. Живая сила и работающая техника имеют высокое тепловое излучение, предполагается, что данные объекты будут иметь наибольшую яркость на ТПВ кадре и необходимо определить порог, ниже которого пиксели принадлежат фону.

# Сегментация по яркости (ТПВ)









# Поиск объектов по признакам движения

В работе реализовано выделение двигающихся объектов интереса. Для данной цели предложен метод определения межкадрового движения на основе алгоритма оптического потока (при реализации на персональном компьютере) или блочного алгоритма SAD (при реализации на цифровом сигнальном процессоре). Использование указанных методов позволяет построить поле векторов с заданным шагом для каждого кадра ТПВ изображения и выделить области, которым характерно движение, отличное от глобального движения кадра.

Вычисление пирамиды изображений :  $\{I^L\}_{L=0,\dots,L_m}$   $\{J^L\}_{L=0,\dots,L_m}$

Инициализация начального приближения :

$$g^{L_m} = \begin{bmatrix} g_x^{L_m} & g_y^{L_m} \end{bmatrix} = [0 \quad 0]^T$$

$$L = L_m \dots 0$$

Положение точки :

$$x_1^L = \frac{x_1}{2^L}; \quad y_1^L = \frac{y_1}{2^L}$$

Пространственные производные :

$$I_x(x, y) = \frac{I^L(x+1, y) - I^L(x-1, y)}{2}$$

$$I_y(x, y) = \frac{I^L(x, y+1) - I^L(x, y-1)}{2}$$

Градиентная матрица :

$$G = \sum_{x=p_x-\omega_x}^{p_x+\omega_x} \sum_{y=p_y-\omega_y}^{p_y+\omega_y} \begin{bmatrix} I_x^2(x, y) & I_x(x, y)I_y(x, y) \\ I_x(x, y)I_y(x, y) & I_y^2(x, y) \end{bmatrix}$$

Инициализация итеративного алгоритма :  $\bar{v}^0 = [0 \quad 0]^T$

$$k = 1..K$$

Разность изображений :  $\delta I_k(x, y) = I^L(x, y) - J^L(x + g_x^L + v_x^{k-1}, y + g_y^L + v_y^{k-1})$

Вектор невязки :

$$\bar{b}_k = \sum_{x=p_x-\omega_x}^{p_x+\omega_x} \sum_{y=p_y-\omega_y}^{p_y+\omega_y} \begin{bmatrix} \delta I_k(x, y) & \delta I_x(x, y) \\ \delta I_k(x, y) & \delta I_y(x, y) \end{bmatrix}$$

Оптический поток :

$$\bar{\eta}^k = G^{-1} \bar{b}_k$$

Приближение для следующей итерации :  $\bar{v}^k = \bar{v}^{k-1} + \bar{\eta}^k$

$$k = k + 1$$

Поток на уровне :  $d^L = \bar{v}^K$  Приближение :  $g^{L-1} = \begin{bmatrix} g_x^{L-1} & g_y^{L-1} \end{bmatrix}^T = 2(g^L + d^L)$

$$L = L - 1$$

Финальный вектор потока :

$$d = g^0 + d^0$$

Положение точки на J:

$$x_2 = x_1 + d_x; \quad y_2 = y_1 + d_y$$

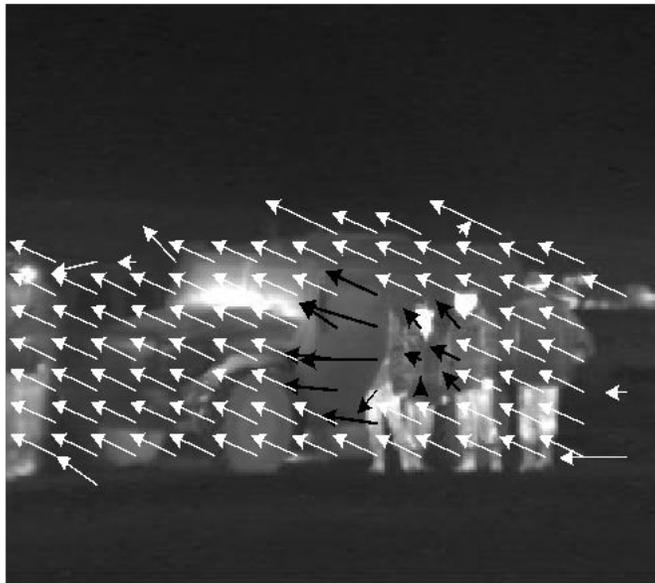
## Алгоритм выделения оптического потока на основе метода Лукаса - Канаде



a)



б)

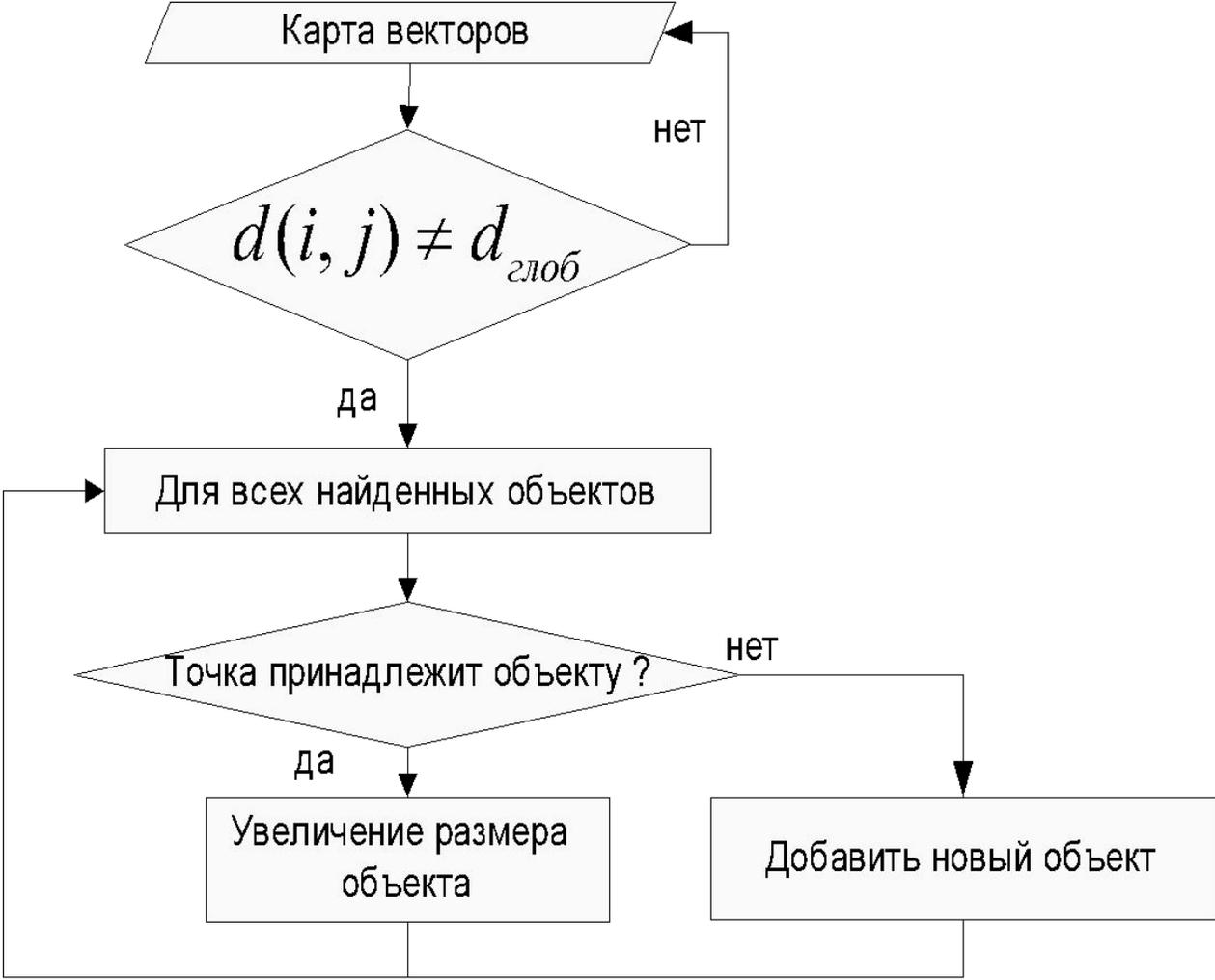


в)

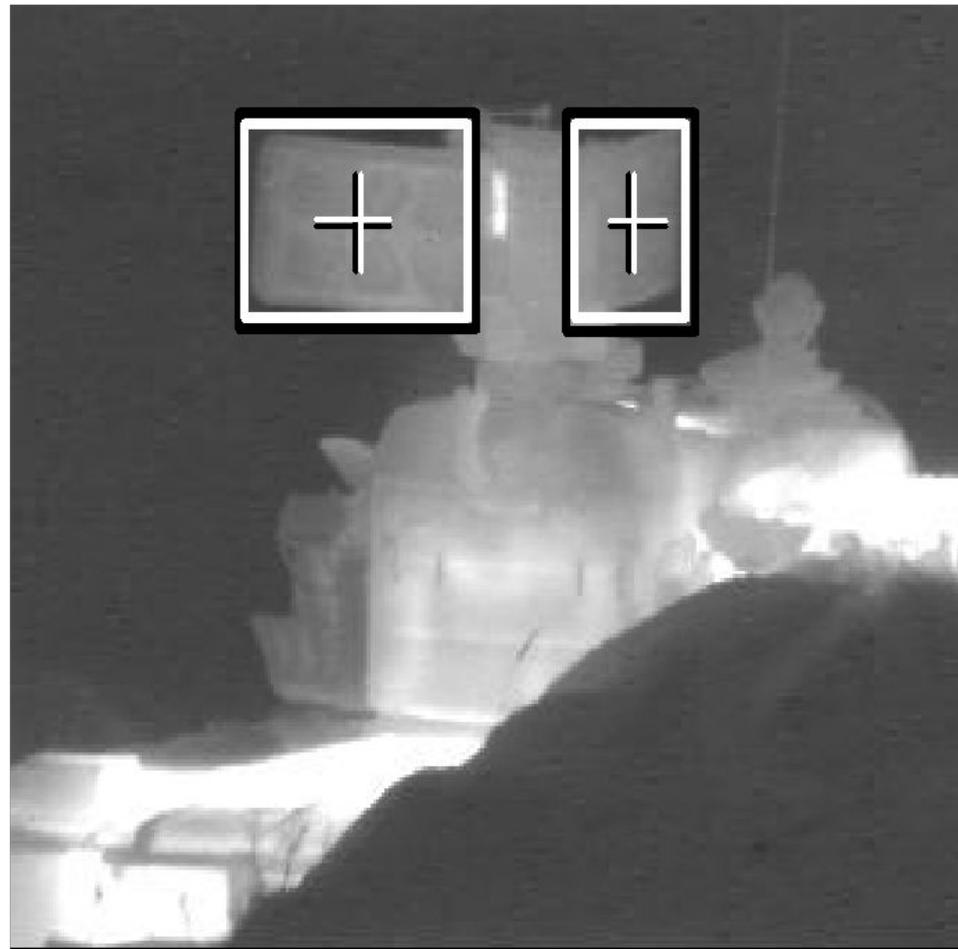


г)

# Алгоритм группировки векторов для выделения объектов

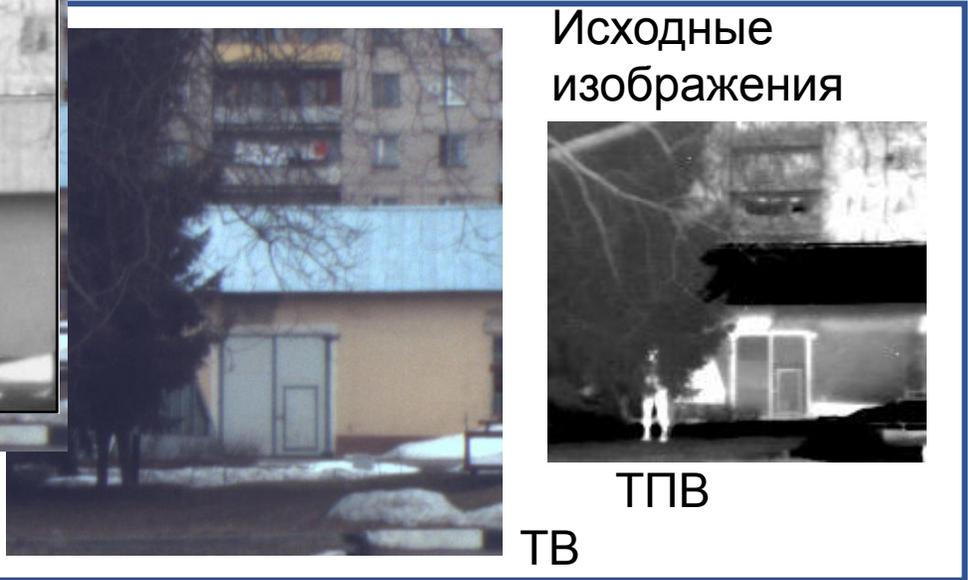


## Выделение объектов



# Синтез изображений и маркировка объектов интереса

Основная концепция предлагаемого алгоритма синтеза заключается в наименьшем искажении исходного телевизионного (ТВ) изображения при добавлении на синтезируемый кадр целевой информации, полученной в другом спектре и ее контрастировании. Дополнительно используется маркированиедвигающихся объектов, поскольку данные объекты могут представлять особую важность для оператора. Поскольку исходное ТВ изображение является цветным, предлагается синтез производить по красной R-компоненте цвета (RGB-модель). Целевая информация, полученная в инфракрасном спектре – это результат обнаружения на ТПВ изображении объектов интереса по яркостному признаку и по признаку движения.



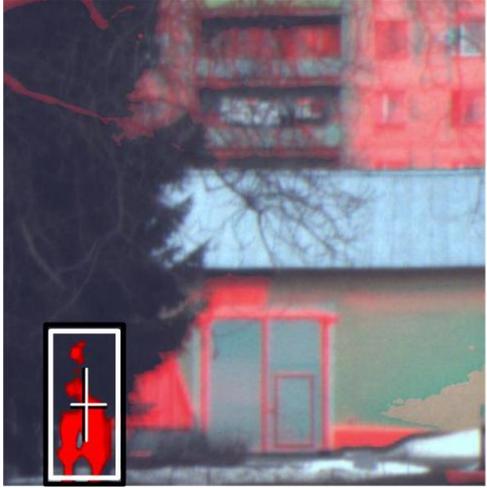
Синтез по Лапласиану



Синтез с приоритетом ТВ

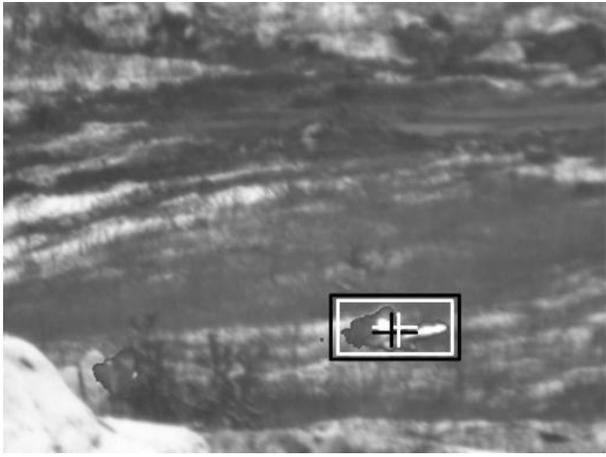
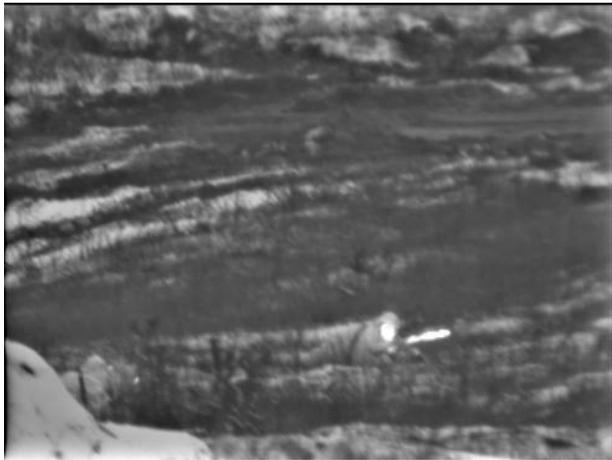
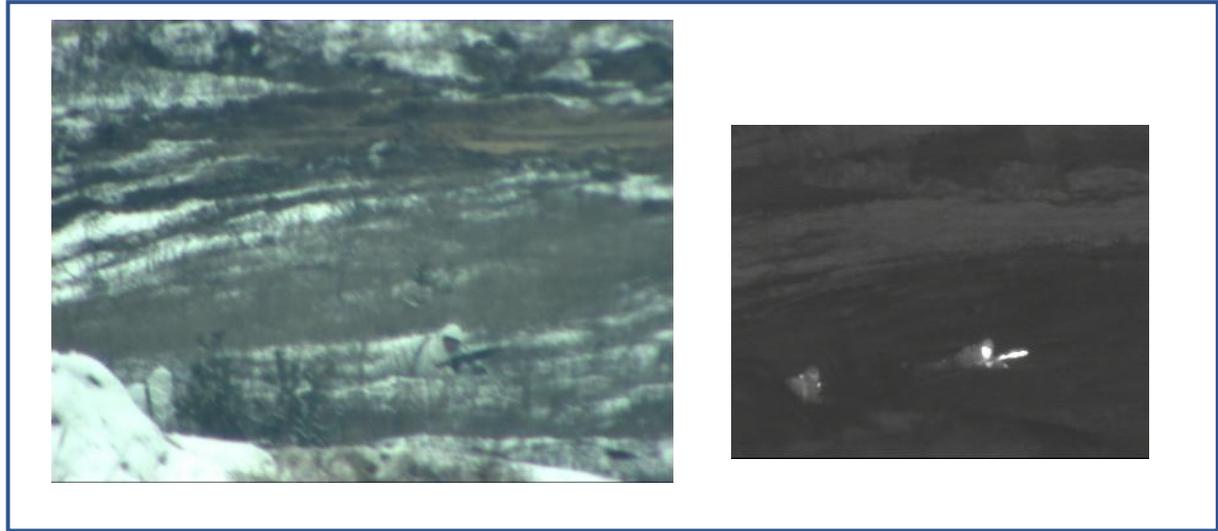


Локальный синтез



Полноцветный локальный синтез





# Многоканальная система наблюдения

На рисунке представлен образец модифицируемой МСН: многоканальный оптико-электронный комплекс наблюдения производства «ТПК «Линкос» (Россия).

СНС-приемник, компас

Тепловизионный канал (ТПВ)

Телевизионный канал (ТВ)



Лазерный дальномер (ЛД)

### **Комплекс предназначен для решения следующих задач:**

- поиск, обнаружение, распознавание и определение координат объектов противника;
- автоматическое обнаружение и автоматическое сопровождение движущегося объекта в пределах полей зрения оптико-электронных каналов с выдачей сигнала оповещения оператору;
- начальное ориентирование;
- решение топогеодезических задач, задач обработки полученных разведывательных данных;
- оперативная передача служебной информации и видеоизображений в бортовой компьютер носителя.

### **Требования по дальностям действия оптико-электронных каналов в узком поле зрения:**

- дальность распознавания открыто расположенной цели типа "ростовая фигура солдата" с помощью ТПВ канала ночью и ТВ канала в нормированных условиях с вероятностью не менее 0,8 – не менее 2500 м;
- дальность распознавания открыто расположенной неподвижной цели типа "танк" с помощью ТПВ канала ночью в нормированных условиях с вероятностью не менее 0,8 – не менее 5000 м;

ТПВ канал предназначен для приема изображения местности в инфракрасном диапазоне спектра и преобразования его в электрический сигнал с целью его дальнейшей обработки, отображения на экранах микродисплеев, передачи по радио каналу и сохранения на накопителях. Спектральный диапазон работы канала 3,7 ... 4,8 мкм.

Тепловизионная камера представляет собой охлаждаемый детектор с микрокриогенной системой охлаждения. Формат изображения 320x240 пикселей при кадровой частоте 30 кадров в секунду. ТПВ объектив имеет следующие характеристики:

- фокусное расстояние: 30...600 мм;
- относительное отверстие: 1:4;
- угловое поле в пространстве предметов:  $18,2^\circ \times 13,7^\circ \dots 0,9^\circ \times 0,7^\circ$ ;
- видимое увеличение ТПО совместно с лупами (окулярами):  $1,5^x \dots 30^x$ .

ТВ канал предназначен для приема изображения местности в видимом диапазоне спектра и преобразования его в электрический сигнал с целью его дальнейшей обработки, отображения на экранах микродисплеев, передачи по радио каналу и сохранения на накопителях. Рабочая область спектра 0,38...0,76 мкм.

Основными элементами ТВ канала являются телевизионный объектив и телевизионная камера.

Телевизионный объектив является вариофокальным объективом, в котором управляют размером диафрагмы, величиной фокусного расстояния, фокукусировкой, и имеет следующие характеристики:

- фокусное расстояние объектива 12...240 мм;
- относительное отверстие объектива 1:1,6...1:720;
- угловое поле зрения в пространстве предметов  $22,6^\circ \times 17,1^\circ \dots 1,1^\circ \times 0,86^\circ$ ;
- видимое увеличение совместно с лупами (окулярами)  $1,2^x \dots 24^x$ .

Телевизионная камера работает при освещенностях до 2 лк, имеет возможности регулировки величины экспозиции и усиления видео сигнала. Формат изображения, получаемого с ТВК составляет 1024x768 пикселей при кадровой частоте 30 кадров в секунду.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решена актуальная научно-техническая задача комплексирования изображений разных диапазонов спектра в многоканальных системах наблюдения. В качестве модернизируемой системы рассматривался серийный комплекс, в состав которого входит тепловизионная (ТПВ) и телевизионная (ТВ) камеры. В рамках решаемой задачи комплексирования исследованы два последовательных этапа: привязка и синтез изображений.
2. Предложена новая методика привязки изображений разных диапазонов спектра, основанная на критерии максимума взаимной информации и позволяющая оценить параметры трансформации: смещение и коэффициент масштаба.
3. Разработана методика оценки качества алгоритмов привязки ТВ и ТПВ изображений, основанная на вычислении радиуса корреляции изображений. Методика позволяет получить оценку точности использованного критерия.
3. Предложена и разработана методика локального синтеза, обеспечивающая повышение качества предъявляемых оператору изображений и основанная на выделении (контрастированием и/или маркировкой) предполагаемых объектов интереса;
4. На основе проведенных исследований, разработаны рекомендации по использованию на типовых сценах, наблюдаемых на ТПВ изображениях, алгоритмов обнаружения объектов:
  - на базе метода сегментации Отцу;
  - предложенного модифицированного алгоритма Отцу с адаптивным порогом;
  - статистического алгоритма на основе критерия максимального правдоподобия Фишера
5. Разработан алгоритм обнаружения предполагаемых объектов интереса по признакам движения на ТПВ изображениях;
7. Разработан алгоритм комплексирования ТВ и ТПВ изображений, основанный на привязке изображений с помощью критерия взаимной информации и локальном синтезе;
8. Проведены исследования, основанные на обработке изображений, полученных на модифицируемом оптико-электронном комплексе (МСН) и подтверждающие работоспособность разработанных алгоритмов.

# В России разработали оптико-электронные приборы наблюдения и разведки "Сыч"

Оборудование предназначено для специальных подразделений

Читайте ТАСС в

[Яндекс.Новости](#)[Яндекс.Дзен](#)[Google Новости](#)

МОСКВА, 8 апреля 2021 /ТАСС/. Холдинг "Росэлектроника" (входит в Ростех) разработал не имеющие российских аналогов комбинированные оптико-электронные приборы наблюдения и разведки. Об этом сообщила пресс-служба Ростеха.

Оборудование предназначено для специальных подразделений. Оно позволяет распознавать людей и автомобили на расстоянии нескольких километров, независимо от времени суток и погодных условий.

Оборудование сочетает функции тепловизора, телевизора и лазерного дальномера. Прибор выпускается в двух модификациях: "Сыч-ПР-С" средней дальности и "Сыч-ПР-Д" большой дальности. Обе модификации оснащены цифровым магнитным компасом и имеют спутниковую систему навигации. Проект реализует ЦНИИ "Циклон" (входит в "Росэлектронику").

"Устройства позволяют обнаруживать людей и технику на расстоянии до 3 и 4 км соответственно. Встроенный лазерный дальномер работает на дистанции от 100 м до 5 км. Оборудование успешно прошло заводские испытания, сейчас идет подготовка к приемо-сдаточным испытаниям.

Планируется, что серийное производство изделий начнется до конца года", - заявил генеральный директор ЦНИИ "Циклон" Петр Ковалев.

# Лк. 21, 22. Оценка координат МБЛА с помощью СТЗ

По материалам кандидатской диссертации А.Г. Кузнецова «ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ». Научн. рук. Н.В. Ким.

1. Оценка координат МБЛА по линейным ориентирам.
  - Анализ алгоритмов,
  - Выделение элементов линий,
  - Анализ ветвлений,
  - Объединение элементов,
  - Выделение искомых прямых,
  - Анализ точности (оценка реализуемости).
2. Общий алгоритм оценки координат.
3. Организация помощи оператору МБЛА при посадке.

## Актуальность проекта

Рассматривается возможность оценки координат и ориентации МБЛА с использованием дополнительной информации от бортовой СН.

Оценку координат МБЛА в работе предлагается проводить на основе анализа взаимного расположения наземных ориентиров. В этом случае используются так называемые обзорно-сравнительные методы навигации

Полученная таким образом информация может быть использована для организации автоматической или автоматизированной посадки МБЛА, высокоточного наведения ударных беспилотных летательных аппаратов.

Малая заметность МБЛА для современных средств обнаружения ЛА позволяют использовать МБЛА в комплексе с другими средствами вооружения (танки, истребители, управляемые ракеты и пр.) для решения задач целеуказания и наведения средств поражения на цель, а также в качестве самостоятельного средства поражения.

## Цель работы

Повышение точности автономной оценки ориентации и координат МБЛА за счет использования бортовой СН в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем (СНС);

Разработка вариантов применения метода оценки ориентации и координат МБЛА в задачах автоматизированной посадки и наведения МБЛА.

В результате исследований должны быть определены:

- структура комплексного алгоритма обработки видовой информации;
- структура системы помощи оператору;
- методика организации помощи оператору МБЛА на этапе вынужденной посадки при воздействии опасных факторов особой ситуации;
- методика автономного высокоточного наведения МБЛА, за счет использования разработанных методов оценки ориентации на основе обработки видовой информации.

# Научная новизна

1. Разработана методика оценки координат МБЛА относительно внешних ориентиров, в качестве которых возможно использовать: линейные ориентиры, в т.ч. линии разметки посадочной полосы или автомобильной дороги, три контрастных точечных ориентира (например, сигнальные лампы) или комбинированные ориентиры, состоящие из контрастной линии и контрастного объекта. Предлагаемая методика отличается от известных вариантов использованием дополнительной информации об угловой ориентации МБЛА, получаемой от бортовой ИНС, а также минимальным количеством априорной информации об ориентирах, что позволяет увеличить производительность системы по сравнению с традиционными подходами;
2. Предложена и разработана структура комплексного алгоритма обработки видовой информации (КАОВИ), позволяющая выделять на принимаемом изображении линии разметки посадочной полосы с точностью, обеспечивающей заданные точности оценки координат МБЛА в режиме реального времени;
3. Предложена методика организации помощи оператору МБЛА на этапе посадки в ОС, с учетом текущего и прогнозируемого положений МБЛА. При организации помощи оператору учитывается степень опасности прогнозируемой ситуации;
4. Предложена и разработана структура комплексного алгоритма формирования подсказок оператору, основанная на анализе текущего и прогнозируемого положения МБЛА за счет использования информации от СТЗ;
5. Предложена методика решения задачи высокоточного наведения МБЛА на цель, включающая в грубую оценку координат МБЛА на траектории по изображениям подстилающей поверхности и высокоточную оценку координат МБЛА относительно цели.

# Постановка задачи

Для решения задачи повышения точности автономной оценки координат МБЛА должны быть решены следующие задачи:

1. Определение требований к точностям выполнения целевых задач (в частности, автоматизированной посадки и высокоточного наведения), которым должны отвечать разрабатываемые алгоритмы обработки видовой информации;
2. Анализ возможности использования СТЗ для оценки положения МБЛА;
3. Анализ известных методов обработки видовой информации, используемых для выделения на изображении линейных ориентиров, необходимых для решения задачи оценки ориентации МБЛА;
4. Разработка комплексного алгоритма обработки видовой информации и оценки ориентации МБЛА с учетом выбранных частных алгоритмов.

# Оценка координат МБЛА

Тип гироскопа	Вес [г]	Точность [град/сек]
С воздушной опорой	~250	$5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2}$
Поплавковый	~300	$2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-2}$
Динамически настраиваемый	~ 80	$10^{-2} \div 10^0$
Кольцевой лазерный	~ 1000	$4 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^0$
Волоконно-оптический	~ 550	$2 \cdot 10^{-2} \div 9 \cdot 10^0$
Твердотельный волновой	~ 100	$10^{-2} \div 4 \cdot 10^0$
Вибрационный	~ 50	$1,8 \cdot 10^1$
Неконтактный	-	$4 \cdot 10^{-6} \div 10^{-3}$
Микромеханический	~1	$<10^{-1}$

# Оценка координат МБЛА

Точности используемых в ИНС микромеханических акселерометров не позволяют реализовать систему счисления пути, сопоставимую по точности с точностями, обеспечиваемыми СНС. Это вызвано высокой скоростью накопления ошибки при интегрировании показаний микромеханических акселерометров.

