



Интеллектуальные робототехнические системы