Применяемые в настоящее время на МБЛА СНС (GPS/ГЛОНАСС) обеспечивают точность определения координат с ошибками в горизонтальном канале до 6.3 м и до 13.6 м в вертикальном, что также не соответствует требованиям, предъявляемым к высокоточному оружию.

В связи с этим, в работе рассматривается возможность повышения точности оценки координат МБЛА за счет использования дополнительного оборудования, установленного на борту МБЛА. С точки зрения сохранения массогабаритных характеристик МБЛА предпочтительно использовать штатное бортовое оборудование. В качестве такого оборудования в работе рассматривается система технического зрения (СТЗ). В результате обработки видовой информации должны быть определены следующие навигационные параметры:

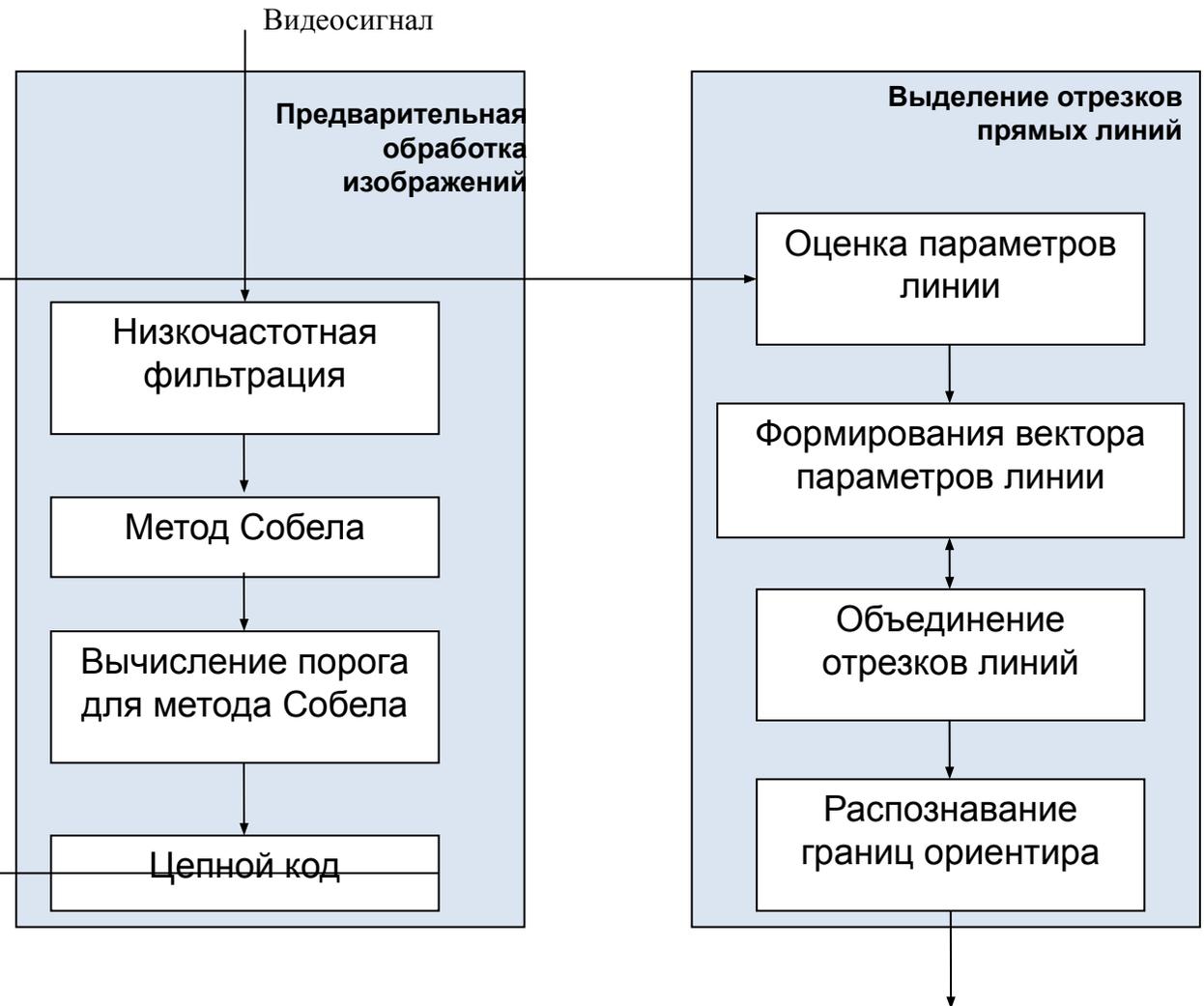
- Высота над посадочной полосой;
- Боковое смещение относительно посадочной полосы;
- Угол курса относительно посадочной полосы.

# Алгоритм обработки изображения посадочной полосы. Выделение линейных ориентиров

Использование методов обработки и анализа видовой информации позволяют выделить на изображениях границы ориентиров (посадочной полосы).

Функционально используемые алгоритмы обработки изображений можно разделить на две группы:

- Алгоритмы предварительной обработки изображений;
- Алгоритмы выделения границ ориентиров.



# Сравнение алгоритмов выделения контуров

	Исходное изображение	Алг. Собела, $V=0.15$	Алг. Канны, $V = 0.2$
$\beta=2$			
$\beta=3$			

# Сравнение алгоритмов выделения контуров

В работе исследовались следующие алгоритмы выделения краев:

- Дифференциальный метод;
- Метод Робертса;
- Метод Собела;
- Метод Канни.

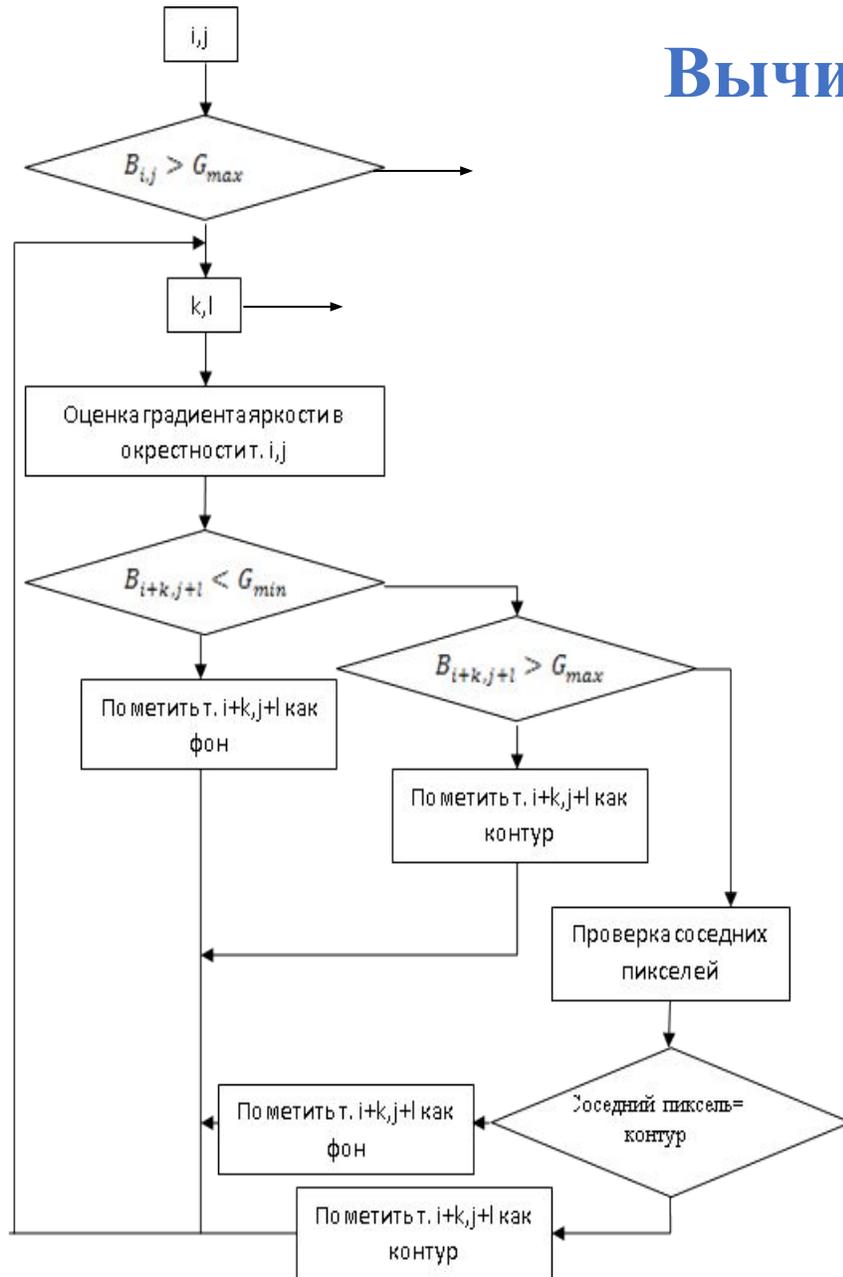
При отсутствии ограничений на время вычислений целесообразно использование алгоритма «Canny», в то же время необходимо учитывать, что алгоритм «Sobel» является более эффективным с точки зрения вычислительной экономичности.

**Метод Собела** выделения контуров или контурный детектор Собела– дифференциальный фильтр с нечетным числом коэффициентов. Для вычисления контуров фильтр использует 2 матрицы 3x3.

# Вычисление порога для метода Собела

Вычисление порога – задача до сих пор не имеющая однозначного решения.

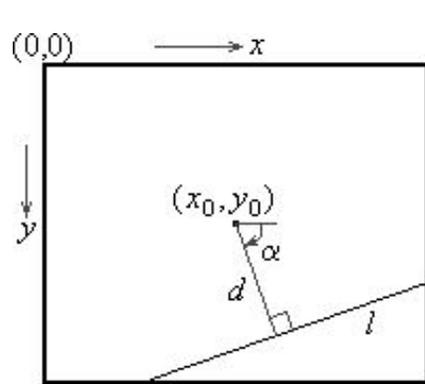
Один из подходов к его определению заключается в применении т.н. метода гистерезиса. Суть метода заключается в выборе такого диапазона яркостей, когда при яркости пикселя выше верхней границы диапазона его гарантированно можно отнести к контуру, а при яркости меньше нижней границы – к фону. Особого внимания заслуживает случай, когда яркость пикселя попадает внутрь интервала. В этом случае проверяется принадлежность контуру соседних пикселей в направлении, перпендикулярном градиенту яркости. Если текущая точка (пиксель) удовлетворяет направлению края (совпадает с направлением края), тогда она также отмечается как край.



# Анализ алгоритмов выделения линий

Для выделение линий на изображении рассматриваются варианты использования алгоритма, основанного на преобразовании Хаффа и метод цепного кода.

В преобразовании Хафа используется уравнение прямой вида:  $\sin \alpha(x - x_0) + \cos \alpha(y - y_0) = d$  где  $d$  – расстояние до линии от центра системы координат,  $\alpha$  – угол наклона вектора дальности до линии по отношению к оси  $x$  системы координат.



Сложность использования метода Хаффа в рассматриваемой прикладной задаче (выделения отрезков прямых в бортовом вычислителе) заключается в необходимости использования больших вычислительных мощностей, чтобы построить для каждой точки пространства данных прямую в модельном пространстве.

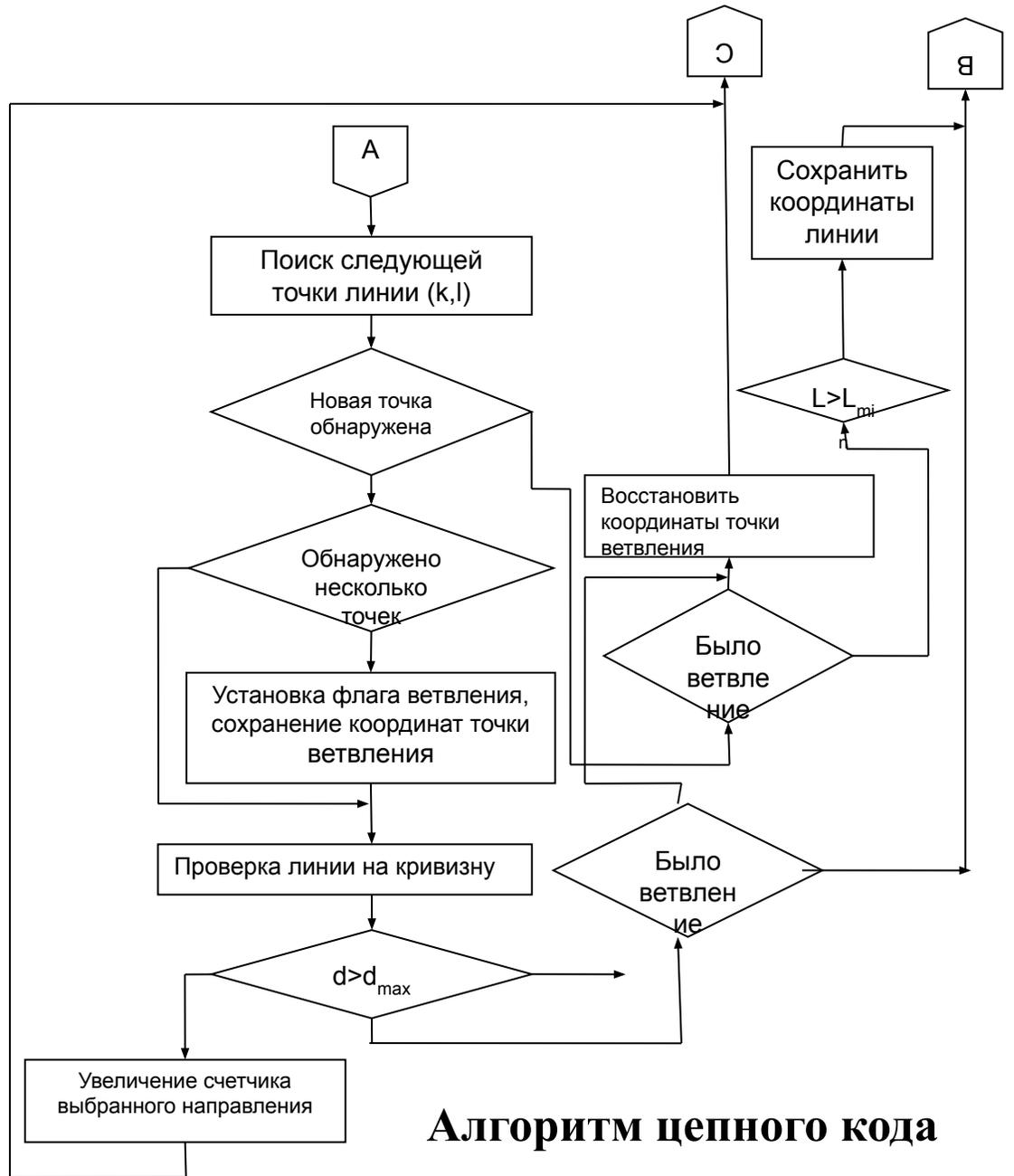
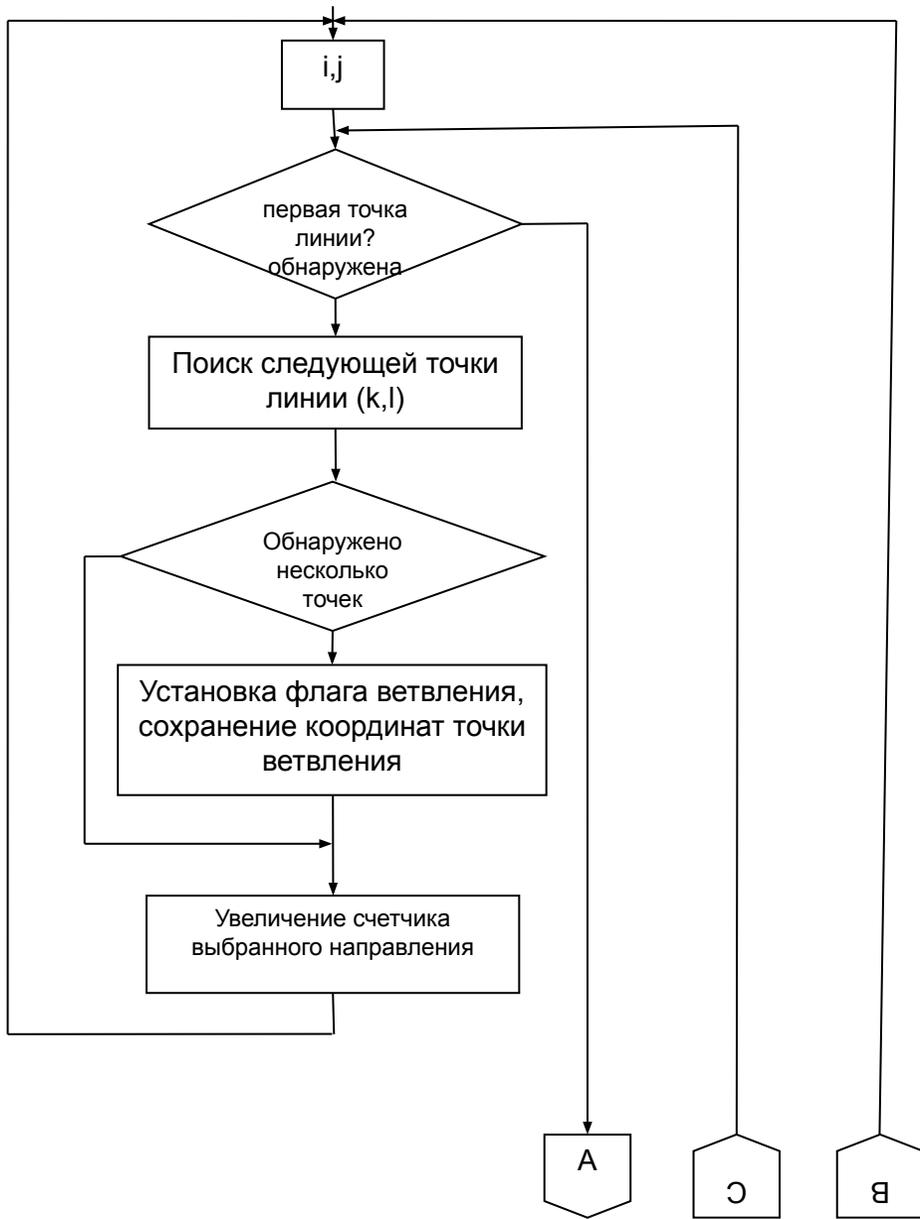
## Цепной код

Алгоритм цепного кода возвращает коэффициенты уравнения прямой линии, рассчитываемые по координатам первой и последней точек линии. В результате снижается ошибка оценки параметров  $a_0$  и  $a_1$  по сравнению с методом Хаффа.

В алгоритме используется рекурсивный вызов метода следования по линии. При каждом вызове метода следования по линии оценивается величина искривления линии, т.е. расстояние от точек линии до прямой, соединяющей ее начало и конец. Выбор новой точки линии происходит по критерию наиболее часто встречающегося направления. Возможны 8 направлений: север, юг, запад, восток, северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток.

4	3	2
5	x	1
6	7	8

При ветвлении координаты точки сохраняются, а в качестве направления для дальнейшего шага выбирается направление с максимальной частотой повторения. Когда движение по последнему направлению заканчивается (найдена конечная точка или превышена величина допустимого искривления линии), происходит возобновление движения из точки ветвления, т.е. проверяется другая ветвь. Так повторяется до тех пор, пока все возможные ветви, исходящие из точки ветвления не будут обследованы.



**Алгоритм цепного кода**

# Объединение отрезков линий

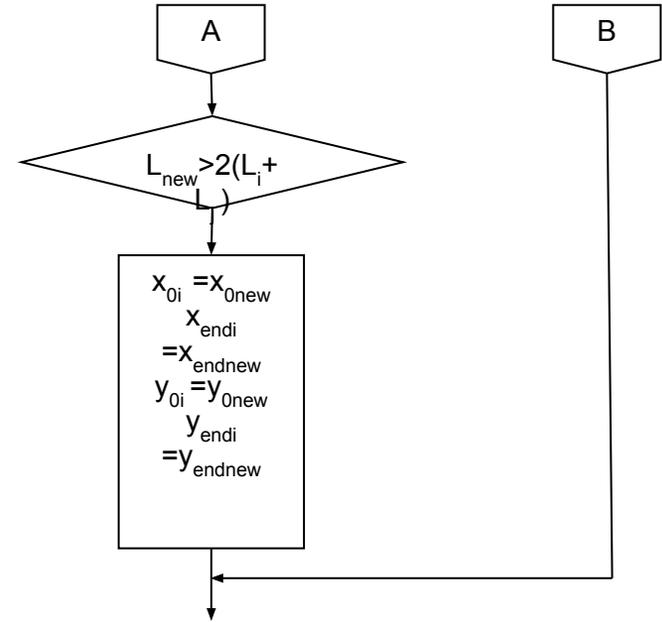
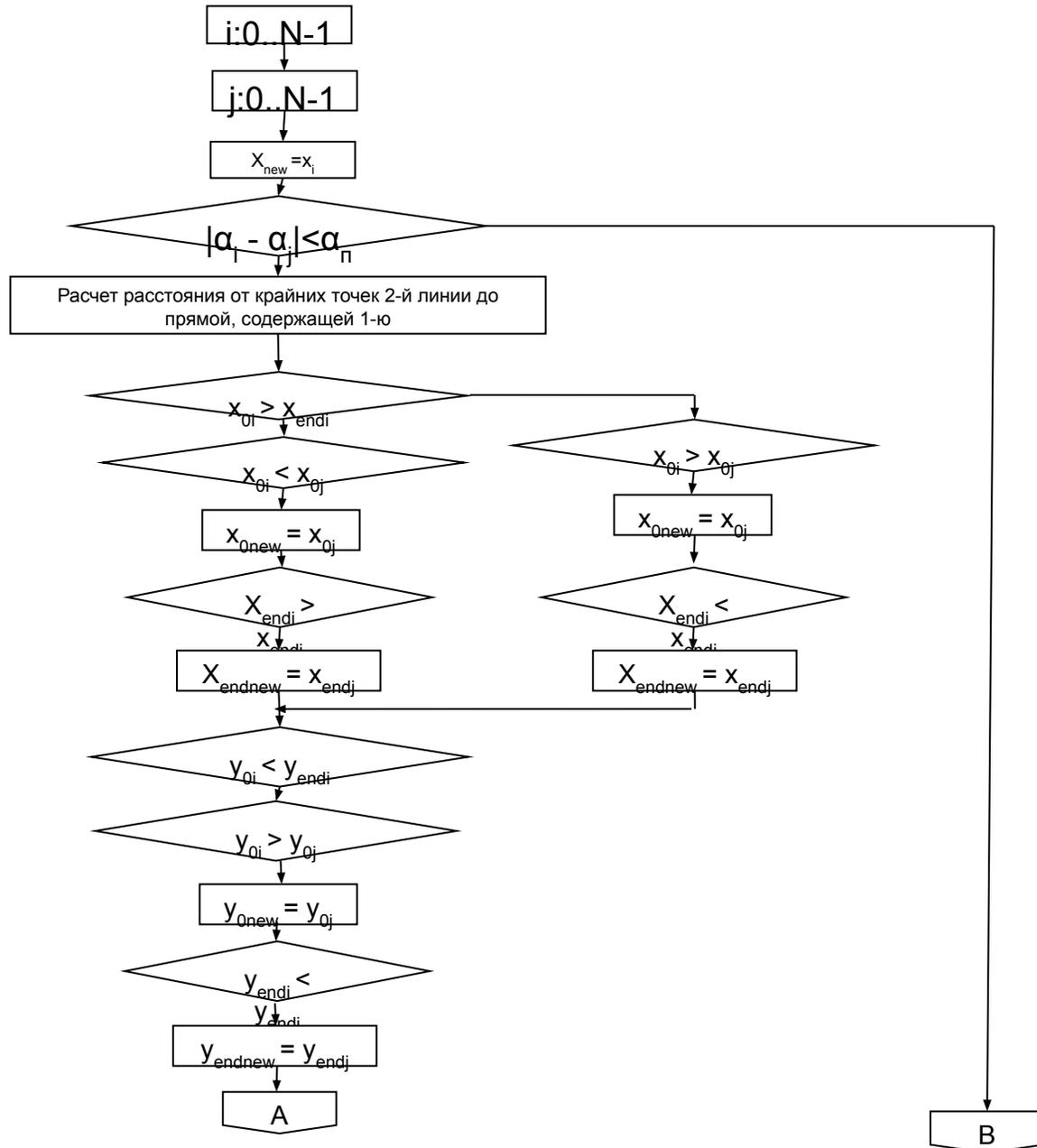
Полученные на предыдущем этапе отрезки линий для дальнейшей работы с ними объединяются между собой в более длинные.

На текущем этапе требуется по последним отрезкам линий восстановить реальные линейные границы ориентиров.

Выполнение указанного алгоритмического блока начинается после сравнения углов наклона двух отрезков, подлежащих объединению. Если угол между отрезками меньше максимально-допустимого значения, то принимается решение о том, что такие отрезки можно объединять. На этом шаге происходит только принятие решения о возможности объединения линий. Сама процедура объединения и дополнительный анализ линий происходят на следующем этапе.

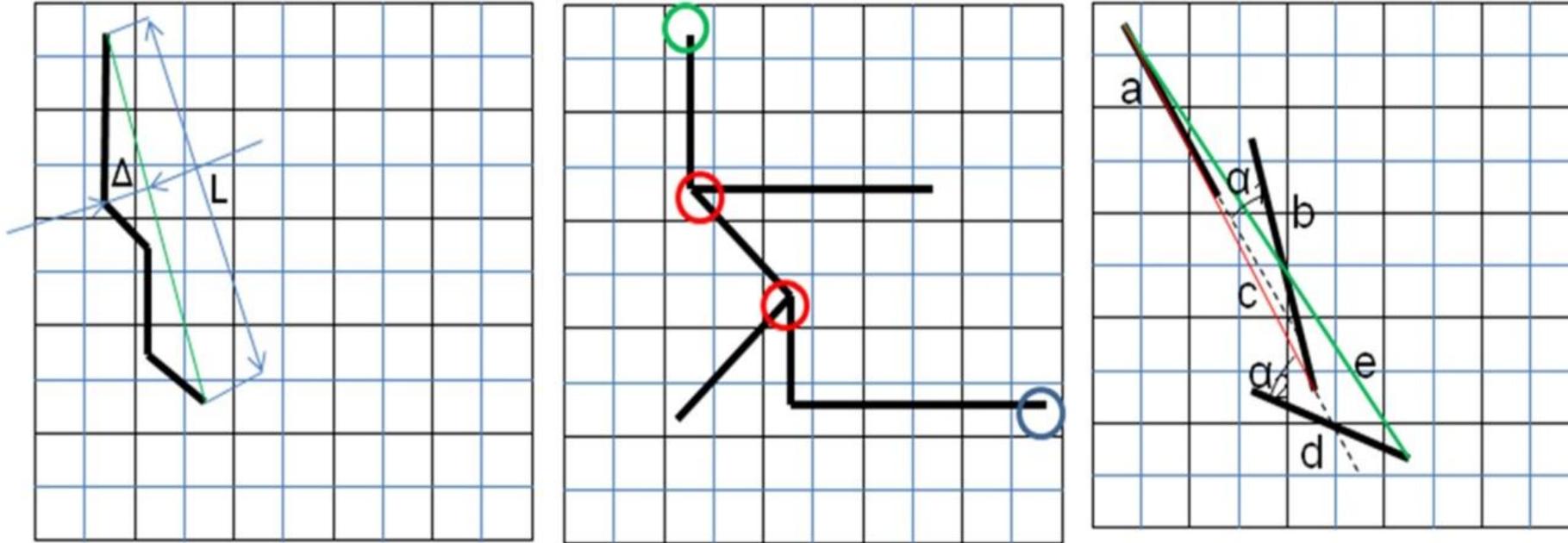
Во избежание объединения параллельных линий вычисляются расстояния от начальной и конечной точек 2-й линии до прямой, проходящей через 1-ю. Если хотя бы одно из расстояний больше допустимого, то линии не объединяются. Объединение линий происходит таким образом, чтобы результирующая линия была максимально длинной. Т.е. в качестве начала и конца новой линии берутся те координаты начала и/или конца каждой из исходных линий, чтобы обеспечить выполнение этого условия.

Кроме этого, чтобы избежать объединения разных линий, но лежащих на одной прямой, проверяется длина конечной линии. Она не должна превышать задаваемого порогового значения.



**Объединение линий.**  $i, j$  – порядковые номера сравниваемых линий;  $x_0, y_0, x_{end}, y_{end}$  – соответственно координаты начала и конца сравниваемых линий;  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы наклона сравниваемых линий;  $L$  – длина линии.

# Анализ линий



Здесь a, b, c – исходные линии до объединения; c, d – результирующие линии после объединения.



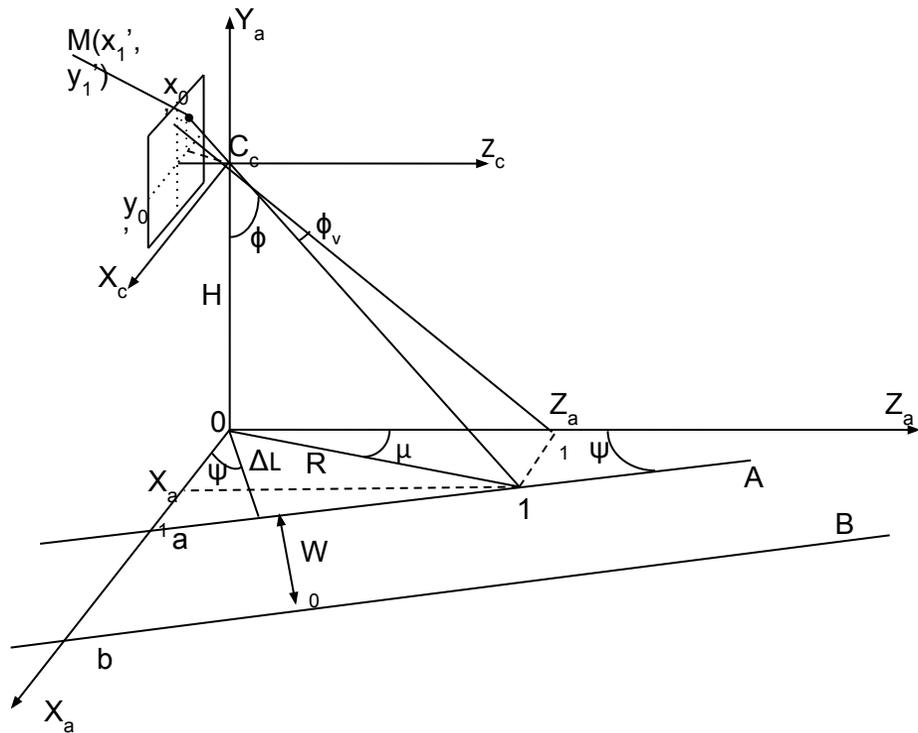
## Выделение границ проезжей части (посадочной полосы)



Следующая **основная задача** – **определение собственного положения МБЛА относительно выделенных линий**, в т.ч. **определение высоты полета МБЛА над поверхностью, на которой расположены выделенные прямые линии.**

# Алгоритм определения внешних параметров камеры с использованием гировертикали

Если известна местная вертикаль в точке оценки координат, возможно использовать альтернативный метод оценки положения и ориентации МБЛА.



В плоскости  $OX_aZ_a$  (глобальная СК) расположены параллельные прямые  $A$  и  $B$ .

Расстояние между прямыми линиями  $W_0$  – известно.

Точка  $C_c$  совпадает с точкой фокуса используемой камеры.

Измеряемый угол между осью  $OY_a$  и прямой  $C_cA_1$  равен  $\phi$ .

Угол между прямой  $C_cA_1$  и прямой  $C_cZ_{a1}$  обозначен  $\phi_v$ .

Уравнения прямых линий имеют вид:

$$X_A = k*Z_A + 0a; \quad X_B = k*Z_B + 0a + ab, \quad \text{где } A, B$$

– индексы прямых  $A, B$ , соответственно,  $k$  – коэффициент наклона линий в плоскости  $OX_aZ_a$ .

Требуется определить значения коэффициента  $k$  и отрезков:

$0a, 0C_c$ .

# Расчет параметров ориентации

Основные расчетные формулы:

Коэффициент  
наклона

$$k = \frac{tg(\varphi_{A1}) \sin(\mu_{A1}) - tg(\varphi_{A2}) \sin(\mu_{A1})}{tg(\varphi_{A1}) \cos(\mu_{A1}) - tg(\varphi_{A2}) \cos(\mu_{A1})}$$

Высота

$$H = \frac{W_0}{\cos(\arctg(k))(tg(\varphi_{B1}) \sin(\mu_{B1}) - tg(\varphi_{A1}) \sin(\mu_{A1}) - k[tg(\varphi_{B1}) \cos(\mu_{B1}) - tg(\varphi_{A1}) \cos(\mu_{A1})])}$$

Курс

$$\Psi = \arctg(k)$$

Боковое  
смещение

$$\Delta L = (Htg(\varphi_1) \sin(\mu_{A1}) - kHtg(\varphi_1) \cos(\mu_{A1})) \cos(\Psi)$$

Индексы при углах  $\mu$  и  $\varphi$  обозначают прямую и взятую на ней точку.

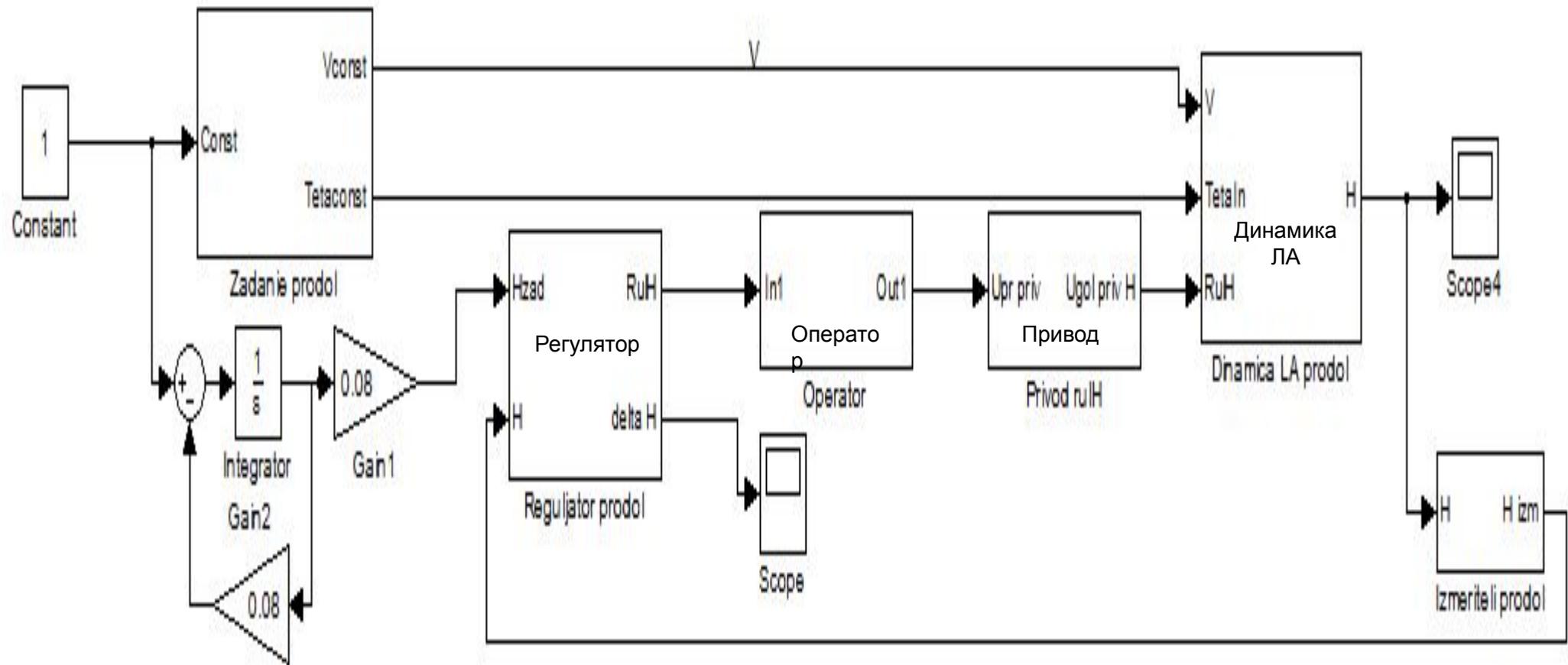
Для вычисления ориентации используются 3 точки, 2 из которых принадлежат одной линии.

Таким образом, для учета угловой ориентации достаточно пересчитать координаты 3-х точек.

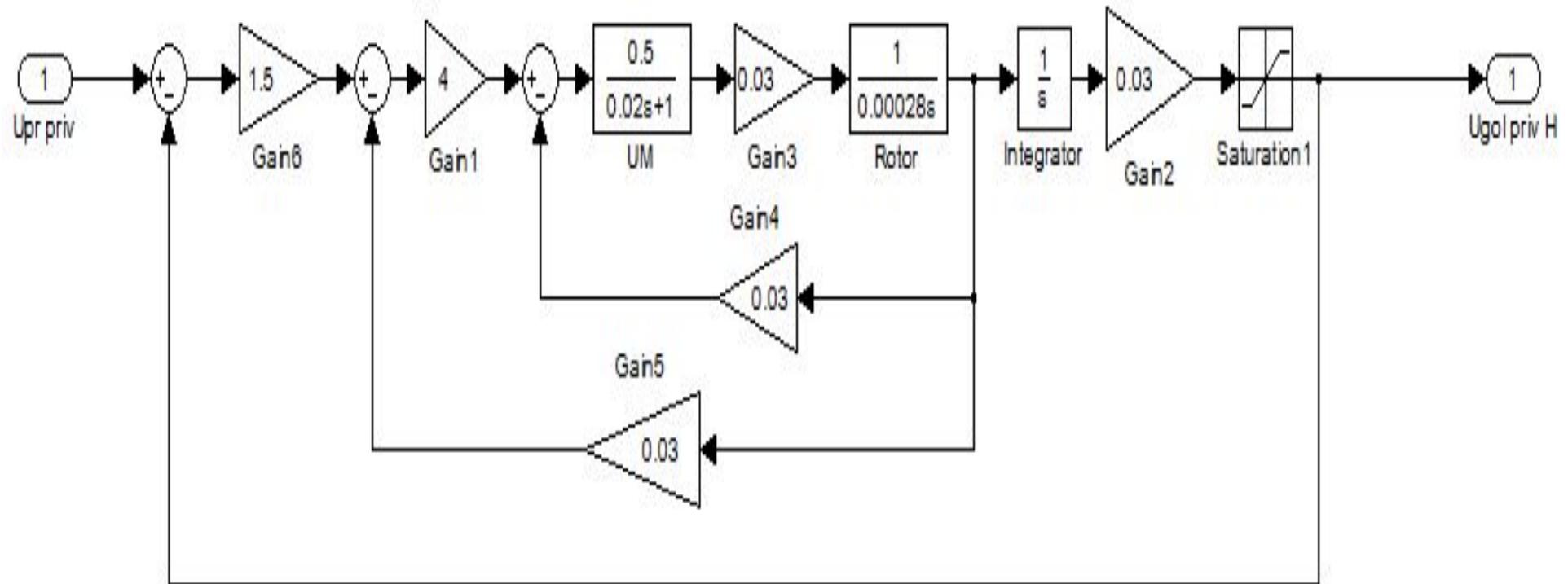
# Организация помощи оператору МБЛА

- Вынужденная посадка в условиях особой ситуации (ОС) (ветер, отказ элементов бортового оборудования, пр. причины) резко увеличивает вероятность аварий, что часто приводит к потере МБЛА.
- Возможности человека (способность к обобщению, анализу ситуации и пр.) позволяют оператору более эффективно управлять МБЛА в режиме вынужденной посадки по сравнению с автоматическим управлением.
- В связи с этим в работе рассматривается вариант использования алгоритмов высокоточной оценки координат МБЛА для организации помощи оператору в процессе автоматизированной посадки.
- Для повышения эффективности посадки действия оператора предлагается поддерживать с помощью автоматической системы формирования подсказок. Необходимость формирования подсказок оператору также обоснована требованиями к устойчивости контура управления «оператор - МБЛА». Использование подсказок оператору позволяет улучшить параметры звена «оператор» и обеспечить требуемую устойчивость рассматриваемого контура, и, как следствие, сохранить МБЛА.

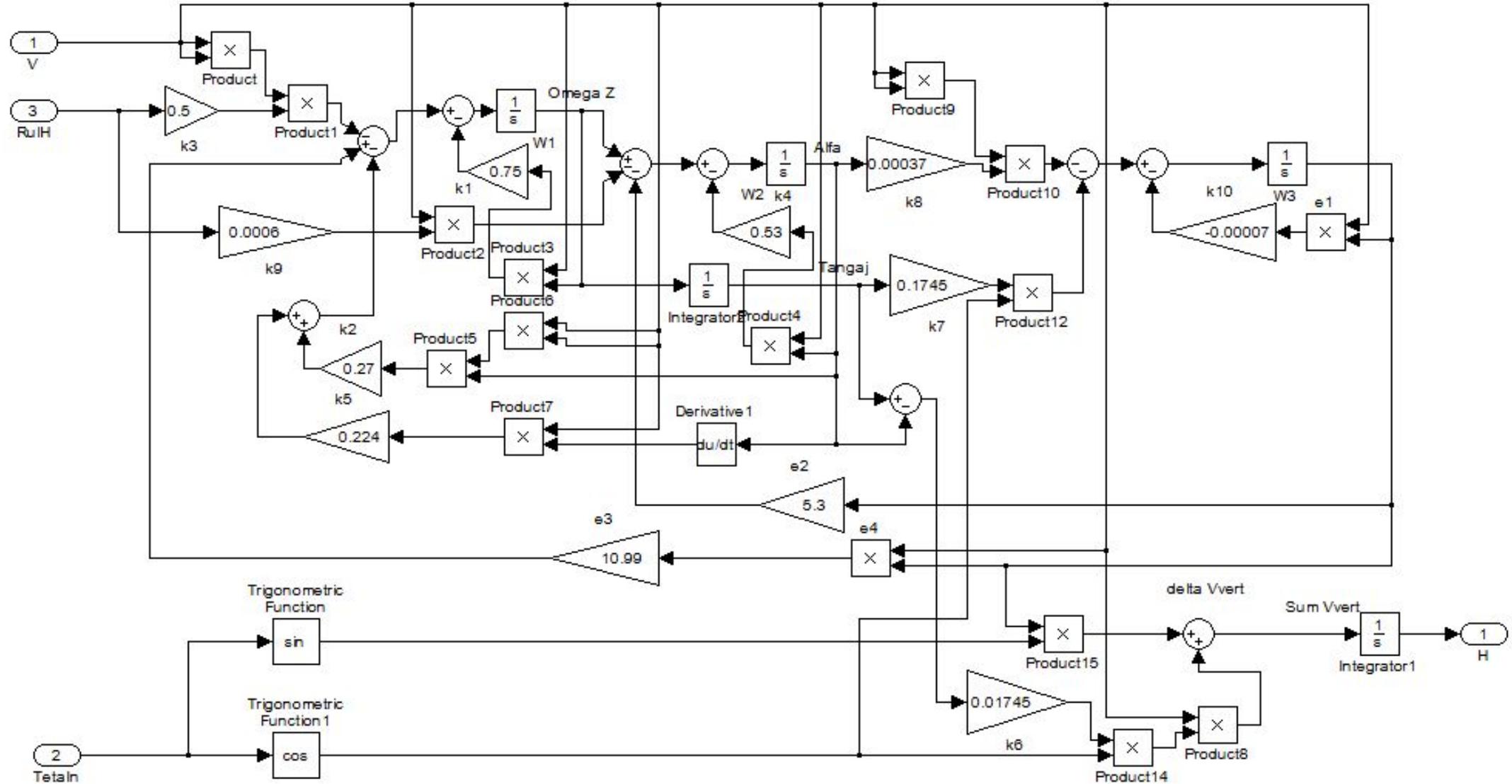
# Контур управления МБЛА



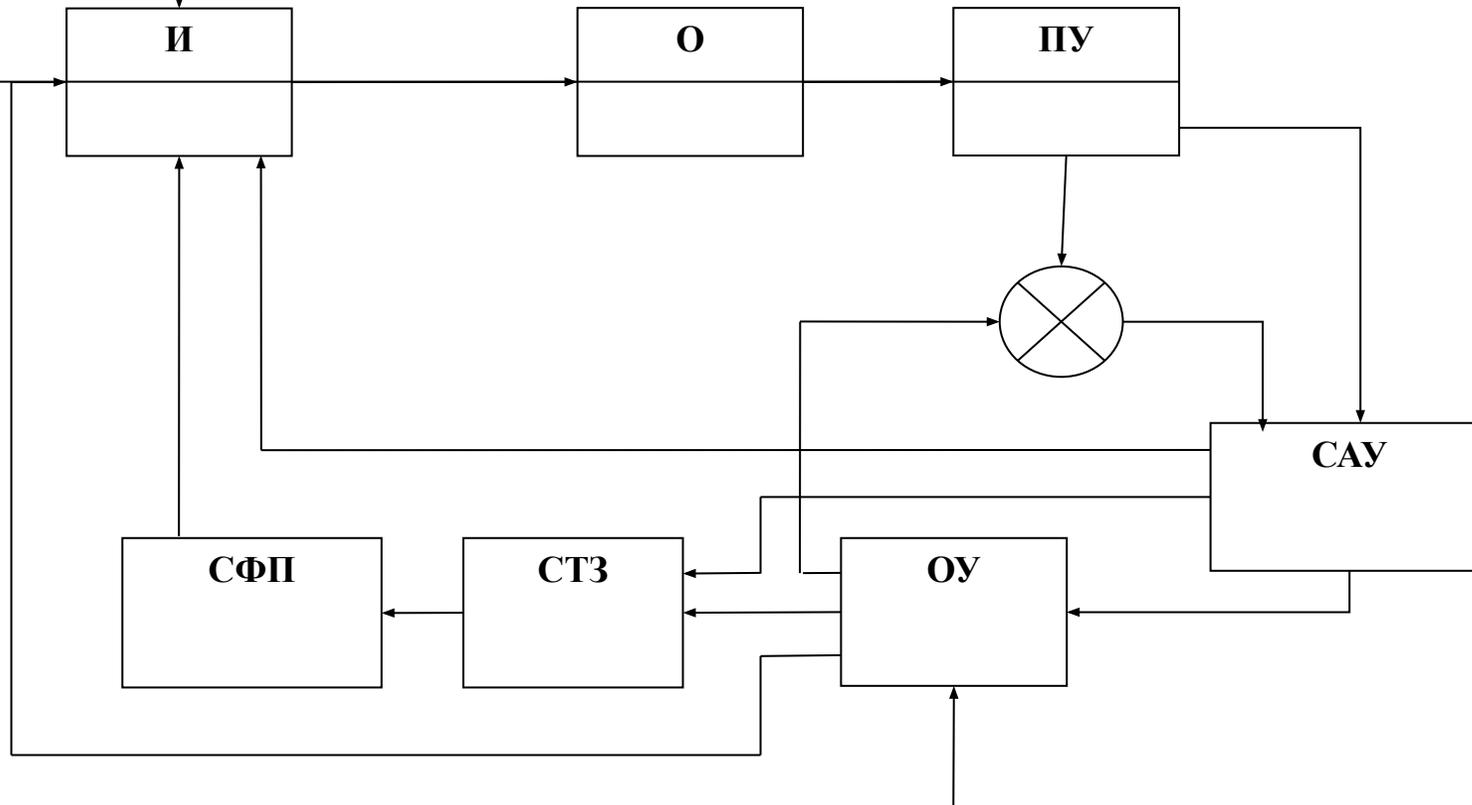
## Блок, моделирующий оператора МБЛА



# Блок динамики МБЛА в продольном канале



# Контур управления «Оператор - МБЛА»



О – оператор  
ОУ – объект управления  
И – индикатор  
ПУ – пульт управления  
САУ – система автоматического управления  
СТЗ – система технического зреничя  
СФП – система формирования подсказок

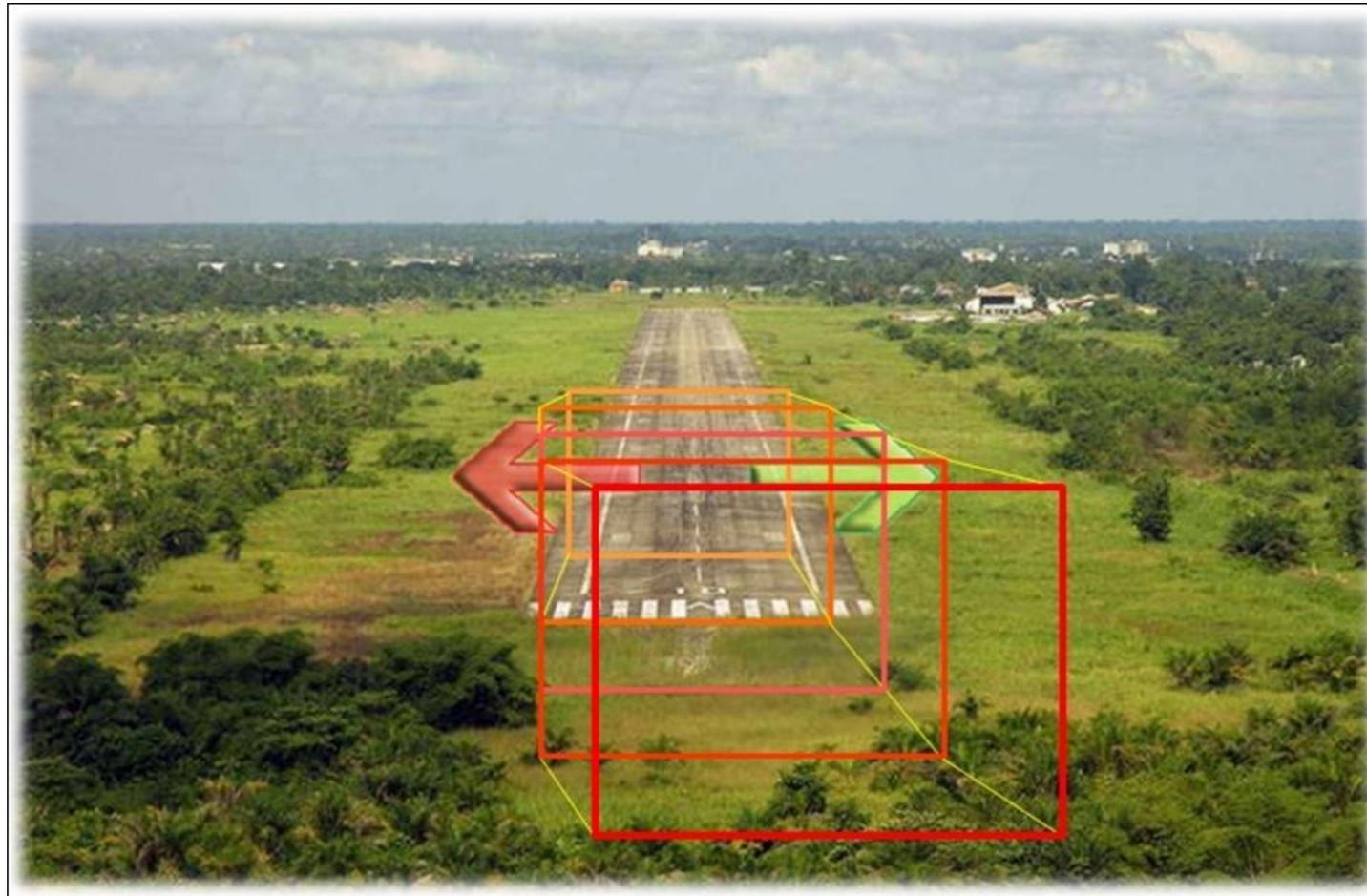
# Алгоритм формирования подсказок при организации посадки МБЛА

## Виды подсказок:

1. Информация, справка (по запросу);
2. Напоминание;
3. Рекомендация (вариант возможных действий);
4. Команда (безальтернативное действие).

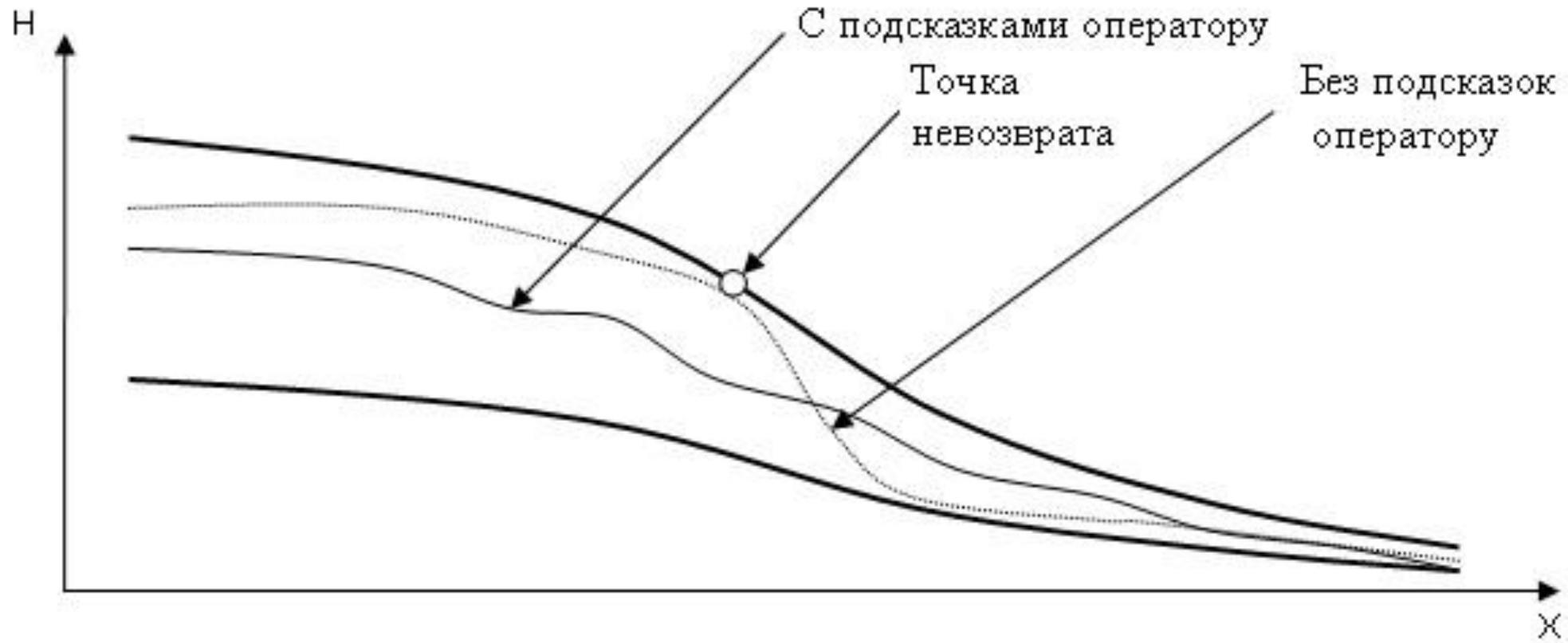


# Представление подсказок оператору



# Модельная траектория посадки МБЛА

Экспериментальные траектории посадки в вертикальной плоскости получены с помощью полунатурного моделирования и характеризующие влияние подсказок оператору на его стиль управления МБЛА. Организация подсказок оператору делает траекторию посадки МБЛА более гладкой и близкой к заданной глиссаде.



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определена структура системы автоматизированной посадки МБЛА, основанная на формировании оператору МБЛА вспомогательной информации с учетом текущей ориентации МБЛА относительно посадочной полосы;
2. Проведен анализ методов решения задачи внешней ориентации и предложен вариант решения задачи оценки ориентации МБЛА относительно различных типов внешних ориентиров с использованием СТЗ;
3. Разработан комплексный алгоритм обработки видовой информации, обеспечивающий выделение на принимаемом изображении линейных ориентиров, в качестве которых используются линии разметки посадочной полосы;
4. Разработан комплексный алгоритм формирования оператору МБЛА вспомогательной информации с учетом текущего и требуемого положения МБЛА и степени опасности такого положения;
5. Предложена методика решения задачи высокоточного наведения МБЛА на цель при использовании МБЛА для решения боевых задач, включающая в себя вопросы коррекции на траектории по эталонным изображениям, полученным с топографических карт местности, и прицеливания на терминальном участке траектории с помощью разработанных алгоритмов высокоточной оценки положения МБЛА;
6. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность предложенных методов и алгоритмов.

# Лк.22, 23. ОБНАРУЖЕНИЕ МБЛА В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

## Пример выполнения дипломной работы

Кафедра 704

Специальность 24.05.05 Интегрированные системы ЛА

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Студента .....

**Тема: ОБНАРУЖЕНИЕ МИНИ-БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В  
ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН**

**Научный руководитель:**

Ким Николай Владимирович  
кандидат технических наук, профессор

Москва – 2020

# Актуальность темы

БЛА широко применяются в науке, технике, военной области и т.д.

Наибольшее распространение получили БЛА класса мини (МБЛА)

Растет необходимость обнаружения МБЛА в различных условиях фоно-сигнальной обстановки  
(в том числе при подсветке естественными источниками света)

Представляется актуальным систем разработать систему пассивного обнаружения (СПО) МБЛА  
в условиях естественного солнечного излучения

## Цель дипломной работы

Разработка структуры и принципов функционирования СПО МБЛА (далее СТЗ) в условиях естественного солнечного излучения  
(*Неправильно! Надо: Повышение эффективности ...*)

## Задачи дипломной работы

1. Задание условий наблюдения.
2. Задание типа и характеристик объектов.
3. Определение допущений и ограничений.
4. Разработка ситуационной модели.
5. Разработка (???) основных расчетных соотношений.
6. Расчет основных параметров.
7. Формирование требований к СТЗ.
8. Разработка структурной схемы СТЗ.
9. Описание алгоритма обнаружения и блок-схем алгоритма обнаружения.
10. Апробация алгоритма обнаружения на тестовом изображении.

## Задание условий наблюдения

**Объект работы** – одиночный МБЛА.

Объект **подсвечен** солнечным излучением

Фон – **дневное** небо, при наличии **умеренной** облачности и при ясном небе

**Высота** облаков – 1500 м

**Освещенность** облаков – 5÷10 клк

## Задание типа и характеристик объектов

При анализе классификаций БЛА **не было** обнаружено информации о следующих тактико-технических характеристиках (ТТХ) БЛА:

- габаритные размеры;
- отражательные характеристики;
- скорости движения;
- диапазоны высот применения.

## Задание типа и характеристик объектов

Модель	Масса, кг	Размер (диаметр), мм	Максимальная скорость набора высоты, м/с	Максимальная скорость горизонтального полета, м/с	Диапазон высот, м
<b>Autel Robotics Evo</b> 	0,9	338	5	20	не указан
<b>Autel Robotics X Star</b> 	1,6	352	6	16	не указан
<b>DJI Phantom 3</b> 	1,0	290	6	15	не указан
<b>DJI Phantom 4</b> 	1,4	350	6	20	
<b>DJI Mavic Pro</b> 	0,74	335	5	18	
<b>SJRC F11</b> 	0,52	445	не указана	15	не указан
<b>Xiaomi Mi Drone</b> 	1,4	380	4	10	
<b>Yuneec Typhoon Q</b> 	1,7	420	3	10	

# Определение допущений и ограничений

**1. Метод локации МБЛА** – пассивный, по отраженному от объекта солнечному излучению.

## **2. Характеристики МБЛА:**

- средний размер: 0,4 м, не более;
- максимальные скорости движения:
  - вертикальная – 5 м/с,
  - горизонтальная – 15 м/с;
- движение объекта равномерное и

**3. Наблюдение объекта осуществляется в видимом диапазоне длин волн:**

- объект является **диффузно** отражающим по закону **Ламберта**;
- контраст объекта на фоне – **положительный**

**4. Определяемые (оцениваемые) характеристики объекта:**

- сигнал объекта;
- угловые координаты в местной топоцентрической системе координат (азимут, угол места);
- угловые скорости движения;
- направление движения.

# Разработка ситуационной модели

1. Диапазон дальностей обнаружения  $l_{об.мин} \div l_{об.маx} = 25 \div 100$  м;

2. Диапазон высот  $H_{об.мин} \div H_{об.маx} = 0 \div 43,3$  м;

3. Предпочтительное время работы  $T = 8.00 \div 16.00$  ч;

4. Местоположение СТЗ:  $\varphi = 55,6^\circ$  с. ш.,  $\delta = 37,4^\circ$  в. д.;

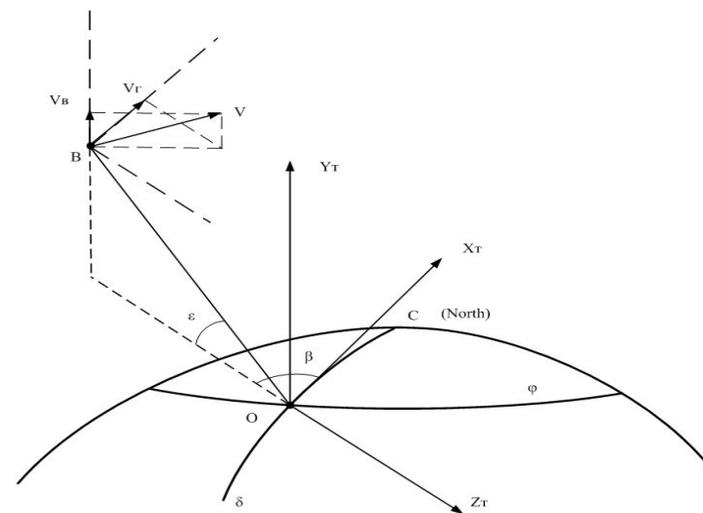
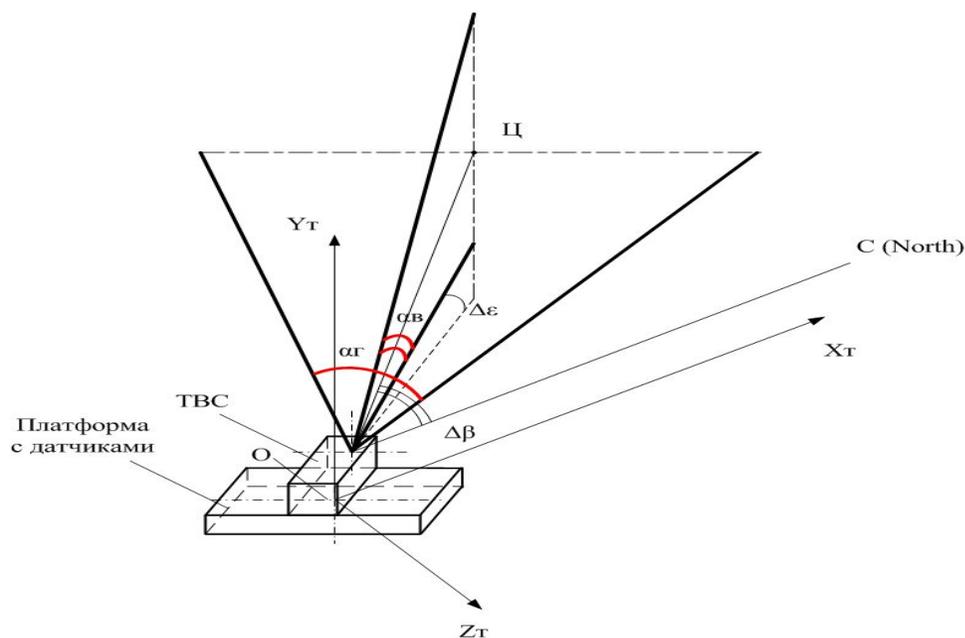
5. Минимальная освещенность объекта  $E_{об.мин} = 19,5$  клк;

6. Угловое поля зрения объектива  $\alpha_{г} \times \alpha_{в} = 60^\circ \times 60^\circ$ .

7. Углы наклона траектории движения МБЛА:

$|\theta_{в}| \leq 15^\circ$  (вертикальный);

$|\theta_{г}| \leq 15^\circ$  (горизонтальный).



# Формирование требований к СТЗ

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Месяц	Нм	3 (март)
2	Широта	$\varphi$	
3	Долгота		
4	Время суток	T	
5	Длина волны	$\lambda$	
6	Направление поля зрения (азимут)		
7	Направление поля зрения (угол места)		
8	Минимальная освещенность объекта		
9	Коэффициент отражения объекта		
10	Размер объекта		
11	Диапазон дальностей обнаружения		
12	Диапазон высот		
13	Вертикальная скорость		
14	Горизонтальная скорость		
15	Максимальная угловая вертикальная скорость		
16	Максимальная угловая горизонтальная скорость		
17	Угол вертикального наклона траектории		
18	Угол горизонтального наклона траектории		

№	Наименование	Обозначение	Значение
19	Угол поля зрения		
20	Дифракционное разрешение		
21	Диаметр объектива		
22	Фокусное расстояние		
23	Коэффициент пропускания объектива		
24	Чувствительность камеры		
25	СКО шума камеры		
26	Количество элементов разрешения		1048
27	Размер элемента разрешения		
28	Размер матрицы		
29	Частота кадров		
30			
31			16
32	Размер строба фона		
33	Смещение за кадр на максимальной дальности		
34	<b>Вероятность правильного обнаружения</b>		
35	<b>Вероятность ложной тревоги</b>		
36	Отношение сигнал/шум		

## Расчет основных параметров системы наблюдения

В этом разделе рассчитываются параметры, определенные основными расчетными соотношениями.

1. Угловое разрешение объектива:

$$\delta\alpha \approx \frac{d_{з.р.об}}{l_{об.мах}} = \frac{0,1 \text{ м}}{100 \text{ м}} = 0,001 \text{ рад}. \quad (2.26)$$

2. Диаметр объектива из условия разрешения:

$$D \approx \frac{\lambda \cdot l_{об.мах}}{d_{з.р.об}} = \frac{0,55 \cdot 10^7 \text{ м} \cdot 100 \text{ м}}{0,1 \text{ м}} = 0,55 \cdot 10^7 \text{ м}. \quad (2.27)$$

3. Диаметр из условий энергетики:

$$D \approx \frac{\sqrt{4 \cdot E_{к.мин} \cdot l_{об.мах}^2}}{E_{об.мин} \cdot \eta \cdot k_{пр.о}} = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,001 \text{ лк} \cdot 100 \text{ м}^2}}{19,5 \cdot 10^7 \text{ лк} \cdot 0,4 \cdot 0,8} = 8 \cdot 10^7 \text{ м}. \quad (2.28)$$

4. Количество элементов разложения матрицы

$$N_{з.р.к} \approx \frac{\pi \cdot \alpha}{\delta\alpha \cdot 180} = \frac{\pi \cdot 60^\circ}{0,001 \text{ рад} \cdot 180^\circ} = 1048. \quad (2.29)$$

5. Фокусное расстояние:

$$f \approx \frac{d_{з.р.к} \cdot N_{з.р.к} / 2}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{6 \cdot 10^7 \text{ м} \cdot 1048 / 2}{\text{tg} (60^\circ / 2)} = 11 \cdot 10^7 \text{ м}. \quad (2.30)$$

6. Размер матрицы:

$$d_M = d_{з.р.к} \cdot N_{з.р.к} = 6 \cdot 10^7 \text{ м} \cdot 1048 = 6,3 \cdot 10^7 \text{ м}. \quad (2.31)$$

7. Вертикальная проекция скорости для угла вертикального наклона  $|\theta_v| \leq 15^\circ$ :

$$V_v = V_{г.мах} \cdot \sin \theta_v = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \sin 15^\circ = 3,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2.32)$$

8. Горизонтальная проекция скорости для угла горизонтального наклона  $|\theta_r| \leq 15^\circ$ :

$$V_r = V_{г.мах} \cdot \sin \theta_r = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \cos 15^\circ = 14,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2.33)$$

9. Частота кадров

$$f \geq \frac{V_r}{V_{зр.к} \cdot d_{з.р.об}} = \frac{14,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,5 \cdot 0,1 \text{ м}} = 290 \text{ Гц} \approx 300 \text{ Гц}. \quad (2.34)$$

10. Максимальные угловые скорости:

$$\omega_v = \frac{V_v}{l_{об.мин}} = \frac{3,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{25 \text{ м}} = 0,156 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.35)$$

$$\omega_r = \frac{V_r}{l_{об.мин}} = \frac{14,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{25 \text{ м}} = 0,58 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (2.36)$$

11. Максимальный размер блока обнаружения:

$$d_{стр.об.мах} = \frac{l_{об.мах}}{l_{об.мин}} \cdot d_{стр.об} = \frac{100 \text{ м}}{25 \text{ м}} \cdot 4 = 16. \quad (2.37)$$

12. Размер блока фона:

$$d_{стр.ф} = 2 \cdot d_{стр.об.мах} = 2 \cdot 16 = 32. \quad (2.38)$$

13. Отношение сигнал/шум:

$$SN = k_{с.лт} + k_{с.по} = 1,65 + 2,35 = 4. \quad (2.39)$$

14. СКО шума, оцененное по изображению, с вещественного представления элементов яркости изображения (яркость от 0 до 1):

$$\sigma_{ш} = \frac{E_{к.мин}}{3} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ лк}. \quad (2.40)$$

15. Расчет порога обнаружения:

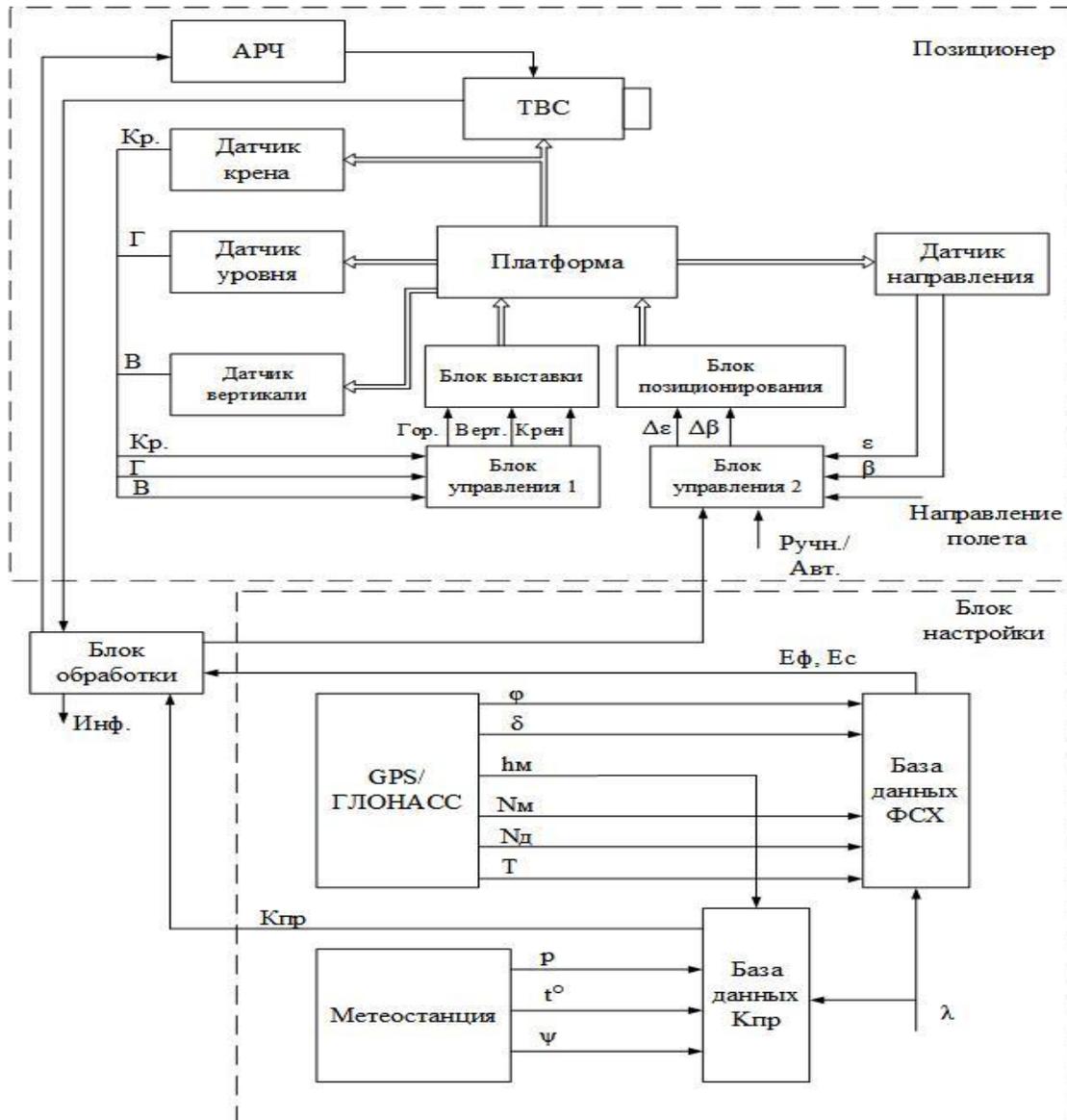
$$h = \frac{d_{стр.об}^2}{(d_{стр.об} - 1)^2} \cdot SN \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_{ш} = \\ = \frac{4^2}{(4 - 1)^2} \cdot 4 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,33 \cdot 10^{-4} = 33,5 \cdot 10^{-4} \text{ лк}. \quad (2.41)$$

## Общие требования к системе наблюдения

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Месяц	Nм	3 (март)
2	Широта	$\varphi$	55,6 °с. ш.
3	Долгота	$\delta$	37,4 °в. д.
4	Время суток	T	8.00 ÷ 16.00 ч
5	Длина волны	$\lambda$	$0,55 \cdot 10^{-6}$ м
6	Направление поля зрения (азимут)	$\Delta\varepsilon$	0°
7	Направление поля зрения (угол места)	$\Delta\beta$	0°
8	Минимальная освещенность объекта	$E_{об.мин}$	19,5 клк
9	Коэффициент отражения объекта	$k_{отр}$	0,4
10	Размер объекта	$d_{об}$	0,4 м
11	Диапазон дальностей обнаружения	$l_{об.мин} \div l_{об.мах}$	25 ÷ 100 м
12	Диапазон высот	$H_{об.мин} \div H_{об.мах}$	0 ÷ 43,3 м
13	Вертикальная скорость	$V_v$	$3,9 \frac{м}{с}$
14	Горизонтальная скорость	$V_r$	$14,5 \frac{м}{с}$
15	Максимальная угловая вертикальная скорость	$\omega_v$	$0,156 \frac{рад}{с}$
16	Максимальная угловая горизонтальная скорость	$\omega_r$	$0,58 \frac{рад}{с}$
17	Угол вертикального наклона траектории	$ \theta_v $	15°
18	Угол горизонтального наклона траектории	$ \theta_r $	15°

№	Наименование	Обозначение	Значение
19	Угол поля зрения	$\alpha$	60°
20	Дифракционное разрешение	$\delta\alpha$	$10^{-3}$ рад
21	Диаметр объектива	$D$	8 см
22	Фокусное расстояние	$f'$	11 мм
23	Коэффициент пропускания объектива	$k_{пр.о}$	0,8
24	Чувствительность камеры	$E_{к.мин}$	$10^{-3}$ лк
25	СКО шума камеры	$\sigma_{ш}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$ лк
26	Количество элементов разрешения	$N_{эр.к}$	1048
27	Размер элемента разрешения	$d_{эр.к}$	$6 \cdot 10^{-6}$ м
28	Размер матрицы	$d_M$	$6,3 \cdot 10^{-3}$ м
29	Частота кадров	$f$	300 Гц
30	Размер строба обнаружения ( $l_{об.мах}$ )	$d_{стр.об}$	4
31	Размер строба обнаружения ( $l_{об.мах}$ )	$d_{стр.об.мах}$	16
32	Размер строба фона	$d_{стр.ф}$	32
33	Смещение за кадр на максимальной дальности	$\omega_{эр.к}$	0,5
34	Вероятность правильного обнаружения	$P_{по}$	0,95
35	Вероятность ложной тревоги	$P_{лт}$	0,01
36	Отношение сигнал/шум	SN	4
37	Порог обнаружения	$h$	$33,5 \cdot 10^{-4}$ лк

# Разработка структурной схемы СТЗ



## Обозначения:

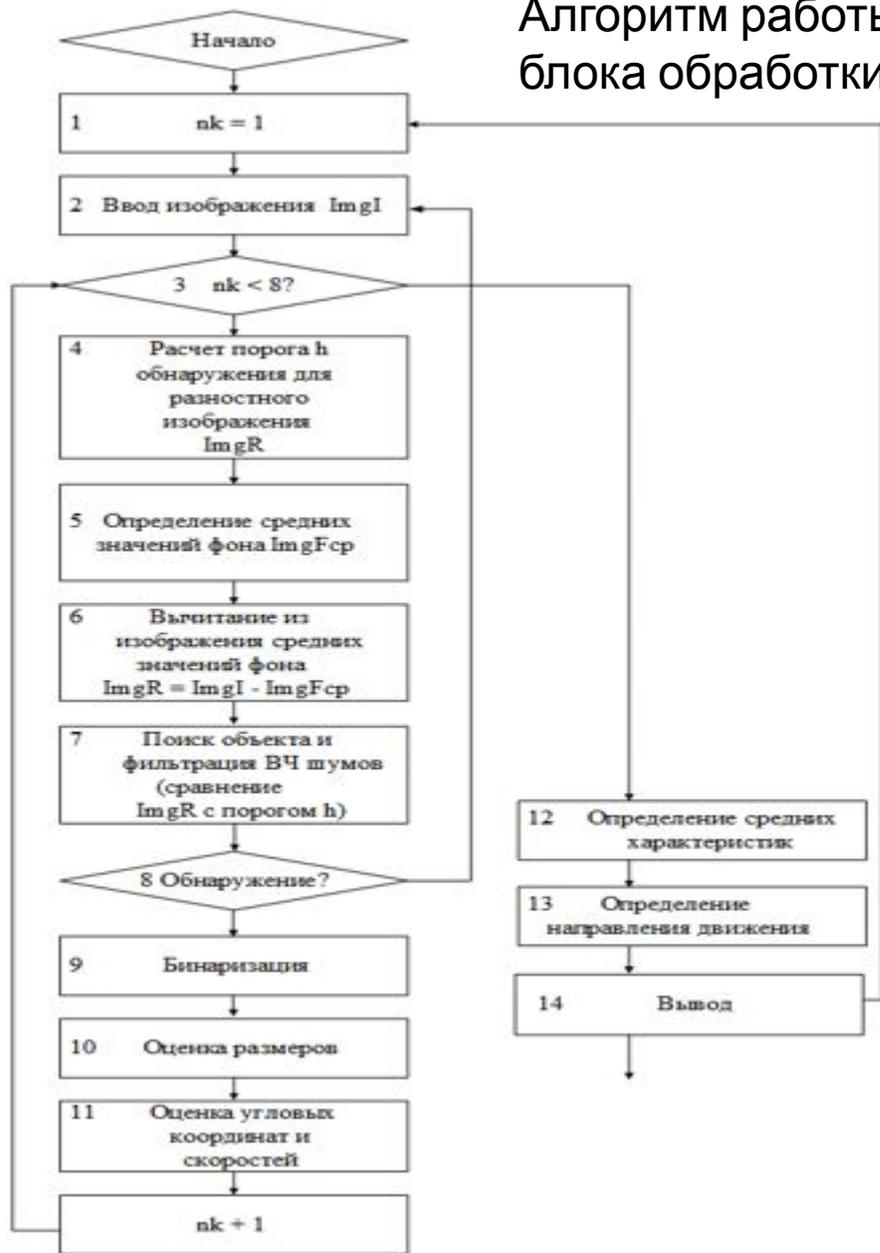
ТВС – телевизионная система;  
 ФСХ – фоно-сигнальные характеристики;  
 Кр. – крен;  
 Г – горизонталь;  
 В – вертикаль;  
 Nm – номер месяца;  
 Nd – дата;  
 T – поясное время;  
 hm – высота над уровнем моря;  
 λ – длина волны;  
 p – давление;

АРЧ – автоматическая регулировка чувствительности;  
 Еф – освещенность фона;  
 Ес – освещенность объекта;  
 Кпр – коэффициент пропускания трассы;  
 φ – широта;  
 δ – долгота;  
 ε – угол места;  
 β – азимут;  
 t° – температура;  
 ψ – влажность.

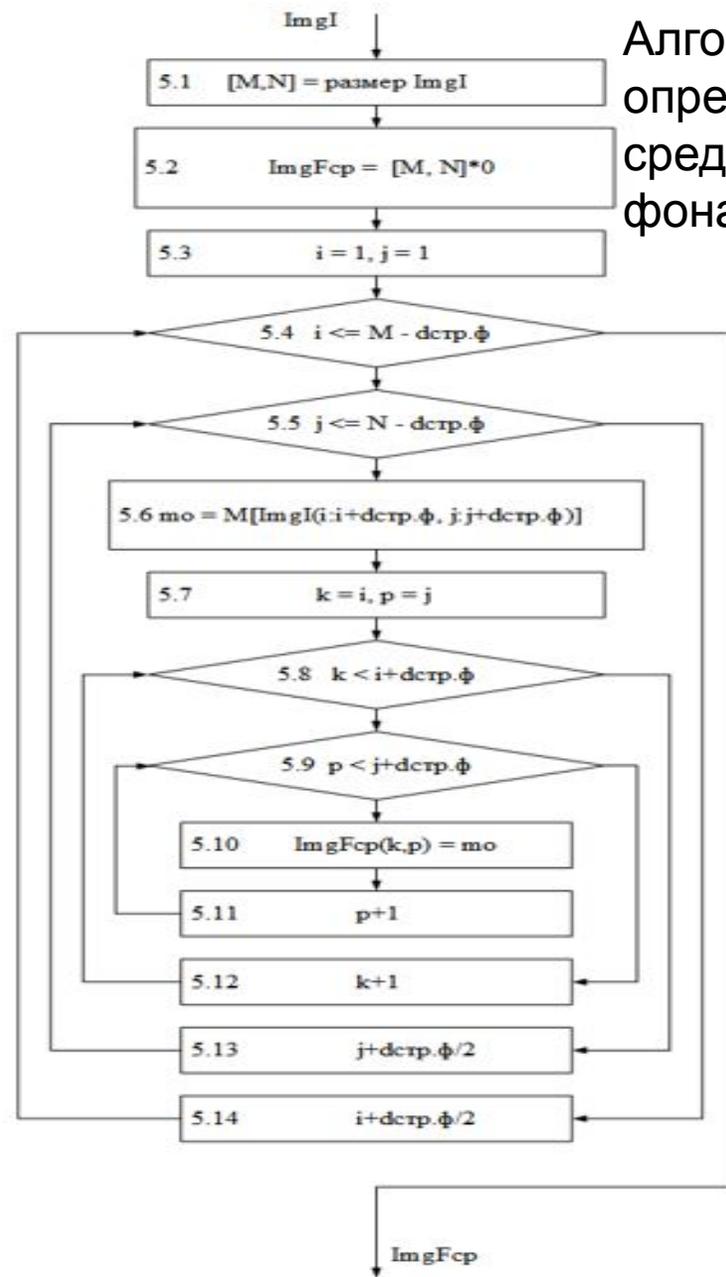
## Функциями блока обработки изображений являются:

- обнаружение сигнала (объекта);
- определение (оценка) угловых координат объекта;
- определение (оценка) угловых скоростей движения объекта;
- определение направления движения;
- обеспечение слежения за объектом;
- выдача информации оператору.

Алгоритм работы блока обработки



Алгоритм определений средних значений фона

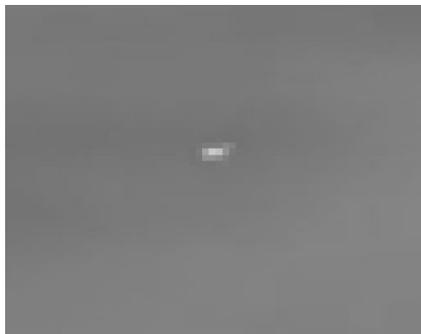


# Апробация алгоритма

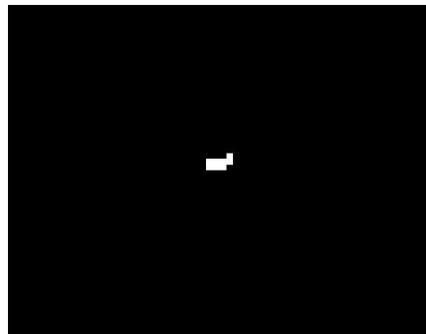
Исходное тестовое изображение



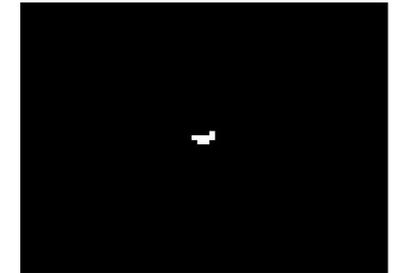
Увеличенный фрагмент  
(1-я итерация)



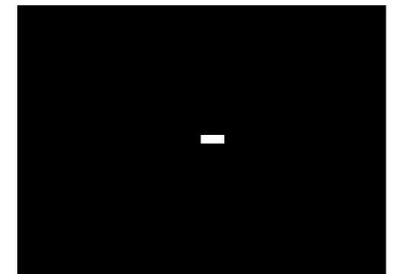
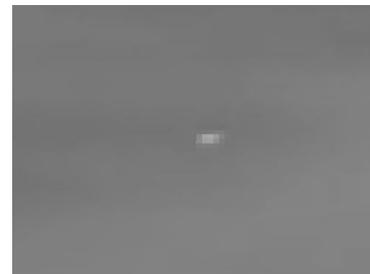
Бинаризованное изображение  
(1-я итерация)



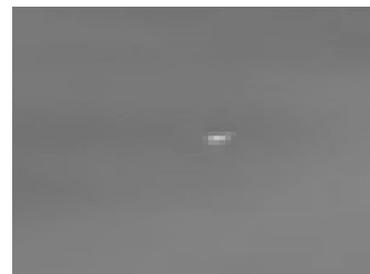
На 2-й итерации:



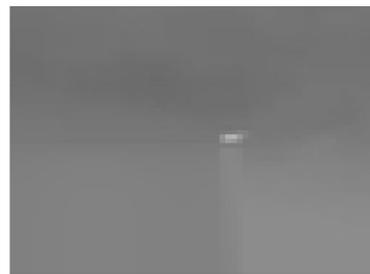
На 5-й итерации:



На 8-й итерации:



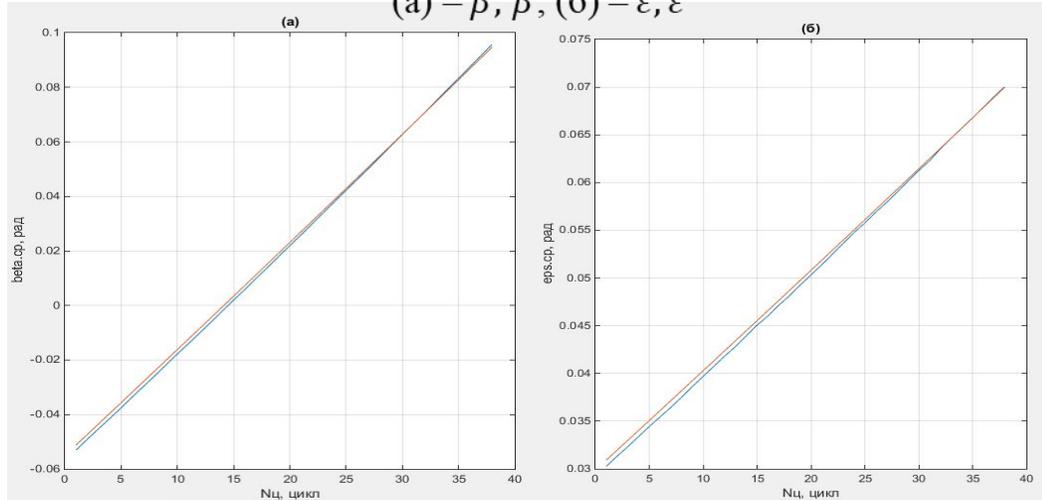
На 304-й итерации:



# Апробация алгоритма

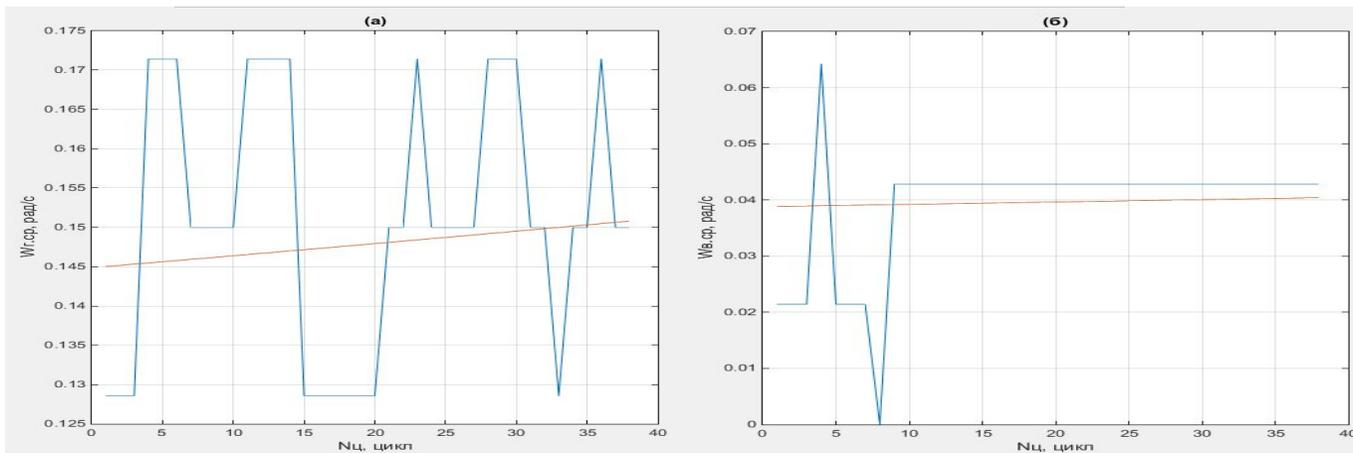
Угловые координаты

(а) –  $\hat{\beta}, \beta$ ; (б) –  $\hat{\varepsilon}, \varepsilon$



Угловые скорости

(а) –  $\hat{\omega}_Г, \omega_Г$ ; (б) –  $\hat{\omega}_В, \omega_В$



Оценки статистических характеристик

$$M[\hat{\beta}] = 20,46 \text{ мрад};$$

$$M[\hat{\varepsilon}] = 49,93 \text{ мрад};$$

$$M[\hat{\omega}_Г] = 151,13 \text{ мрад/с};$$

$$M[\hat{\omega}_В] = 38,91 \text{ мрад/с};$$

$$\sigma[\hat{\beta}] = 44,68 \text{ мрад};$$

$$\sigma[\hat{\varepsilon}] = 11,97 \text{ мрад};$$

$$\sigma[\hat{\omega}_Г] = 16,48 \text{ мрад/с};$$

$$\tau[\hat{\omega}_В] = 10,98 \text{ мрад/с};$$

$$M[\beta] = 21,37 \text{ мрад};$$

$$M[\varepsilon] = 50,33 \text{ мрад};$$

$$M[\omega_Г] = 147,87 \text{ мрад/с};$$

$$M[\omega_В] = 39,62 \text{ мрад/с};$$

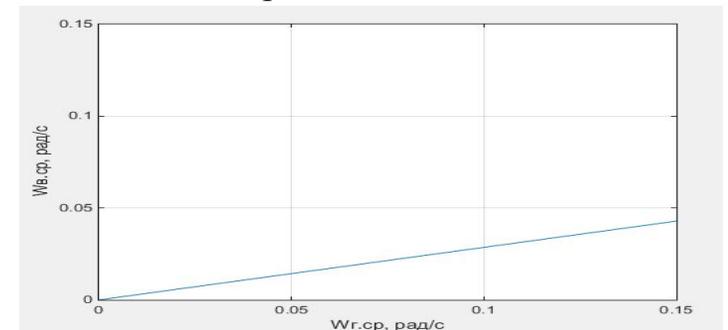
$$\sigma[\beta] = 43,82 \text{ мрад};$$

$$\sigma[\varepsilon] = 11,77 \text{ мрад};$$

$$\sigma[\omega_Г] = 1,73 \text{ мрад/с};$$

$$\sigma[\omega_В] = 0,46 \text{ мрад/с};$$

Направление движения



# Выводы

1. Разработанная система обеспечивает обнаружение МБЛА в наиболее выгодных с энергетической точки зрения условиях по сравнению с другими аналогичными системами.
2. Оптимально ориентированная относительно Солнца и направления полета МБЛА в условиях одной и той же местности и близких характеристик атмосферных трасс и фоно-сигнальных условий описанная СТЗ может использоваться для оценки заметности МБЛА.
3. Данная СТЗ при работе по МБЛА с известным (эталонированными) отражательными характеристиками может использоваться для оценки коэффициента пропускания атмосферных трасс местности разного типа.

# Лк. 19, 20. ОРГАНИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАННЫХ ДЕЙСТВИЙ ГРУППЫ БЛА ПРИ ПОИСКЕ МОБИЛЬНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

По материалам кандидатской диссертации Крылова И.Г. Научный руководитель Ким Н.В.

**Целью диссертационной работы** является повышение производительности поиска наземных мобильных объектов за счет использования автономной группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

Для достижения поставленной цели необходимо разработать технологию организации согласованных действий БЛА при поиске мобильных наземных объектов.

## *Вопросы:*

1. Какие предложения по вторичному поиску группой БЛА?
2. Согласованный полет или нет?
3. Если согласованный полет, то как реализуется согласование?
4. Общие или индивидуальные задания?
5. Как оценивать эффективность действий?

**Разрабатываемая технология должна включать:**

Сценарий поиска наземных мобильных объектов группой БЛА;

Комплексный алгоритм решения целевых задач группой БЛА;

Алгоритмы автоматического принятия решений для корректировки целевых задач и способов их решений в изменяемых условиях поиска;

Алгоритмы автоматического управления группой и отдельными БЛА на различных этапах выполнения решаемых целевых задач.

**Предлагаемая технология анализа ситуации реализуется на основе использования:**

- Баз данных (БД), формируемых заранее и содержащих сведения о возможных объектах (явлениях, процессах) интереса и их атрибутах, в т.ч. карт местности;
- Баз знаний (БЗ), формируемых заранее и содержащих продукции, описывающие каузальные отношения между объектами (явлениями, процессами);
- Описаний (моделей):
  - ✓ целевой задачи (ЦЗ);
  - ✓ состояния БЛА, включая бортовое оборудование и СН. В общем случае данная модель необходима для учета возможностей БЛА и СН при планировании маршрутов и формировании стратегии поиска. В настоящем исследовании основные параметры БЛА и СН задаются и принимаются постоянными, поэтому модель состояния БЛА не рассматривается;
  - ✓ обстановки, учитывающей априорную и текущую информацию.

При этом, на основании анализа описаний ЦЗ и текущей обстановки определяются области интереса, а информация, содержащаяся в описании состояния СТЗ, позволяет оценить возможные ограничения на решение ЦЗ.

# Описание целевых задач

Описание ЦЗ должно содержать описания:

объекта поиска: тип, уникальные атрибуты (форма, размеры, наблюдения, дополнительные);

возможная целевая функция (задача) объекта, возможные местоположение и достоверность;

области поиска: район (номер, координаты), границы.

Существуют различные варианты описаний. В частности, описание ЦЗ м.б. представлено в виде:

$G((SO(1):Type(Building(n))):$  /\*ЦЗ – поиск; объект поиска – здание, формой  $n$ \*/

$AtrM(H(15)^L(50)^W(20))$  /\*Атрибуты формы: высота, длина, ширина\*/

$AtrObs(B(Not)^C(G)^T(Not))^F(Not))^$  /\*Атрибуты наблюдения: распределение яркости, цвет, текстура, форма, отличные от типичных\*/

$AtrA(Not)^$  /\*Дополнительные атрибуты \*/

$GSO(Not^P(.))^Tr(Not^P(.))^$  /\*Целевые, поведенческие атрибуты объекта поиска\*/.

Здесь «*Not*» обозначает отсутствие или неопределенность соответствующего уникального атрибута.

Описание остальных (типичных) значений атрибутов должны содержаться в БД.

Описание области поиска:

$SR(724)$  /\*Номер квадрата поиска\*/.

# Модель текущей обстановки

Модель текущей обстановки  $MS(.)$  содержит сведения, дополняющие данные, неопределенные в БД.

Пусть, например, в результате дождей на дорогах образовались водные преграды для транспортных средств. Описание одной из них, обнаруженной СТЗ, может быть представлено в виде

- $MS((O(16)^T(P(4))^{(K(x126^y109)^M(Jx:7041281 Jy:24019394))^{...},$

где  $O$  – объект (тип поверхности);  $T$  – свойства объекта;  $P(4)$  – показатель проходимости;  $K(x, y)$  – координаты центра масс изображения объекта;  $M$  – моменты инерции изображения объекта;  $Sq$  – площадь;  $Jx, Jy$  – значения моментов инерции.

Вид объекта  $O$  задается индексом в скобках. Так, для объектов области поиска: 1 – дорога, 2 – обочина, 3 – луг, 4 – лес, ..., 16 – водная преграда, ...

БЗ может быть сформирована на основе набора продукций вида

$$(j) S; L; A \Rightarrow B; Q,$$

где  $j$  – номер продукции,  $S$  – класс ситуации,  $L$  – условие актуализации,  $A$ ,  $B$  – левая и правая части продукции,  $Q$  – указание, вводимые после реализации данной продукции.

Цель использования продукций состоит в определении областей, в которых:

возможно присутствие объекта поиска;

невозможно присутствие объекта поиска;

возможно присутствие объекта поиска, но определенные атрибуты наблюдения могут быть не идентифицируемы;

возможно присутствие объекта поиска, но он может быть частично или полностью скрыт от наблюдения.

# Отношения между объектами

В качестве примера рассмотрим некоторые варианты отношений объекта поиска (SO) и объектов интереса, присутствующих в области поиска:

1. Если некоторая поверхность (объект области поиска) имеет характеристики проходимости ( $O(.) (P(.))$ ), не хуже, чем проходимость объекта поиска ( $SO(.) (P(.))$ ), то она проходима  $P$  и является объектом интереса ( $IO$ ) ( $[ (2p); SS; L_1(CSR \wedge O(16)); A_1(O(16)(P(4)) \geq SO(1)(P(4)) \Rightarrow B_1(P); Q_1(IO)) ] \vee \dots$ ),

где  $SO$  – объект поиска,  $IO$  – объект интереса,  $SS$  – класс задач оценки текущей поверхности,  $CSR$  – распознавание;

2. Если  $SO$  может присутствовать в исследуемой области, но не обнаружен, то требуется анализ ситуаций ( $SA$ ) следующего уровня;

3. Если существуют объекты, габариты которых больше габаритов  $SO$ , то  $SO$  м.б. загорожен.

Основная информация, используемая при анализе ситуаций, например, целевые функции объектов, признаки поведения и пр., может быть получена заранее. При оценке возможных значений признаков наблюдения (форма, размеры, текстура, цвет, отражающая способность поверхности и т.д.) эти значения, с учетом условий наблюдения, также могут быть определены до начала поиска.

Выбор конкретных значений признаков и атрибутов из имеющихся данных должен производиться с учетом текущих условий поиска.

Таким образом, информационной основой реализации «Анализа ситуаций» должны быть связанные базы данных (БД).

Таблица «Объекты»

Идентификатор	Название
1	Машина
2	Человек
3	Самолет

Таблица «Условия»

<u>Идентиф.</u>	Объект	Скорость
	<u>карты</u>	
1	Лес	4
1	Дорога	60
2	Лес	5
2	Вода	3

Отношение «один ко многим»

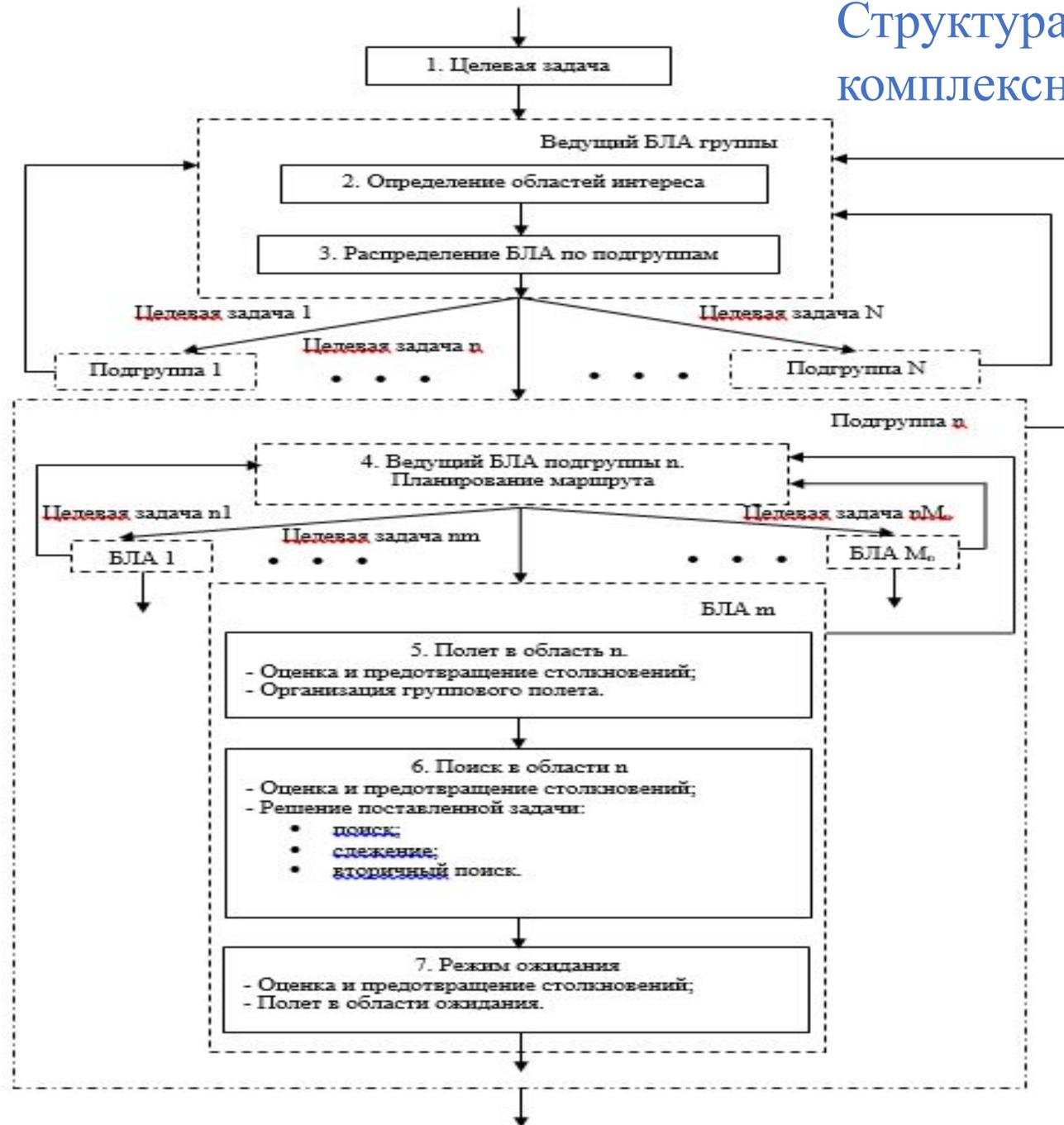
Таблица «Объекты»

Идентификатор	Объект
	<u>карты</u>
1	Лес
2	Дорога
3	Забор
4	Вода

Таблица «Варианты метрик»

Идентификатор	Тип метрики
	<u>на карте</u>
1	Площадной
2	Линейный
4	Площадной
4	Линейный

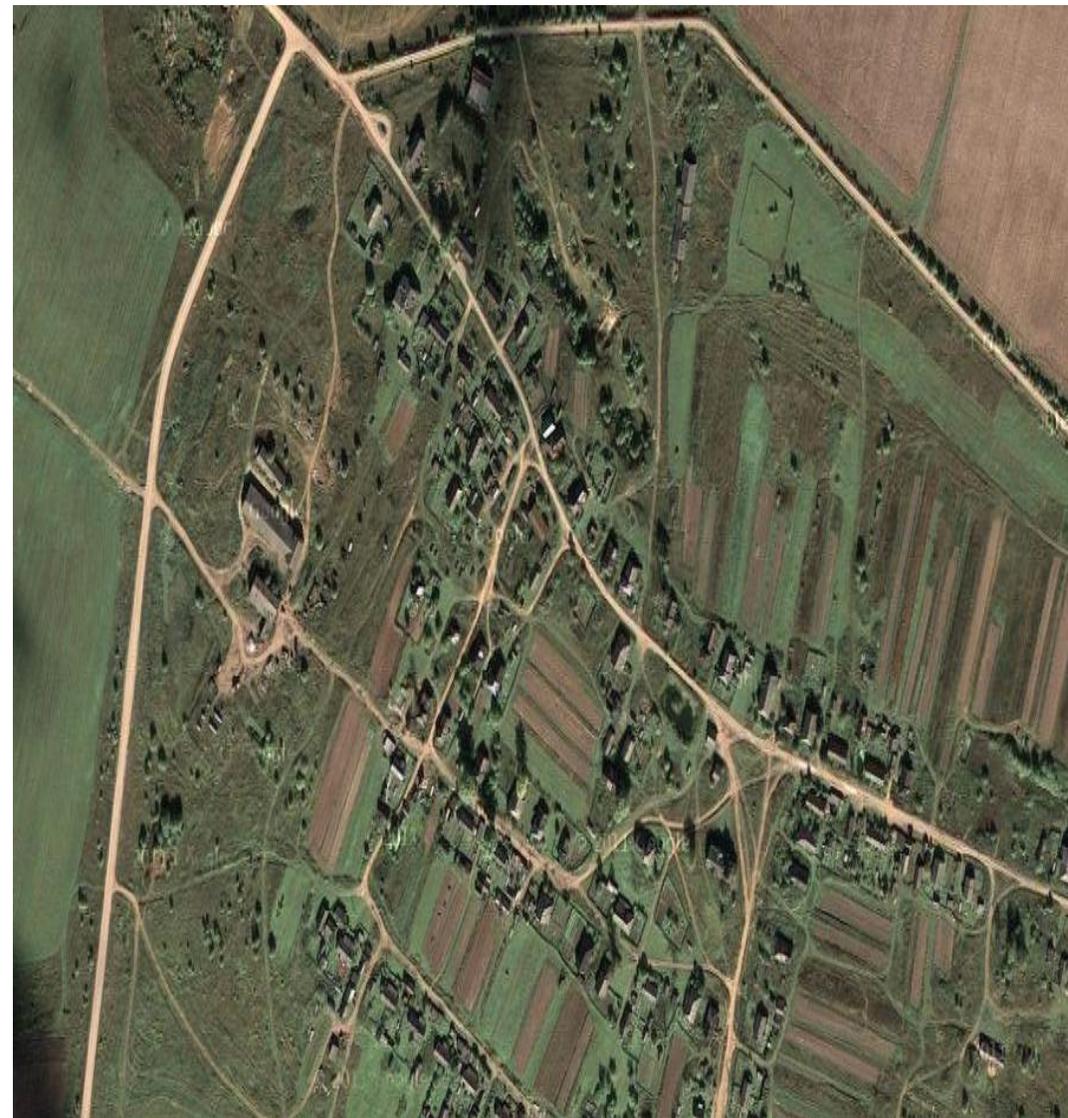
# Структура комплексного алгоритма



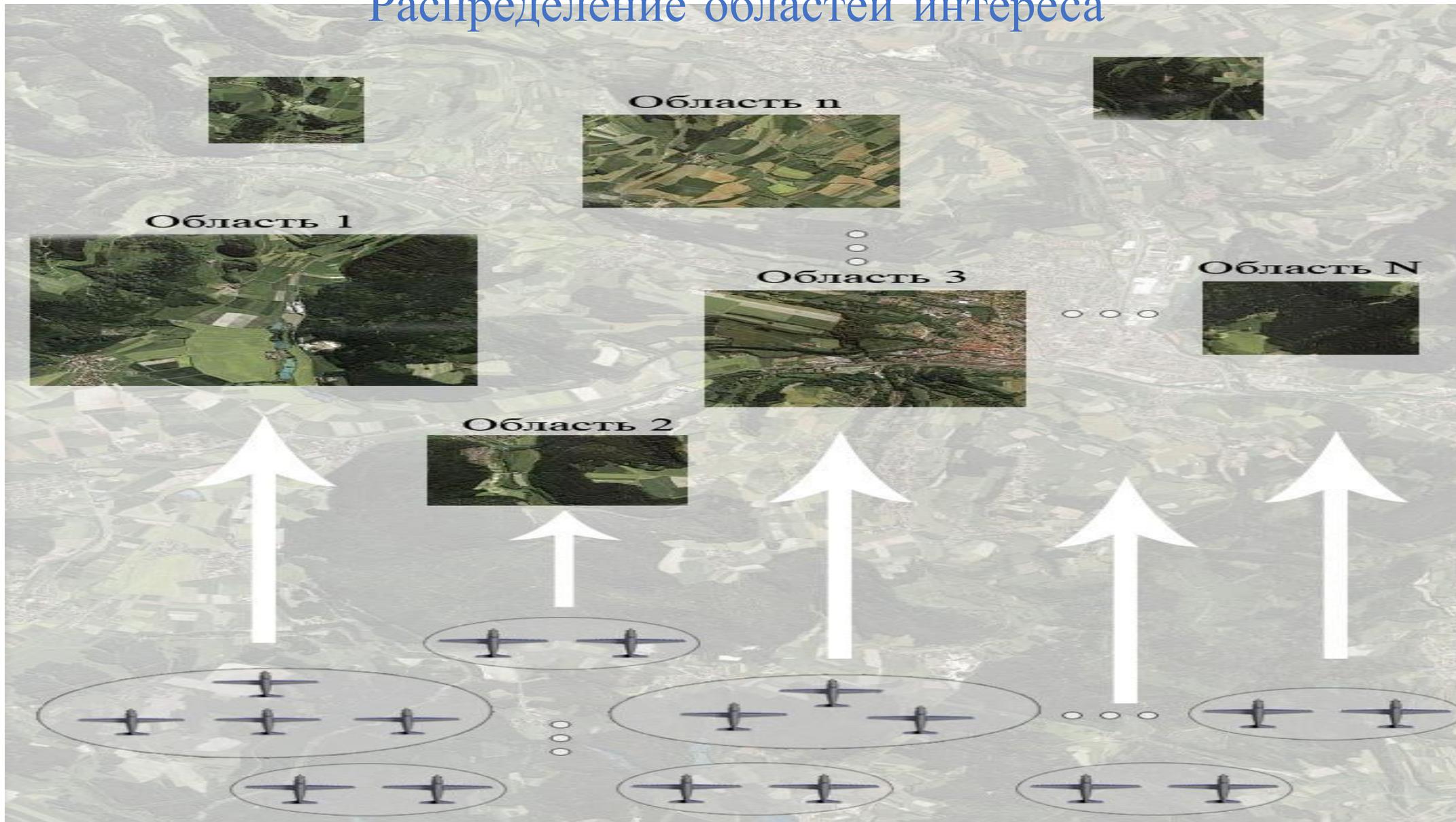
# Выделение областей интереса на основе анализа ситуаций



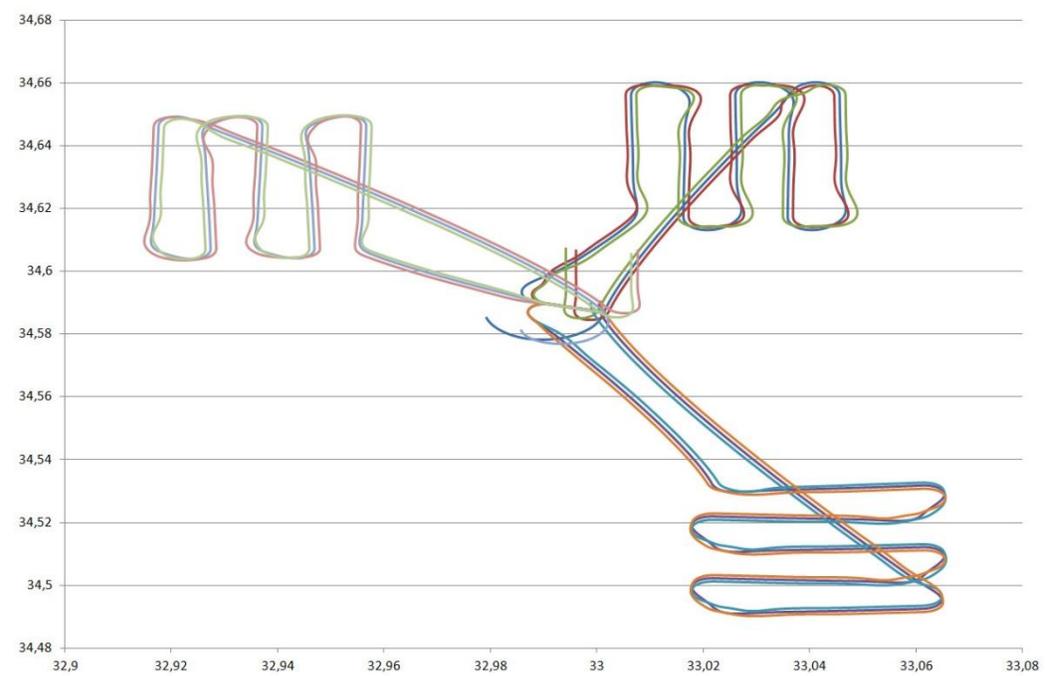
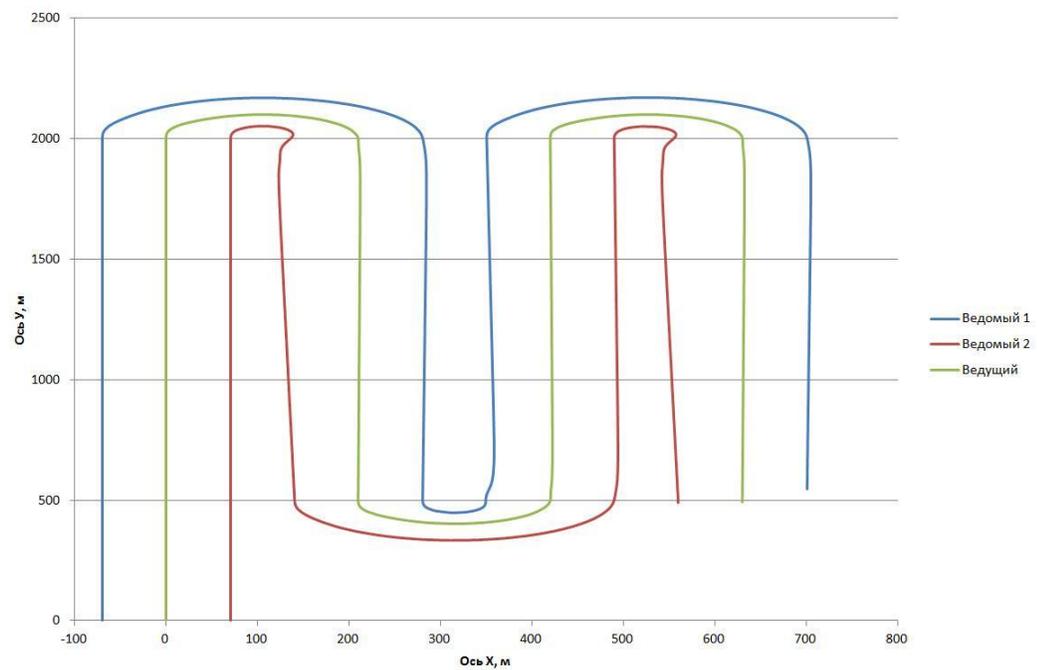
## Фрагменты областей интереса



# Распределение областей интереса



# Планирование траекторий группового полета





# Заключение

В результате проведенных исследований получены:

1. Сценарий поиска мобильных наземных объектов автономной группой БЛА, основанный на анализе текущей ситуации, определяющей условия поиска;
2. Методика формирования описаний целевых задач, основанная на использовании баз данных и описаний уникальных атрибутов объектов и условий поиска;
3. Методика анализа ситуаций для выделения областей интереса, основанная на использовании баз данных и набора производственных правил;
4. Методика и алгоритм планирования наблюдений, реализуемых с бортов БЛА при наличии априорной неопределенности относительно областей интереса;
5. Алгоритмы и программное обеспечение для организации управления группой БЛА на основе использования типовых операций, реализующие:
  - автоматический полет по заданной траектории (по маршруту). В частности, по заданным промежуточным пунктам маршрута;
  - полет строем с заданным интервалом и дистанцией;
  - полет по типовым траекториям наблюдения (круг, восьмерка);
  - автоматический возврат в строй или в заданный (конечный) пункт маршрута;
  - определение и предотвращение опасного сближения БЛА.
6. Комплексный алгоритм решения целевых задач группой БЛА, основанный на использовании методик и алгоритмов по пунктам 1-5. Алгоритм включает процедуры:
  - выделения областей интереса на основе анализа ситуации;
  - распределения БЛА на подгруппы;
  - планирование маршрутов для подгрупп БЛА;
  - организация полета до области поиска;
  - проведение поиска объектов;
  - организация возврата в область ожидания.

Результаты исследований, проведенные с помощью математического и полунатурного моделирования подтверждают работоспособность предлагаемых решений и возможность реализации разработанных алгоритмов на перспективных бортовых вычислителях, в т.ч. для малоразмерных БЛА.

# РЕШЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ ЗАДАЧ НА БОРТУ МАЛОРАЗМЕРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

По материалам кандидатской диссертации Степановой Н.В. Научный рук. Ким Н.В.

**Цель работы.** Повышение избыточности системы навигации малоразмерного беспилотного летательного аппарата за счет использования комплексного алгоритма обработки изображений (КАОИ), обеспечивающего решение навигационных и целевых задач.

Повышение эффективности обработки изображений в задачах навигации, поиска наземных объектов, хранения и передачи видеоинформации в условиях ограниченной вычислительной производительности бортовой ЭВМ.

## **Практическая ценность**

- Повышение точности навигационных измерений путем комплексирования с уже имеющейся навигационной информацией;
- Повышение надежности работы цифровой системы автоматического управления (ЦСАУ).

## **Вопросы:**

1. Какие предложения?
2. Какие методы снижения требуемой вычислительной производительности?
3. Как оценивать эффективность действий?

## Постановка задачи

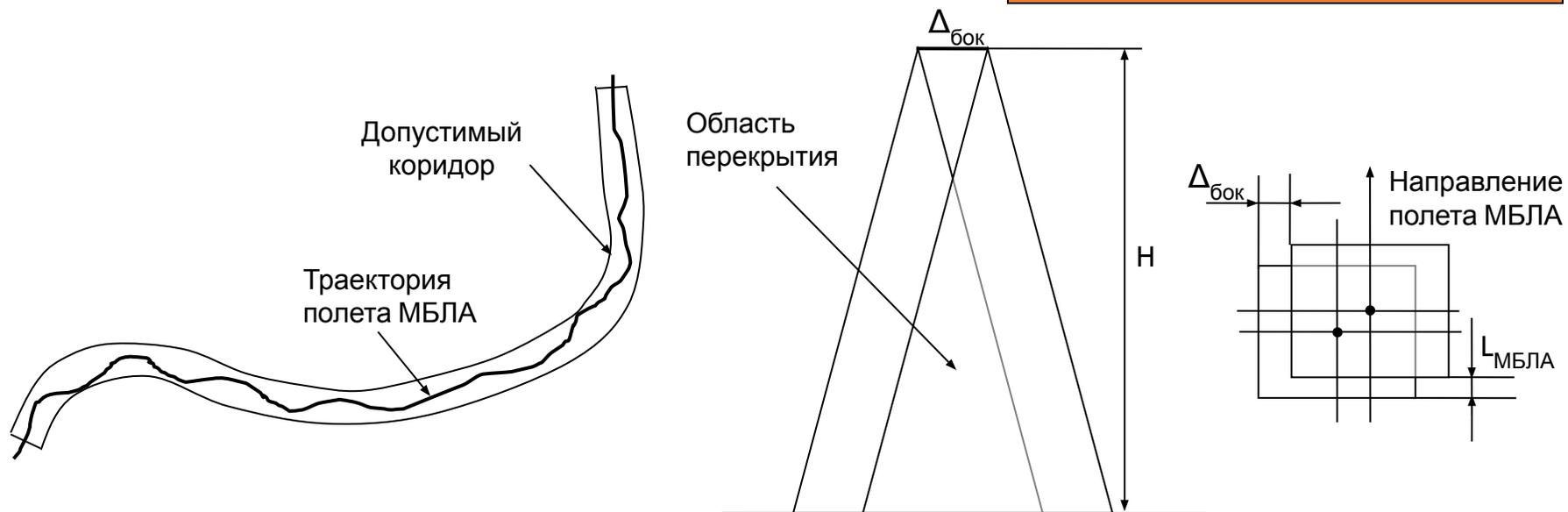
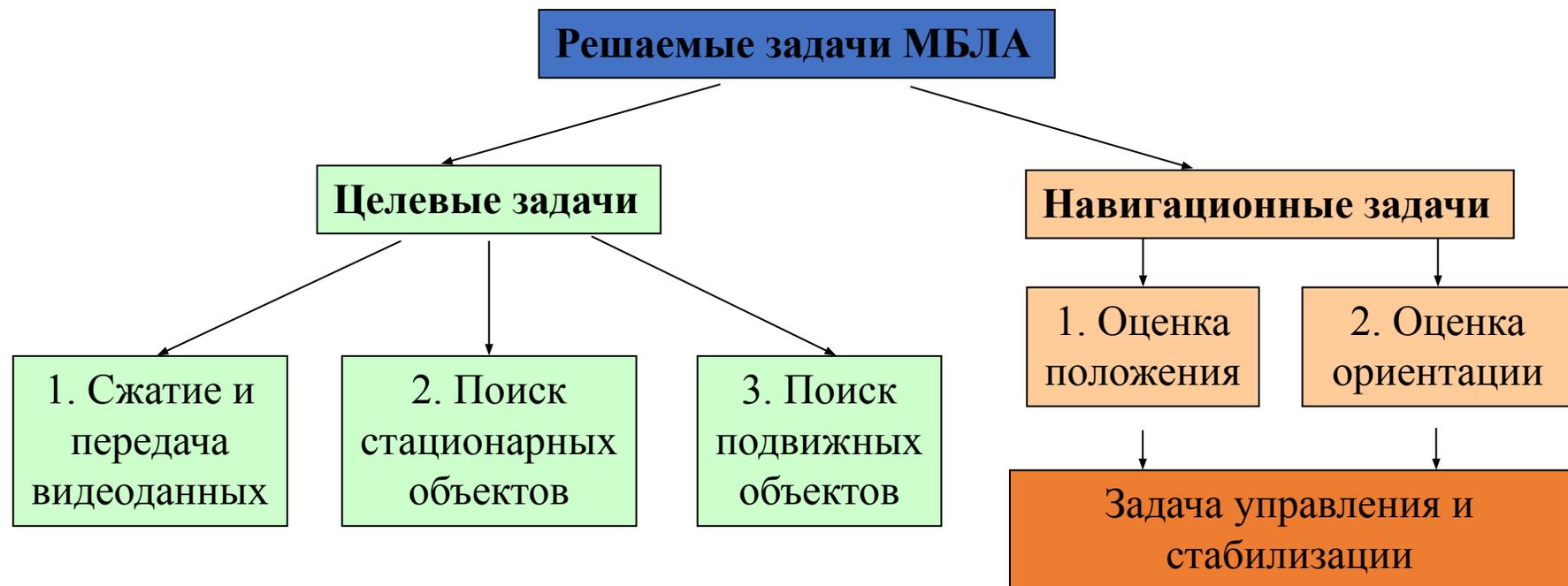
- Определить требования к ЦСАУ, обеспечивающие решение целевых задач
- Провести анализ алгоритмов обработки изображений для решения целевых и навигационных задач
- Сформировать структуру комплексного алгоритма обработки изображений (КАОИ)
- Провести исследования точности работы СН при решении навигационных задач

## Содержание работы:

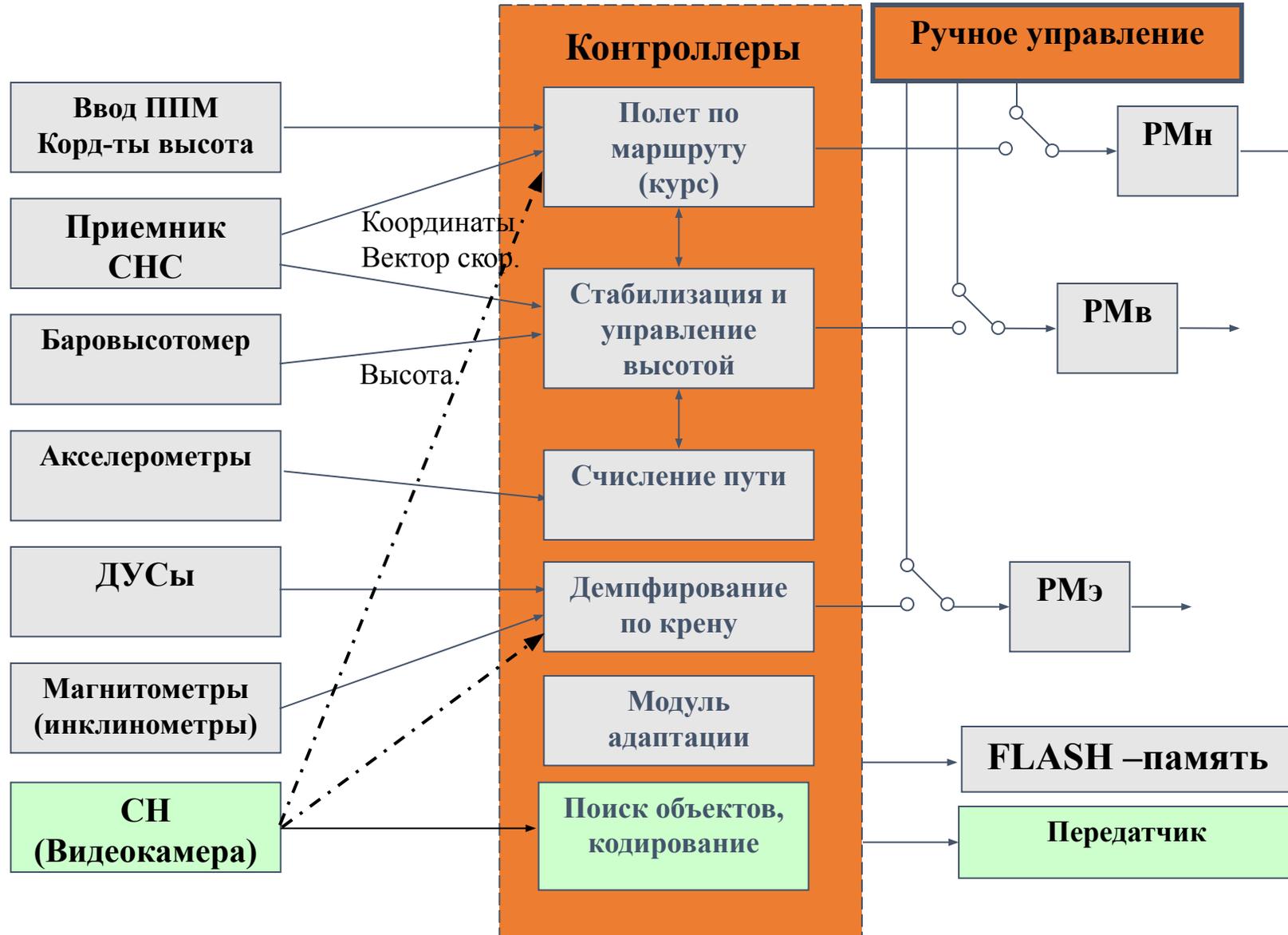
Введение

1. Автоматизация задач, решаемых беспилотным летательным аппаратом
2. Анализ алгоритмов решения целевых и навигационных задач
3. Структура комплексного алгоритма обработки изображений (КАОИ)
4. Исследование работоспособности КАОИ

Заключение



# ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЦСАУ



# ТРЕБОВАНИЯ К ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

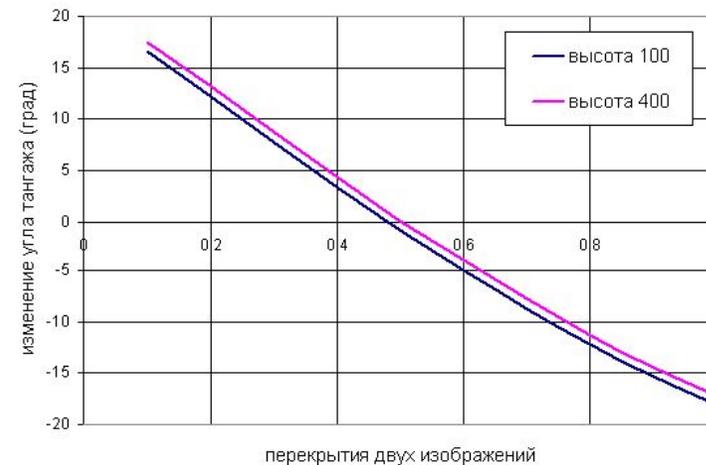
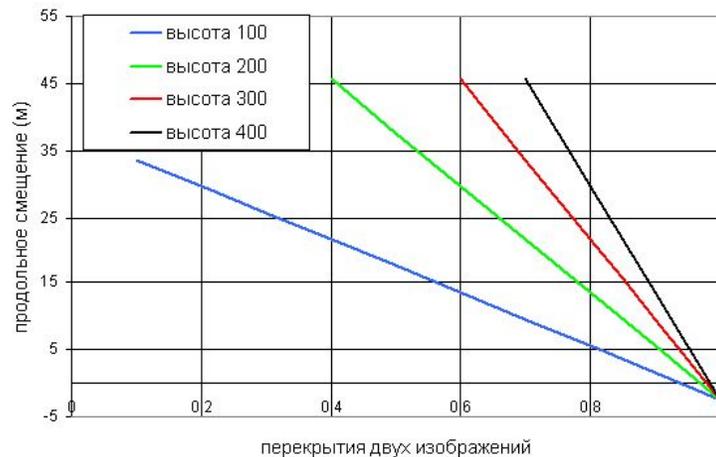
- Область наблюдения СН должна находиться в пределах заданного поля допуска;

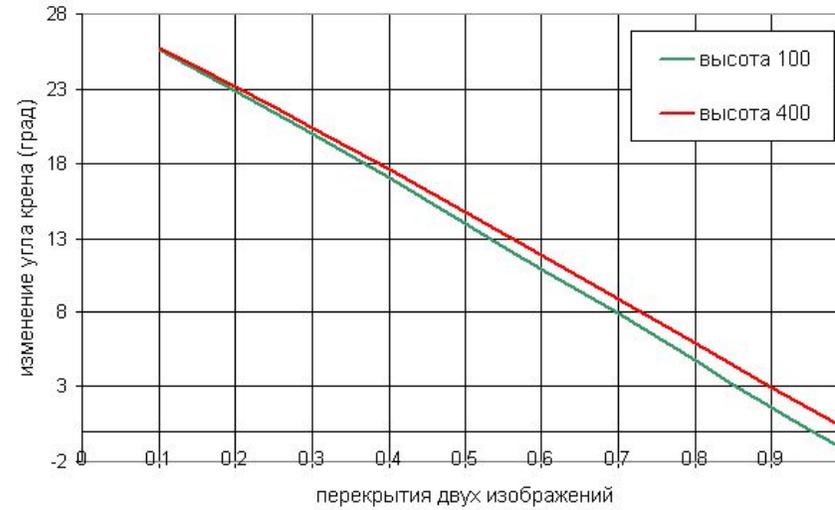
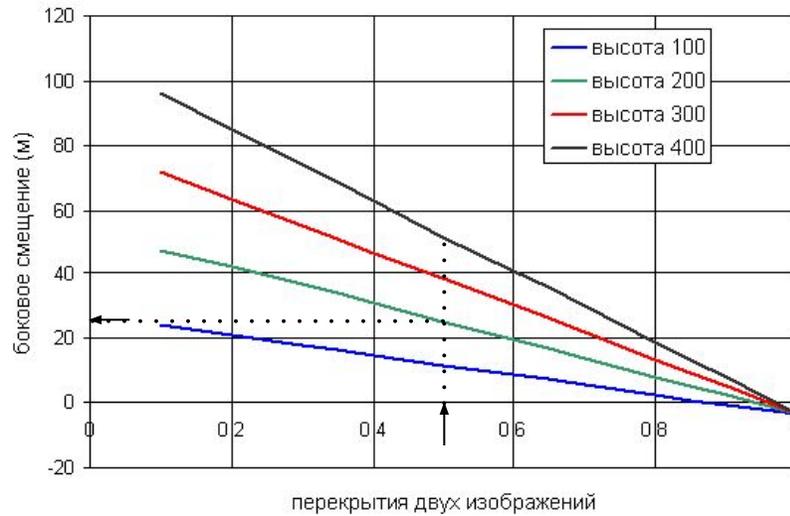
$$|\Delta_{q_{\max}}| \geq 3 \sigma_{q_{\max}} \quad (1)$$

- Межкадровые смещения изображений должны находиться в пределах заданного поля допуска.

$$|\Delta_{q_{\max f}}| \geq |V_{q_{\max f}}/f|, \quad (2)$$

где  $\sigma_{q_{\max}}$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) фактических измерений  $q$ -го параметра,  $\Delta_{q_{\max}}$  – допустимое значение ошибки оценки  $q$ -го параметра, определяемое из условий решения целевой задачи,  $\Delta_{q_{\max f}}$  – допустимое межкадровое смещение  $q$ -го параметра,  $V_{q_{\max f}}$  – скорость изменения  $q$ -го параметра,  $f$  – частота кадров.

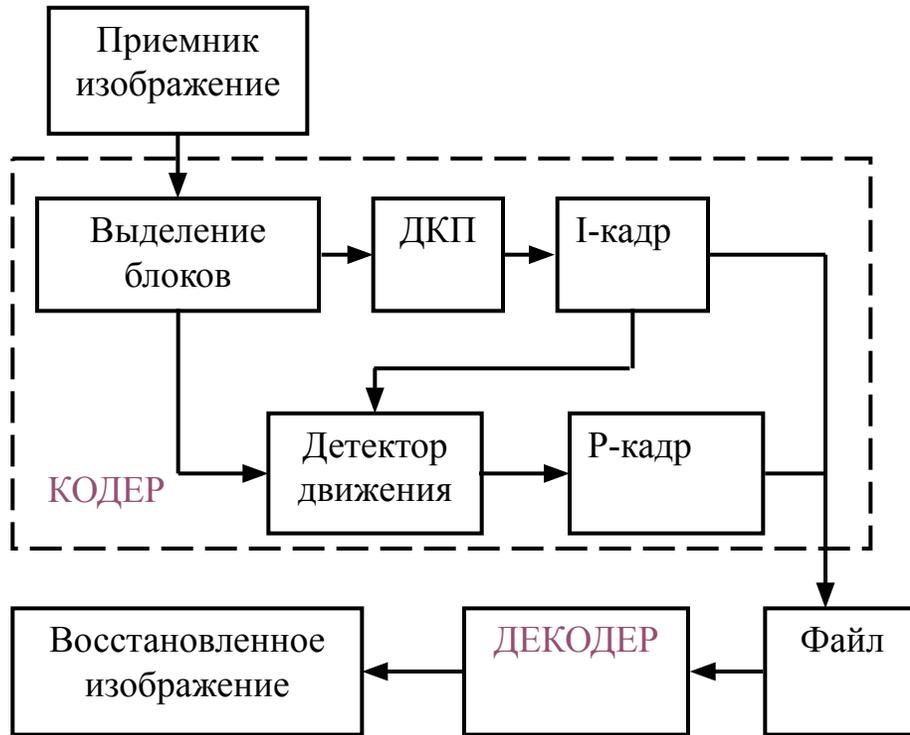




Размер изображения 500x500 пикселей, угол обзора камеры 60 град.  
 $V_{ЛА} = 25$  м/с,  $f = 10$  кадров/сек, взаимное перекрытие не менее 0,4

Высота (м)	Предельная допустимая точность по положению (м)		Предельная допустимая точность по ориентации (град)	
	Боковая	Продольная	Крен	Тангаж
100	±33,62	±66,78	±34,34	±13,57
400	±137,56	±274,63	±34,65	±14,45

# Целевая задача 1: Сжатие и передача видеопоследовательности



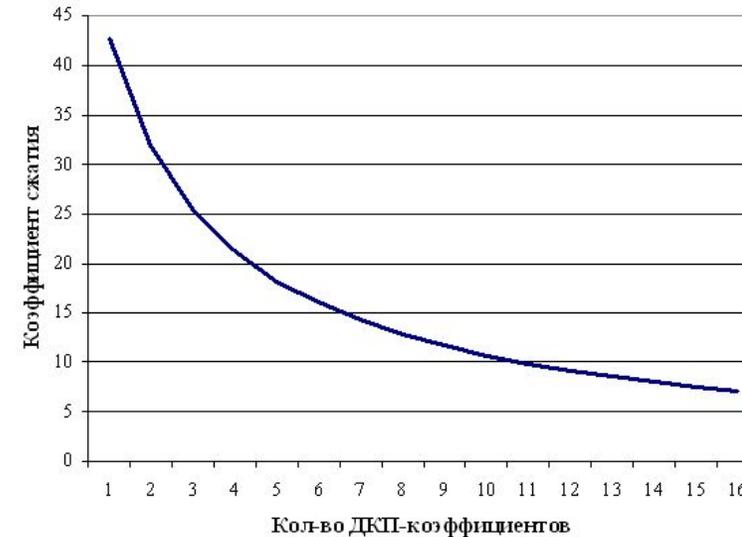
Коэффициент сжатия

$$K(s) = V_0 / V_s \quad (5)$$

$V_0$  - размер исходных данных [байт]

$V_s$  - размер сжатых данных [байт]

$S$  - кол-во ДКП-коэффициентов

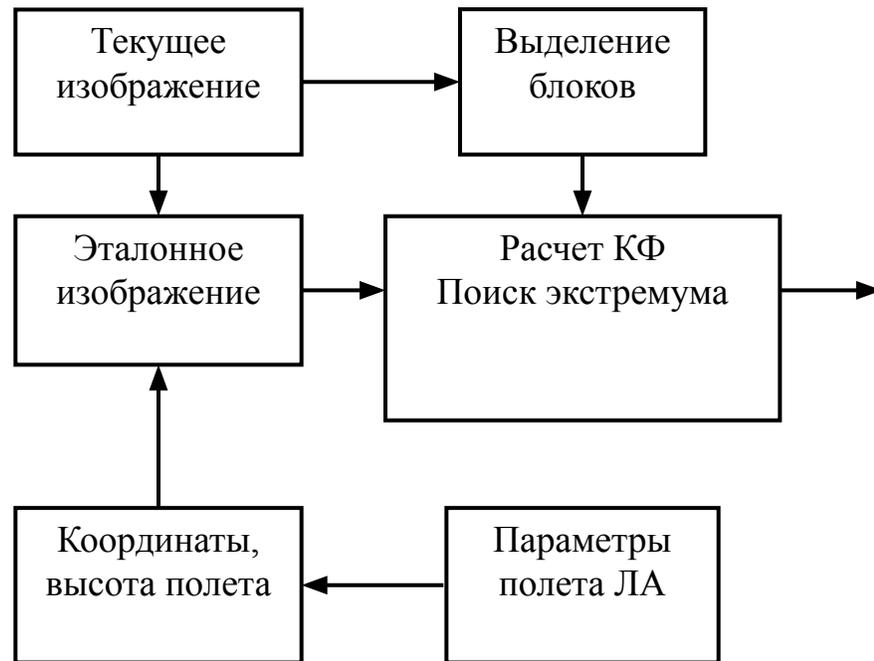


$$F(u, v) = C(u, v) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} B(i, j) \cos \left[ \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \right] \cos \left[ \frac{(2j+1)v\pi}{2N} \right] \quad (3)$$

$$B(i, j) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} C(u, v) F(u, v) \cos \left[ \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \right] \cos \left[ \frac{(2j+1)v\pi}{2N} \right] \quad (4)$$

## Целевые задачи 2, 3: Поиск объектов

### Навигационная задача 1: Оценка положения МБЛА



#### Функция среднего модуля разности

$$K(d_i, d_j) = M\{|CI(i, j) - RI(i + d_i, j + d_j)|\} \quad (6)$$

$M\{.\}$  – математическое ожидание

$CI$  – текущее изображение

$RI$  – эталонное изображение

$d_i, d_j$  – координаты блока изображения

#### Дестабилизирующие факторы:

- геометрические искажения;
- различные условия освещенности;
- влияние шумов;
- загораживание («затенение») объектов;

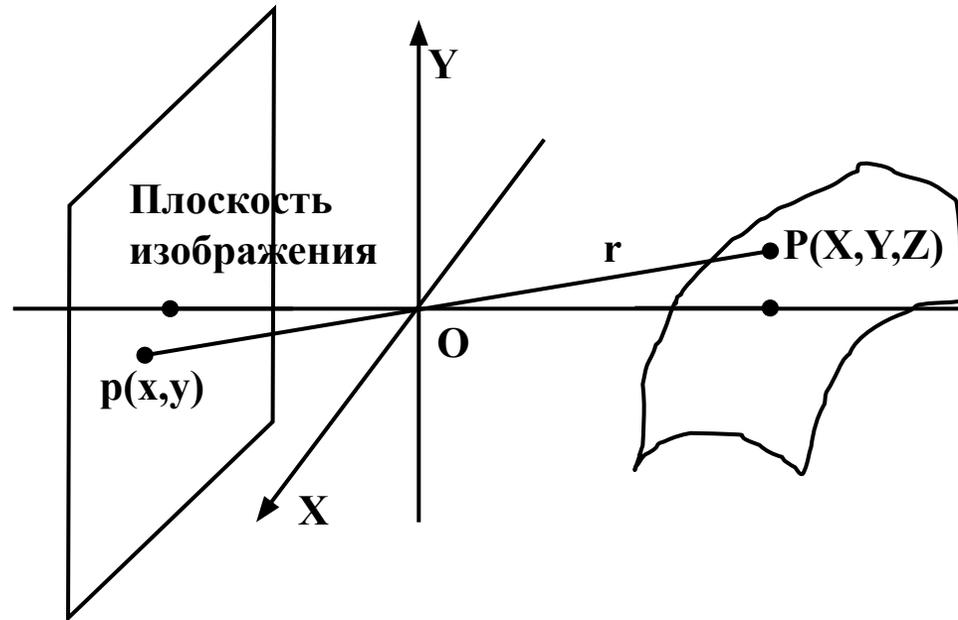
## Навигационная задача 2: Оценка ориентации МБЛА

$$\mathbf{V} = -\mathbf{t} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$$

$\mathbf{t} = (U, V, W)^T$  – мгновенное  
поступательное движение,  
 $\boldsymbol{\omega} = (A, B, C)^T$  – мгновенное  
вращение,

$$x = X/Z, \quad y = Y/Z$$

$(u, v)$  – оптический поток  
в точке  $p(x, y)$

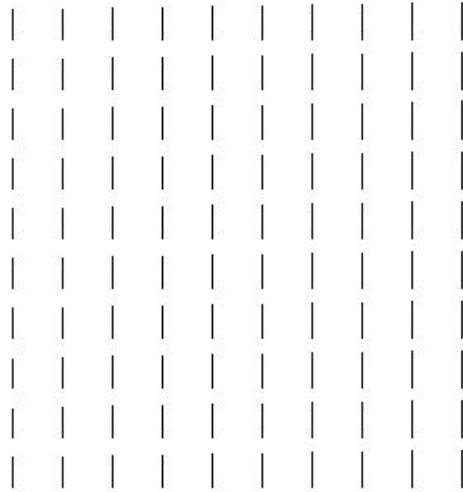


$$\mathbf{u} = \frac{\dot{X}}{Z} - \frac{X\dot{Z}}{Z^2} = \left( -\frac{U}{Z} - B + Cy \right) - x \left( -\frac{W}{Z} - Ay + Bx \right) \quad (7)$$

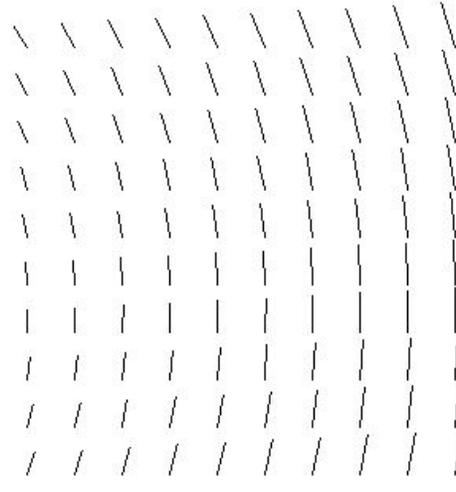
$$\mathbf{v} = \frac{\dot{Y}}{Z} - \frac{Y\dot{Z}}{Z^2} = \left( -\frac{V}{Z} - Cx + A \right) - y \left( -\frac{W}{Z} - Ay + Bx \right) \quad (8)$$

# Поле движения

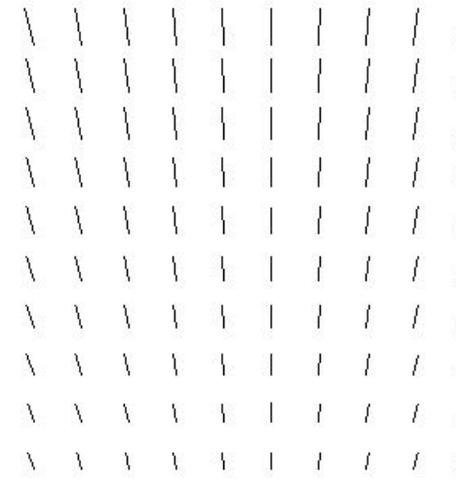
**Крен**  
( $\gamma > 0, \vartheta = 0, v = 0$ )



**Рыскание**  
( $\gamma = 0, \vartheta > 0, v = 0$ )



**Тангаж**  
( $\gamma = 0, \vartheta = 0, v > 0$ )



$$\gamma = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (s_{i1} \cos(\alpha_{i1}) - s_{im} \cos(\alpha_{im})) H k_{\gamma 1} / dv - H k_{\gamma 2} \omega_{\psi} / dv \quad (9)$$

$$\vartheta = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (s_{1j} - s_{lj}) H k_{\vartheta} / dv \quad (10)$$

$\gamma, \vartheta$  - угол крена и тангажа,  $l \times m$  - размер поля движения,

$S_{ij}$  - величина оптического потока,  $\alpha_{ij}$  - направление оптического потока,

$H$  - высота полета,  $dv$  - перемещение МБЛА между кадрами,

$\omega_{\psi}$  - изменение угла рыскания,  $k_{\gamma 1}$   $k_{\gamma 2}$   $k_{\vartheta}$  - коэффициенты.

# АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ И ЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ

№ п.п.	Решаемая задача	Частные алгоритмы	Тип обработки	Изображения
1	Сжатие изображений	RLE КХ МС ЦК ДКП WT	пиксельный пиксельный блочный пиксельный блочный пиксельный	ТИ <sub>n</sub> ТИ <sub>n</sub> ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub> ТИ <sub>n</sub> ТИ <sub>n</sub> ТИ <sub>n</sub>
2	Поиск стационарных объектов	MAD ККА	блочный (пиксельный) блочный (пиксельный)	ТИ, ЭИ ТИ, ЭИ
3	Поиск подвижных объектов	MAD ККА	блочный блочный	ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub> ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub>
4	Оценка координат МБЛА	MAD ККА	блочный (пиксельный) блочный (пиксельный)	ТИ, ЭИ ТИ, ЭИ
5	Оценка углов	MAD ККА	блочный блочный	ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub> ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub>

RLE - Кодирование с переменной длиной кодовой последовательности или строки; КХ - Кодирование Хаффмана ; МС - Межкадровое сжатие с использованием алгоритма Motion Compensation; ЦК - Цепной код; ДКП - Дискретное косинусное преобразование; WT - Вейвлет-преобразования; ККА – Классический корреляционный алгоритм; MAD -

## ЧАСТНЫЕ АЛГОРИТМЫ КАОИ

№ п/п	Задача	Частные алгоритмы	Изобра- жения	Тип обработки
1	Сжатие изображения	МС ДКП	ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub> ТИ <sub>n</sub>	блочный
2	Поиск стационарных объектов	MAD	ТИ, ЭИ	блочный
3	Поиск подвижных объектов	MAD	ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub>	блочный
4	Оценка координат МБЛА	MAD	ТИ, ЭИ	блочный
5	Оценка ориентации МБЛА	MAD	ТИ <sub>n</sub> , ТИ <sub>n-1</sub>	блочный

MAD – алгоритм среднего модуля разности

МС – алгоритм Motion Compensation

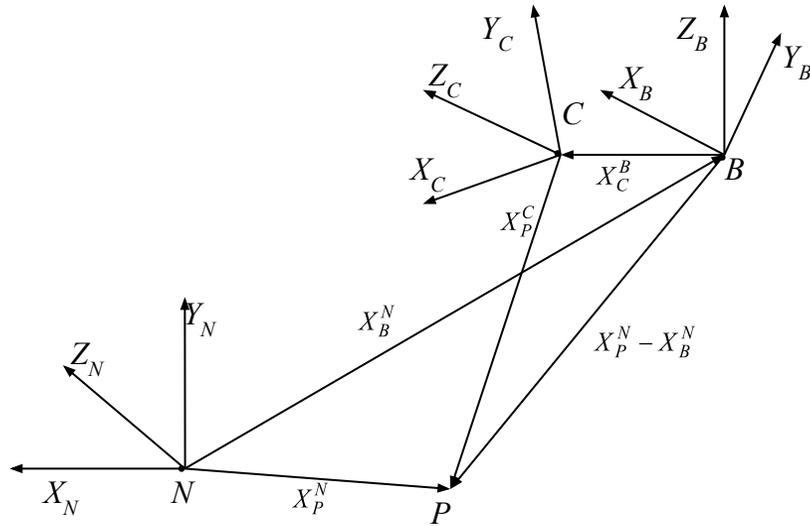
ДКП – дискретно-косинусное преобразование

# КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ



ТИ – текущее изображение, ЭИ – эталонное изображение, РЭИ – рабочее эталонное изображение, ДКП – дискретно-косинусное преобразование, СУ – система управления.

## Влияние ошибки совмещения эталонного и текущего изображений на оценку положения и ориентацию МБЛА



$$\mathbf{x}_P^C = \mathbf{C}_B^C \mathbf{C}_N^B (\mathbf{x}_P^N - \mathbf{x}_B^N) - \mathbf{C}_B^C \mathbf{x}_C^B \quad (11)$$

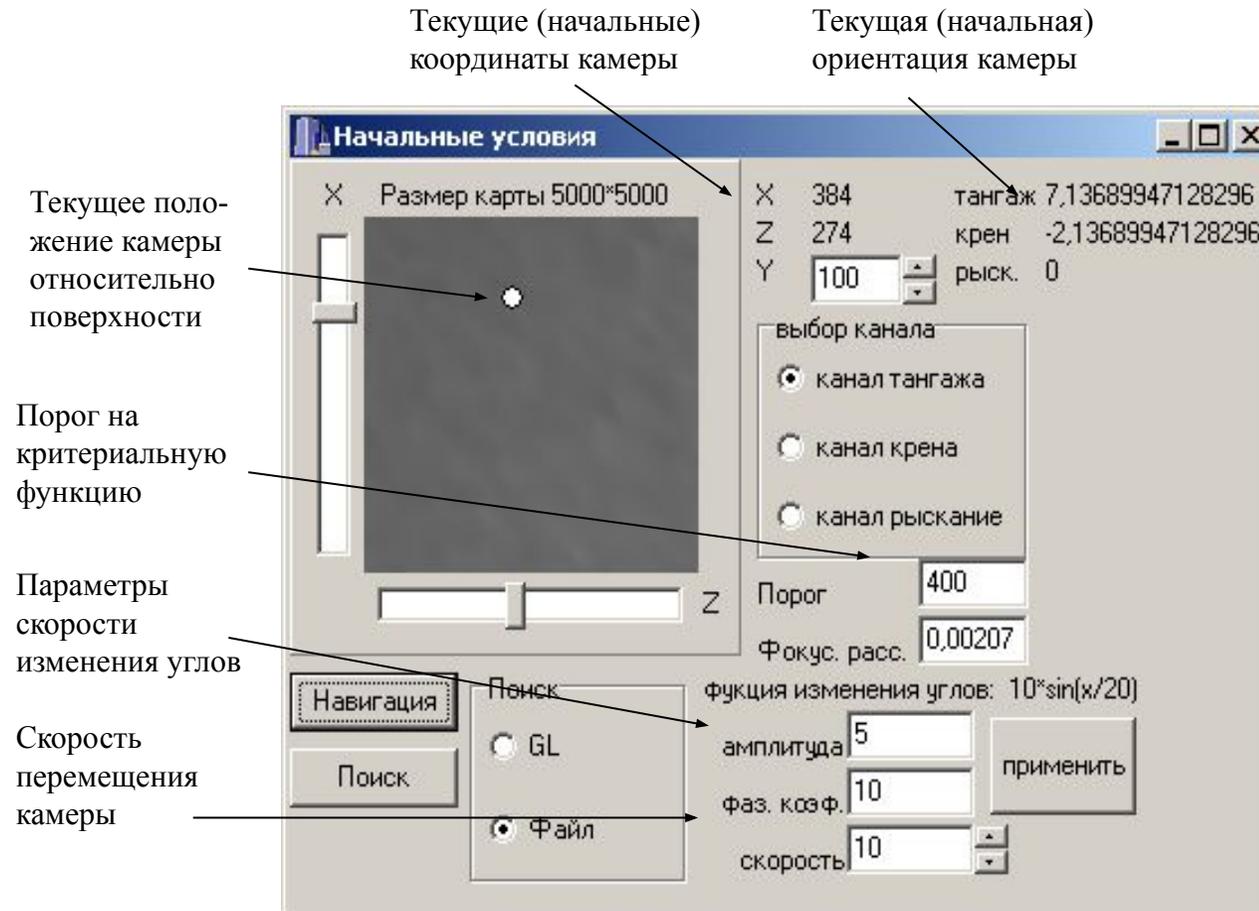
$\mathbf{x}_P^C$  – координаты наблюдаемого элемента поверхности Земли в системе координат бортовой аппаратуры;  
 $\mathbf{C}_B^C$  – постоянная матрица перехода из связанной в систему координат бортовой аппаратуры;  
 $\mathbf{C}_N^B$  – матрица перехода из системы координат бортовой аппаратуры в неподвижную систему координат.

Максимальная ошибка совмещения ЭИ и ТИ - 1 пиксель; угол обзора камеры - 60 град.; размер ПЗС-матрицы - 500\*500 пикселей.

$$u_P = -f \cdot \frac{y_P^C}{x_P^C} + u_C; \quad v_P = -f \cdot \frac{z_P^C}{x_P^C} + v_C; \quad (12)$$

Высота, м	Максимальная ошибка по положению, м	Максимальная ошибка по высоте, м	Максимальная ошибка ориентации, град
100	±0,54	±1,07	±0,24
400	±2,16	±16,6	±0,29

# Интерфейс ПМО «Test-1»



# Исходные данные для моделирования процесса оценки углов ориентации МБЛА с помощью ПМО «Test-1»

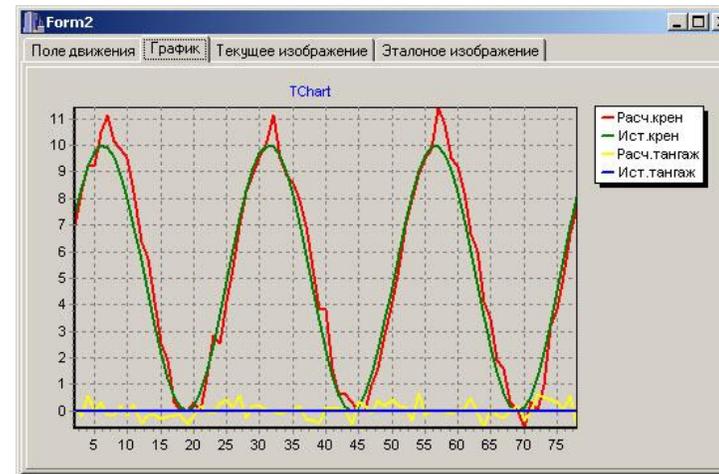
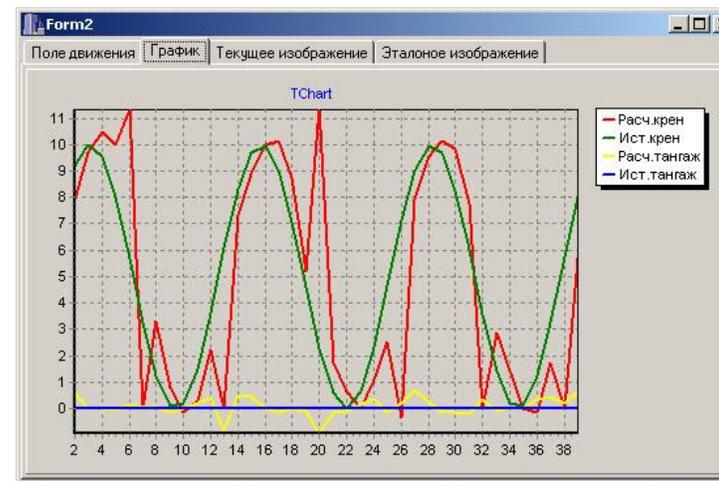
- угол обзора камеры 60 град.;
- $\delta=90$  град. (угол визирования)
- размер ПЗС-матрицы 500×500 пикс.;
- скорость полета 25 м/с;
- частота обработки кадров 10 кадр/сек.

Амплитуда – 5 град;

Период:

1. 1,25 сек

2. 2,5 сек



## Результаты моделирования

Высота, м	Перепад высот, м	Канал крена		Канал тангажа	
		предельно допустимая ошибка	максимальная фактическая ошибка	предельно допустимая ошибка	максимальная фактическая ошибка
		град.		град.	
100	±5	±34.34	±1,30	±13.54	±2,10
	±15	±34.34	±7,54	±13.54	±6,07
	±25	±34.34	±13,91	±13.54	±10,13
	±35	±34.34	±20,54	±13.54	±14,34
	±45	±34.34	±27,53	±13.54	±18,79
400	±5	±34.65	±2,41	±14.45	±3,41
	±15	±34.65	±3,96	±14.45	±4,39
	±25	±34.65	±5,51	±14.45	±5,38
	±35	±34.65	±7,06	±14.45	±6,37
	±45	±34.65	±8,62	±14.45	±7,36

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены:

1. Методика определения требований к цифровой системе автоматического управления (ЦСАУ), обеспечивающая решение целевых задач;
2. Комплексный алгоритм обработки изображений (КАОИ), обеспечивающий совместное решение навигационных и целевых задач;
3. Алгоритм оценки ориентации МБЛА на основе обработки и анализа подстилающей поверхности;
4. Программно-математическое обеспечение, имитирующее работу СН, которое основано на математическом моделировании полета МБЛА;
5. Результаты моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного КАОИ для решения навигационных и целевых задач.

# Лк. 23, 24. Разработка двухканальной системы измерения положения лопастей вертолета

По материалам кандидатской диссертации Прохорова П.Д. Научный рук. Ким Н.В.

**Цель работы.** Повышение безопасности функционирования вертолетов за счет использования системы инструментального определения положения лопастей вертолета и оценки траектории их движения на различных режимах работы несущего винта вертолета.

## **Решаемые задачи**

1. Формирование облика системы измерения положения лопасти;
2. Создание макета измерительной системы;
3. Оценка работоспособности системы измерений на основе экспериментальных исследований.

## **Научная новизна**

1. Показано, что измерения положения и траектории движения лопасти вертолета могут быть реализованы с помощью двухканальной системы измерений, включающей подсистемы тензометрических и оптических измерений;
2. Определен облик системы измерений положения лопасти;
3. Разработана методика комплексирования тензометрических и оптических измерений;
4. Разработан комплексный алгоритм для оценки положения и траектории движения лопастей и их идентификации, основанный на комплексировании тензометрических и оптических измерений, и соответствующее программно-математическое обеспечение.

# Требования к системе измерения

Система измерения положения торца лопасти вертолета в направлении перпендикулярном плоскости вращения (в системе координат вертолета)

***должна обеспечивать:***

- точность (СКО)  $\sigma \leq \sigma_0 = 10 \text{ мм}$  ;
- диапазон измерений 0-360 угл. гр.;
- частоту измерений 200 1/с.

***при условиях:***

- частота вращения лопасти вертолета  $f \leq f_{\text{max}} = 600 \text{ /с}$  ;
- линейная скорости торца лопасти  $V \leq V_0 = 200 \text{ м/с}$ .

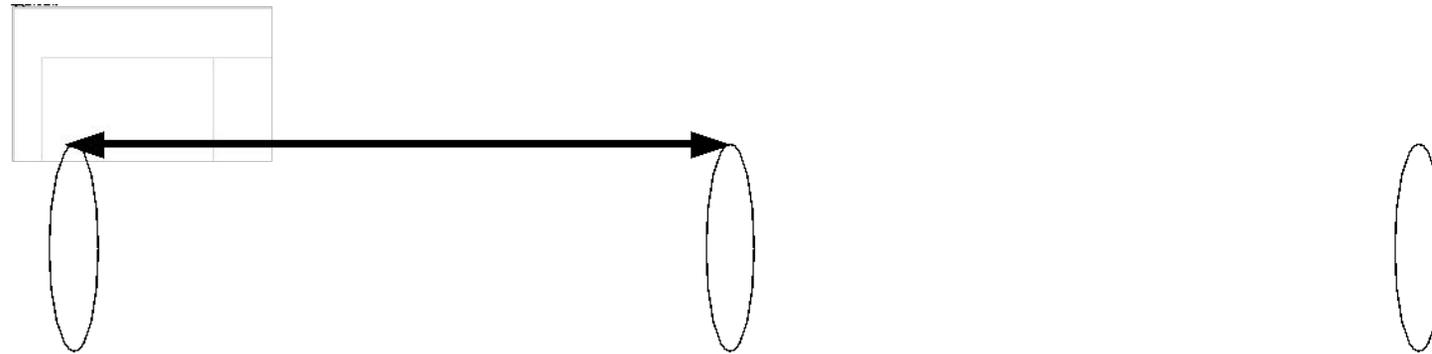
# Формирование облика системы измерения

## Сравнение методов

Датчики	Преимущества	Недостатки
Тензометрические	измерения на всем диапазоне вращения лопасти, простота установки и использования	непрямые измерения, температурная погрешность
Индуктивные	высокая точность, разрешение и время отклика	срабатывание только на металл и абсолютная нечувствительность к другим материалам, малый диапазон измерений
Ультразвуковые	не зависят от материала, поверхности, цвета, прозрачности и размера объекта, работоспособность в условиях пыли, грязи, тумана, яркого освещения	существенно зависят от состояния окружающей среды, а также могут искажаться за счет шумов
Радиолокационные	быстродействие	не гарантируют скрытность применения вертолета, сложность
Емкостные	высокая чувствительность, малые габариты и вес	высокие требования к экранировке деталей, малый диапазон измерений
Скоростные видеокамеры	прямые измерения, не требует расположения дополнительных элементов непосредственно на лопасти	требует реализации алгоритмов обработки изображений для получения измерений, измерения в узком секторе, ограниченном полем зрения камеры



# Схема получения комплексных измерений



# Методика комплексирования ТИ и ОИ

Измерения  $j$ -го тензодатчика,

$$d_j = \lambda_j + \varepsilon_j, \quad j = 1..m, \text{ где } m \text{ количество датчиков}$$

Измерения оптической системы

$$y_i = \eta_i + \zeta_i, \quad i = 1..n, n \geq m + 1$$

Модель линейного отклонения торца лопасти

$$\eta_i = x_0 + \sum_{j=1}^m x_j \cdot \lambda_{ij}$$

Критерий оптимальности оценок

$$F(x_0, x_j) = 0.5 \sum_{i=1}^n \left( \frac{(y_i - x_0 - \sum_{j=1}^m x_j \cdot d_{ij})^2}{1 + \sum_{j=1}^m x_j^2} \right) \longrightarrow \min$$

Линейные отклонения торца лопасти на траектории

$$y_k = x_0 + \sum_{j=1}^m x_j \cdot d_{kj}, \quad k = 1..l$$

$x_0, x_j$  – искомые коэффициенты

## Разработка тензометрического канала измерения (ТКИ)

- Разработка программно-аппаратной структуры ТКИ, обеспечивающей  $f_{изм} f_{с} = 200$  / в диапазоне 0-360 гр.
- Выбор типа тензометрических датчиков
- Выбор канала передачи измерений на вычислительный блок
- Оценка работоспособности ТКИ

# Схема тензометрического канала измерения

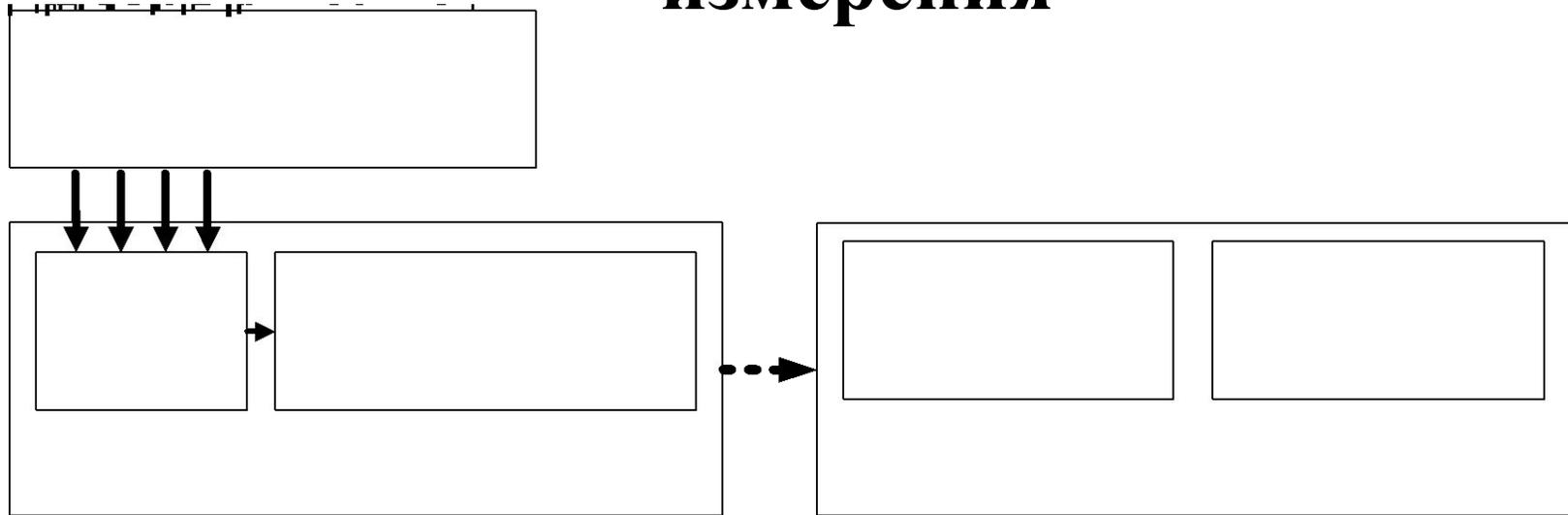
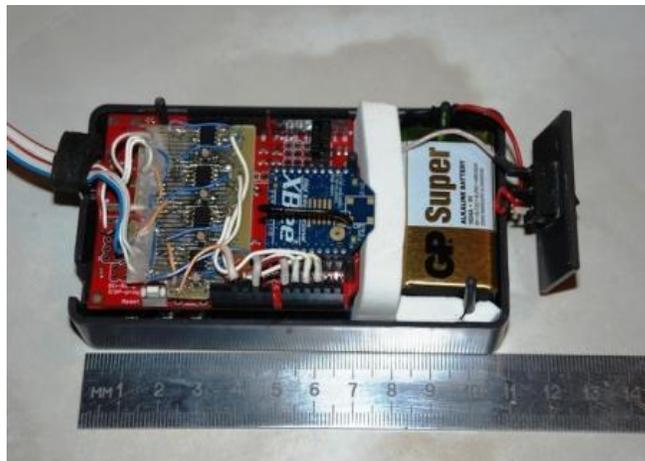


Схема тензометрического канала

## Выбор типа тензорезисторов

Типы тензорезисторов	Преимущества	Недостатки
Проволочные	стабильность показаний	малая площадь контакта
Фольговые	высокая чувствительность	температурная погрешность
Полупроводниковые	высокая чувствительность	нестабильность параметров

# Элементы макета тензометрического канала измерений



Тензометрическая станция



Установка тензостанции на втулке винта



Расположение тензодатчиков на лопасти

# Оценка работоспособности метода измерений деформации лопасти

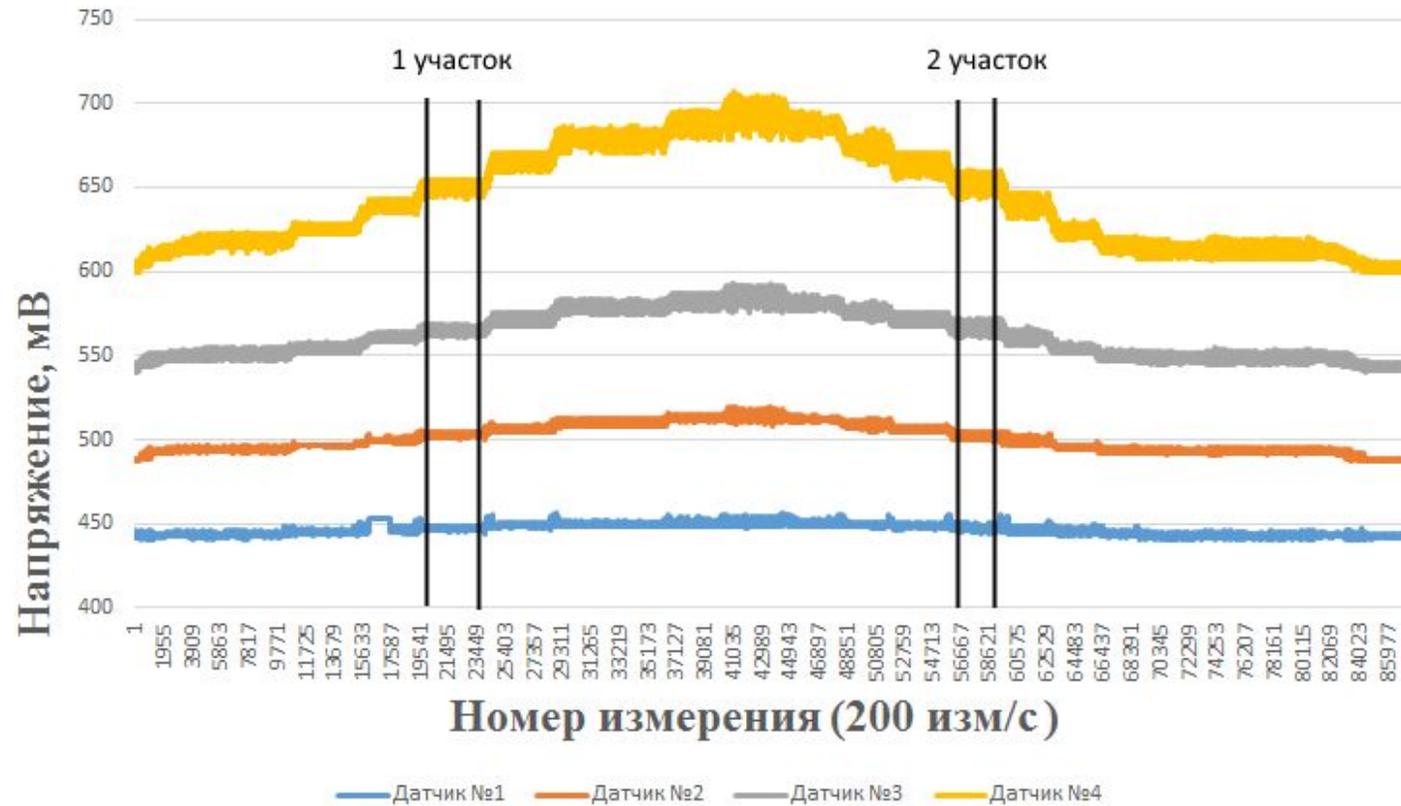


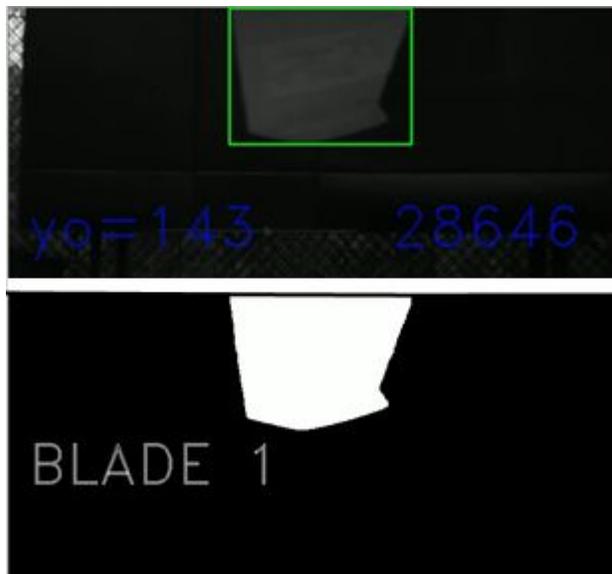
График измерений ТКИ

Номер участка	МО, мВ				СКО, мВ			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	датчик	датчик	датчик	датчик	датчик	датчик	датчик	датчик
1	447	503	564	650	0.67	0.85	1.99	2.66
2	447	502	566	650	0.92	1.23	2.71	4.02

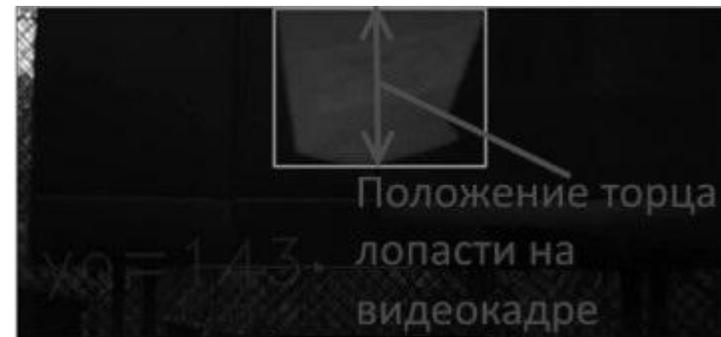
# Разработка оптического канала измерения (ОКИ)

- Разработка программно-аппаратного состава ОКИ, обеспечивающего точность оценки положения лопасти  $\sigma \leq \sigma_0 = 10 \text{ мм}$ , в диапазоне отклонений торца лопасти 150 мм,  $P_{по} \geq 0,95$
- Разработка комплексного алгоритма для оценки положения торца лопасти;
- Разработка программно-аппаратных средств идентификации лопастей;
- Оценка точности работы ОКИ.

# Комплексный алгоритм для оптического канала измерения

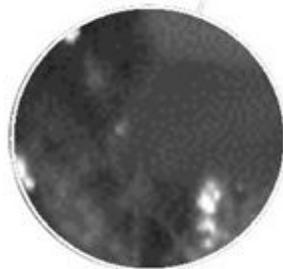
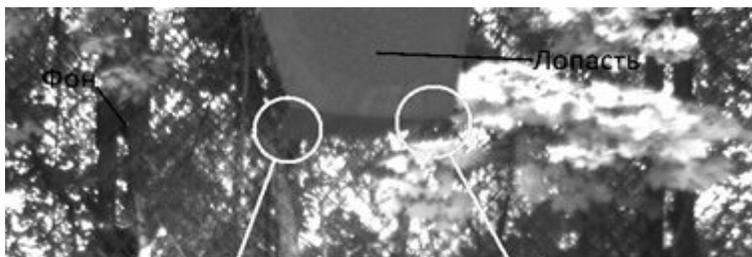


Обнаружение лопасти



Определение координат торца лопасти

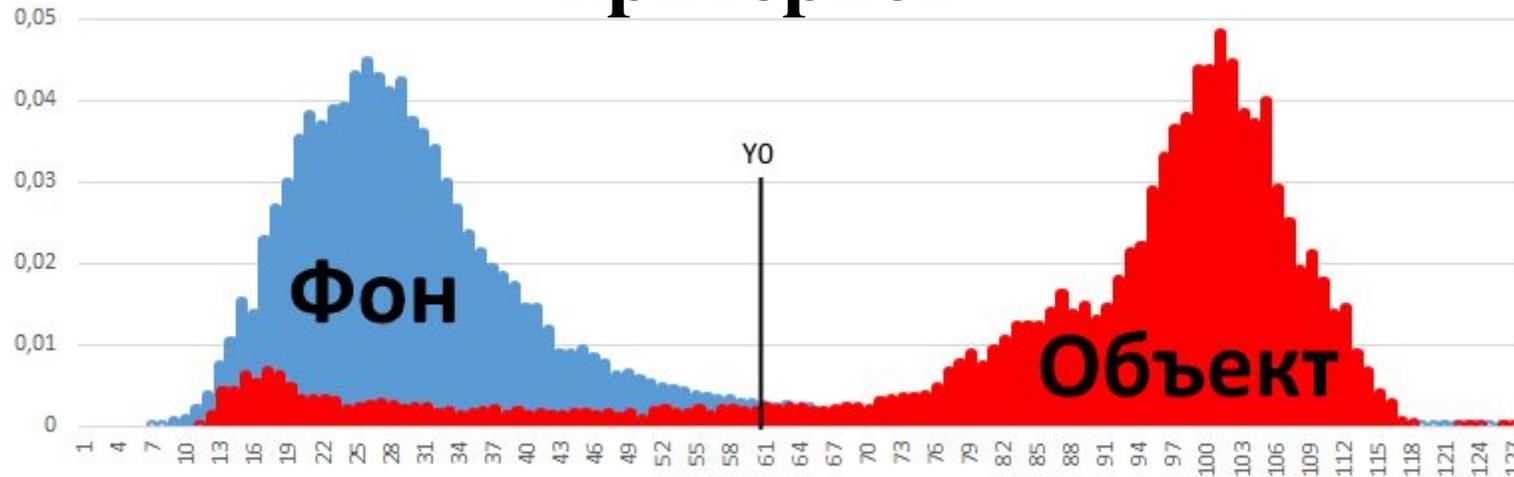
# Проблемы



Нечеткая граница лопасть - фон



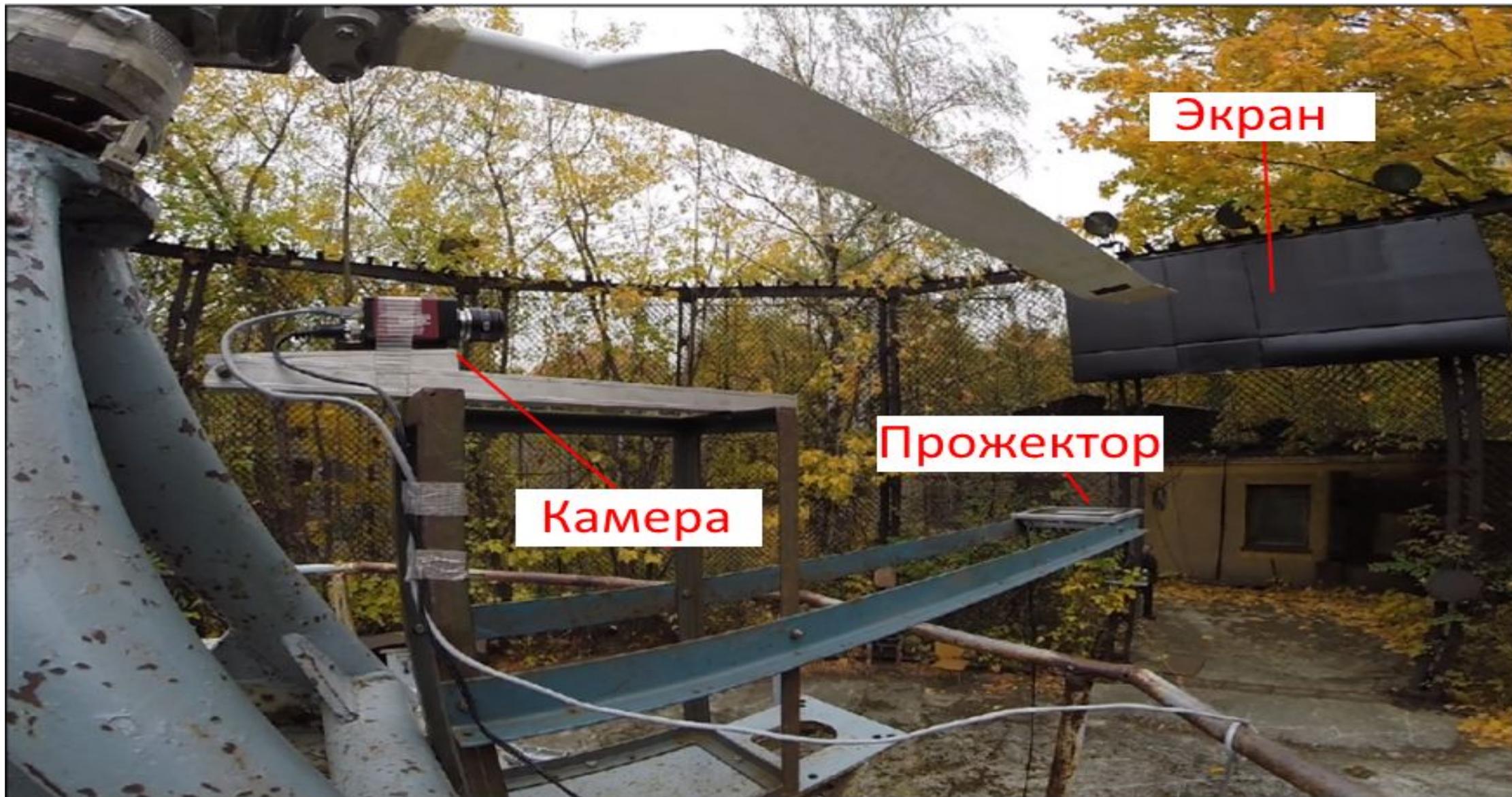
# Использование статистических критериев



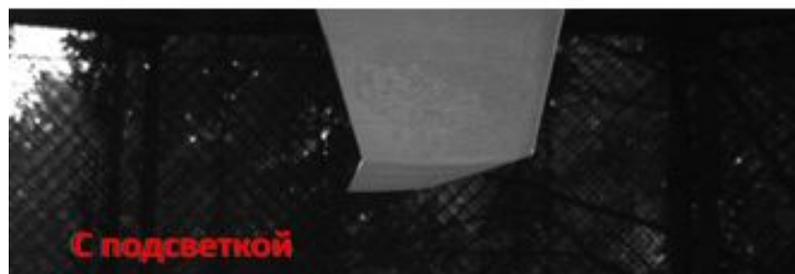
Нормированные гистограммы фона и объекта  
**Результат работы статистических критериев**

Вероятность	Критерий Байеса	Критерий Фишера
пропуск цели	0,131	0,164
ложная тревога	0,043	0,028
правильное обнаружение фона	0,956	0,971
правильное обнаружение объекта	0,868	0,835

# Улучшение условий наблюдения



# Результат улучшений условия наблюдения

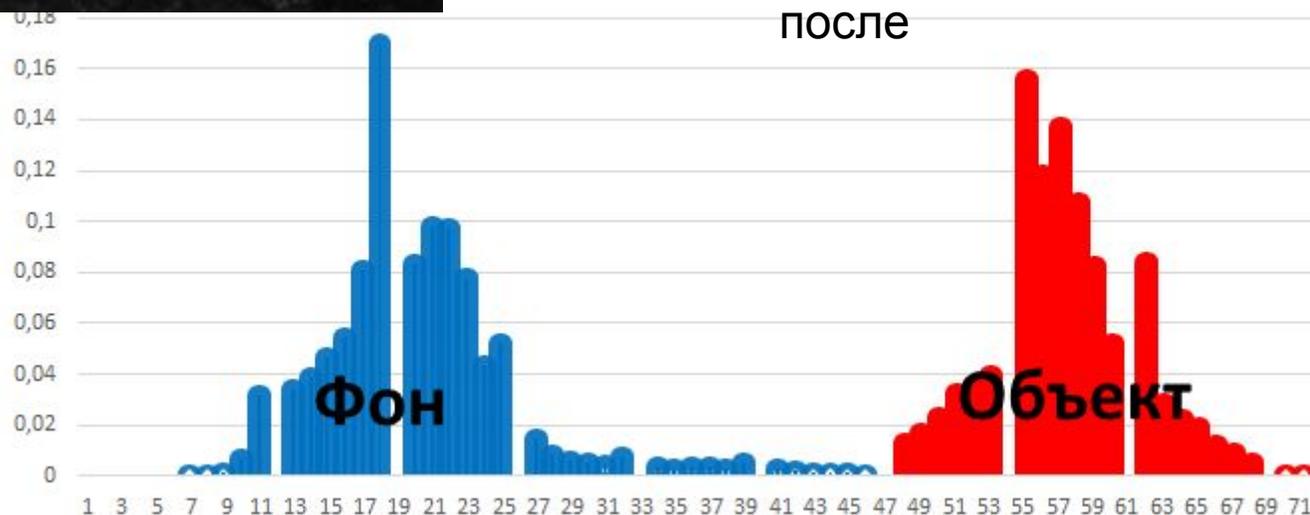


$$K = \frac{B_l - B_f}{B_l}$$

Формула вычисления

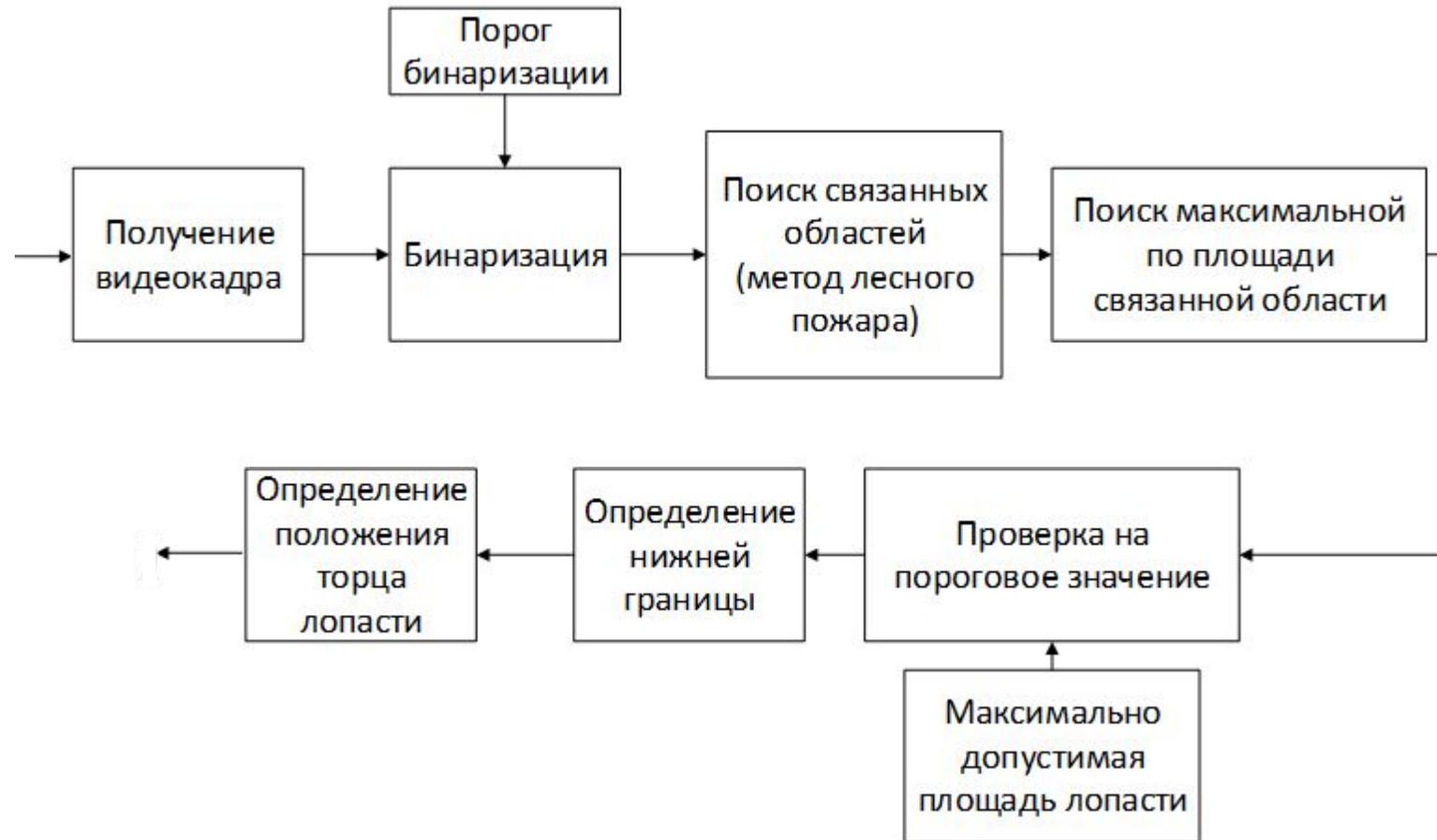
контраста	Значение контраста
Без использования подсветки	0,2
С использованием подсветки	0,8

Сравнение контраста до и после

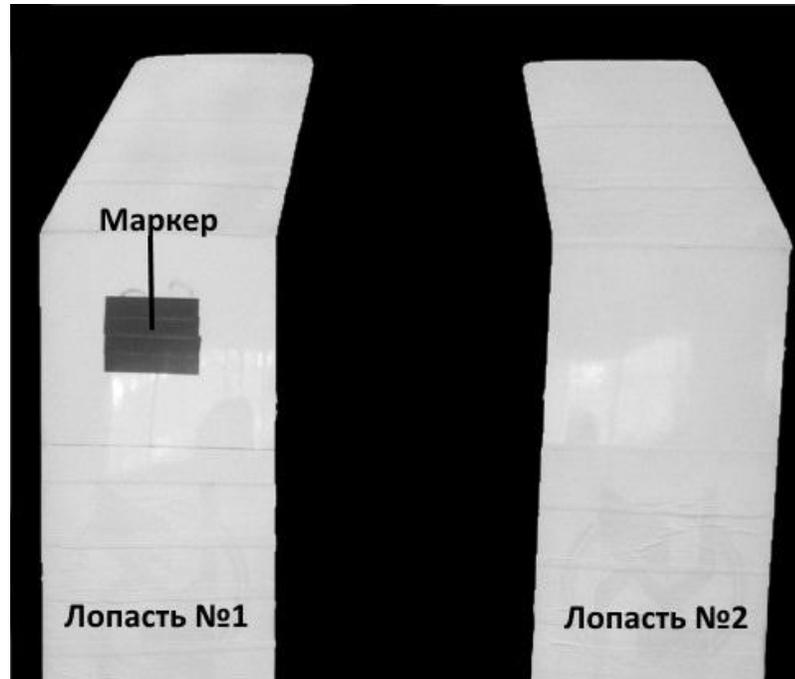


Нормированные гистограммы объекта и фона

# Алгоритм оценки положения торца лопасти



# Идентификация лопастей



Вариант маркировки лопастей



Распознавание лопасти



Распознавание лопасти №2

# Результаты измерений ОКИ

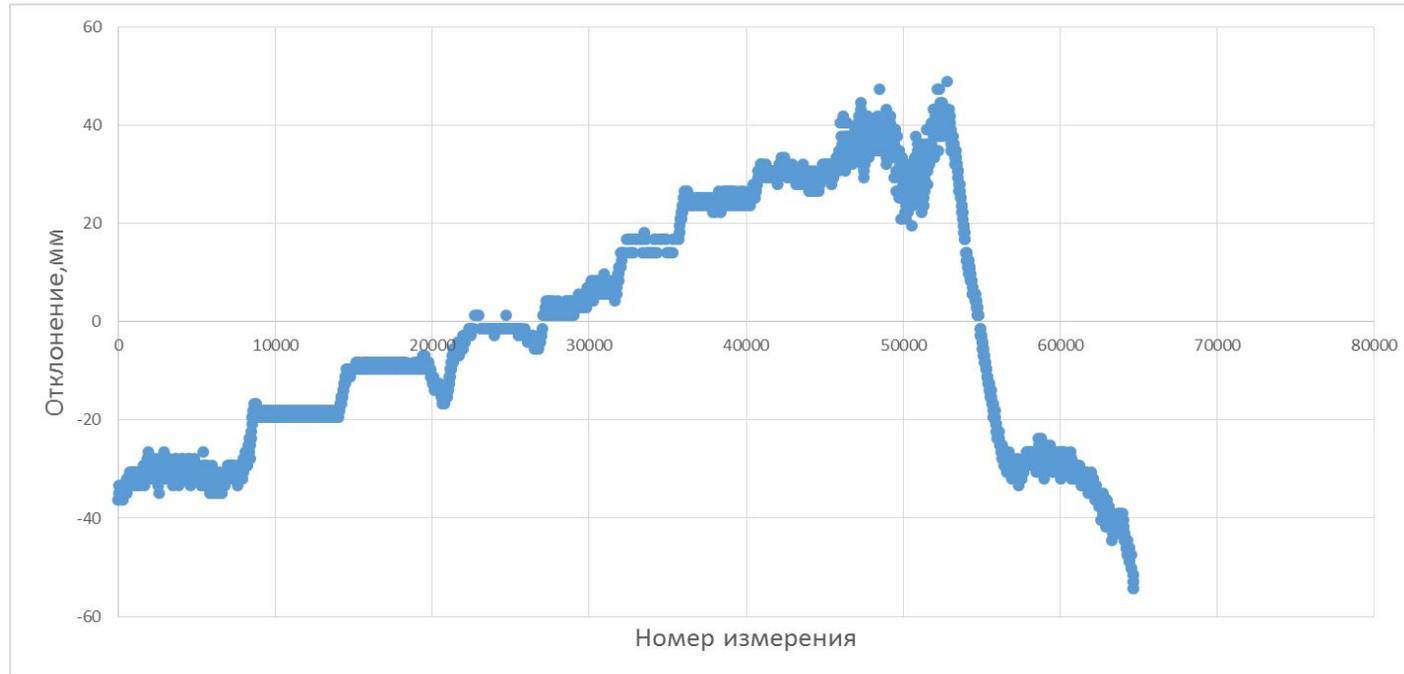


График измерения положения торца лопасти

Интервал измерений	Частота вращения, об/мин	Тяга, кг	Математическое ожидание положения торца лопасти, мм	Среднеквадратическое отклонение положения торца лопасти, мм
11000-16000	500	27	-18,6	0.68
17000-21000	500	50	-9,2	0.68
39000-42000	500	144	24,7	0.99

# Экспериментальные установки



Экспериментальная установка №1

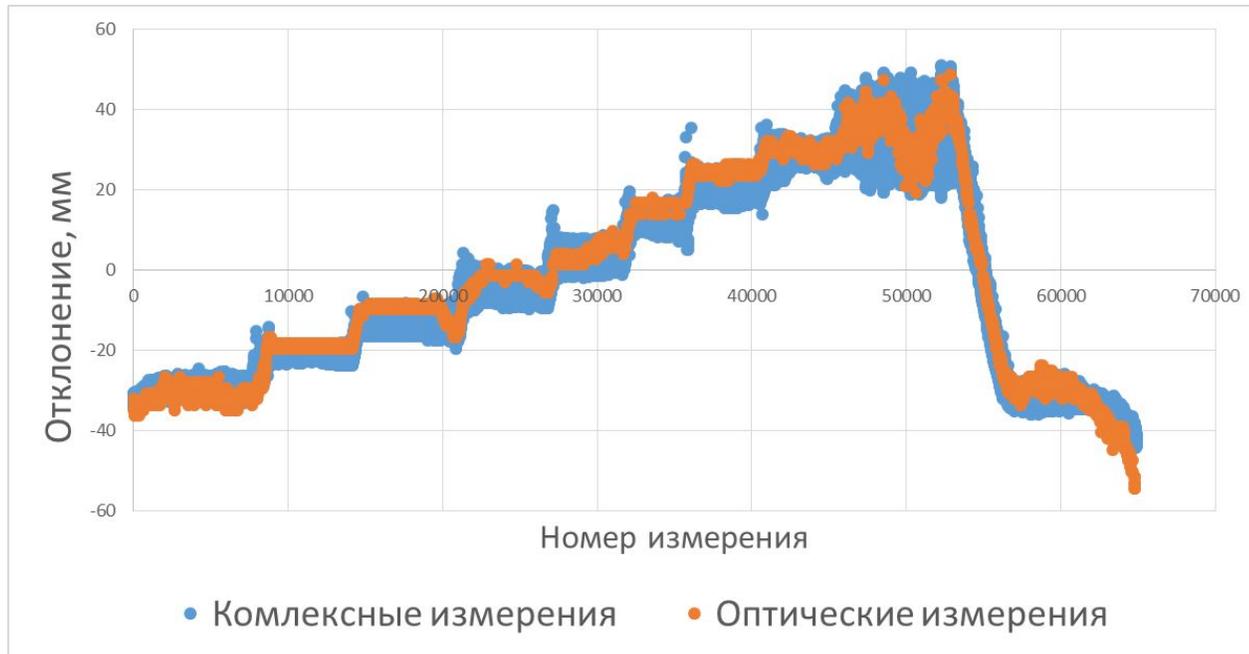


Экспериментальная установка №2



Экспериментальная установка №3

# Экспериментальные исследования



№	Тяга	МО, мм	СКО, мм
1	0	-28,9	1,4
2	27	-21,4	0,8
3	50	-13,0	0,8
4	72	-4,5	2,0
5	94	3,2	2,8
6	121	7,4	2,1
7	144	20,7	2,1
8	162	28,4	1,7

Различные режимы

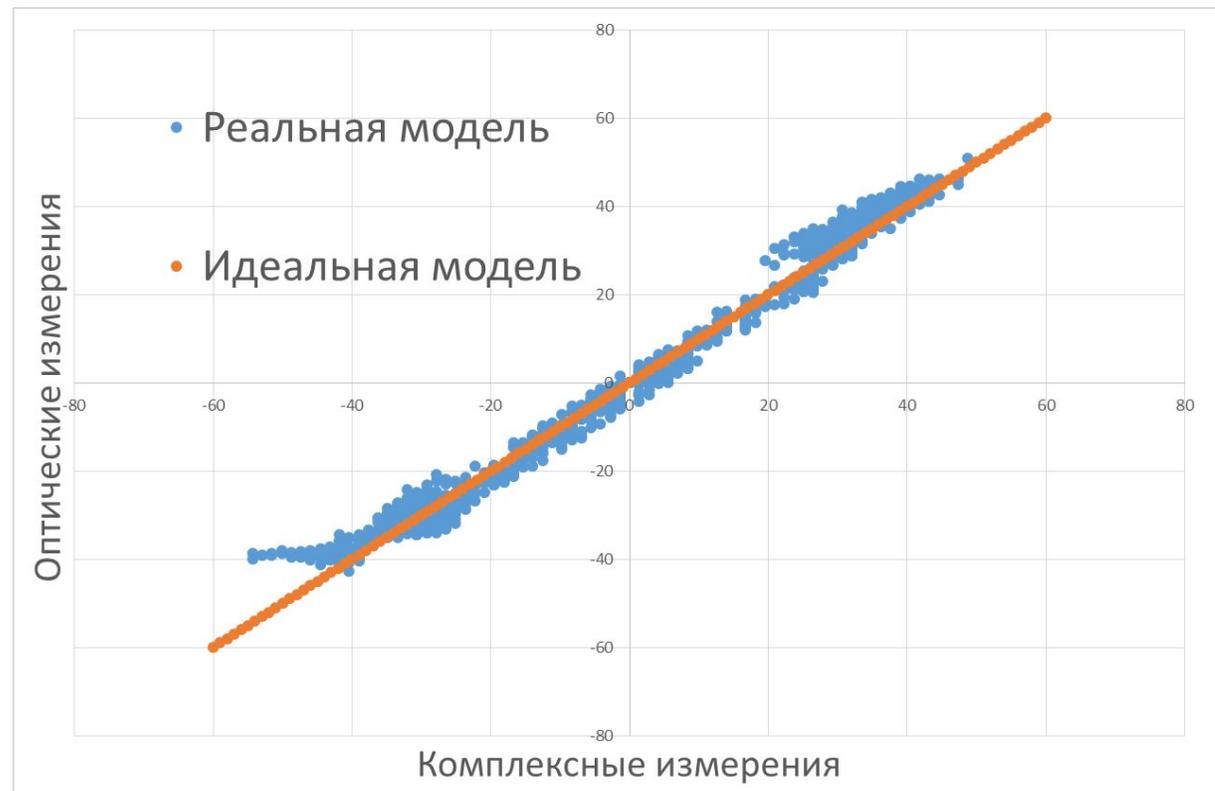
Математическое ожидание невязки ТИ и ОИ (2000 измерений)

$$\overline{m} = 0,13$$

среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = 4,28 \text{ мм}$$

# Адекватность модели



Реальные значения комплексных измерений качественно соответствуют оптическим измерениям (максимальное рассогласование порядка 12 мм)

Таким образом, предлагаемая модель во всем диапазоне отклонений торца лопасти близка к идеальной модели.

# Выводы

1. Показано, что измерения положения торца лопасти вертолета могут быть реализованы с помощью двухканальной системы измерений, включающей подсистемы тензометрических и оптических измерений;
2. Определены требования к системе измерений. Разработана методика и предложен алгоритм комплексирования оптических и тензометрических измерений;
3. Определены структура и программно-аппаратный состав двухканальной системы измерений;
4. Разработан демонстрационный макет двухканальной системы измерений, включающий тензометрическую и оптическую подсистемы измерений;
5. Разработан комплексный алгоритм и соответствующее программное обеспечение для измерения положения торца лопастей на основе технологии технического зрения;
6. Разработаны методы улучшения условий наблюдения для оптического канала измерений, включающие в себя улучшение текстуры фона и повышение контрастности лопасть-фон;
7. На основе анализа результатов экспериментальных исследований показано, что разработанная двухканальная система измерений положения лопасти вертолета является работоспособной и обеспечивает:
  - частоту измерений  $f = 200 \text{ 1/с}$  ;
  - измерения (в системе координат вертолета) на всем круговом диапазоне (0 – 360 гр.) положения лопасти;
  - среднеквадратическую ошибку измерений  $\sigma \leq 10 \text{ мм}$ .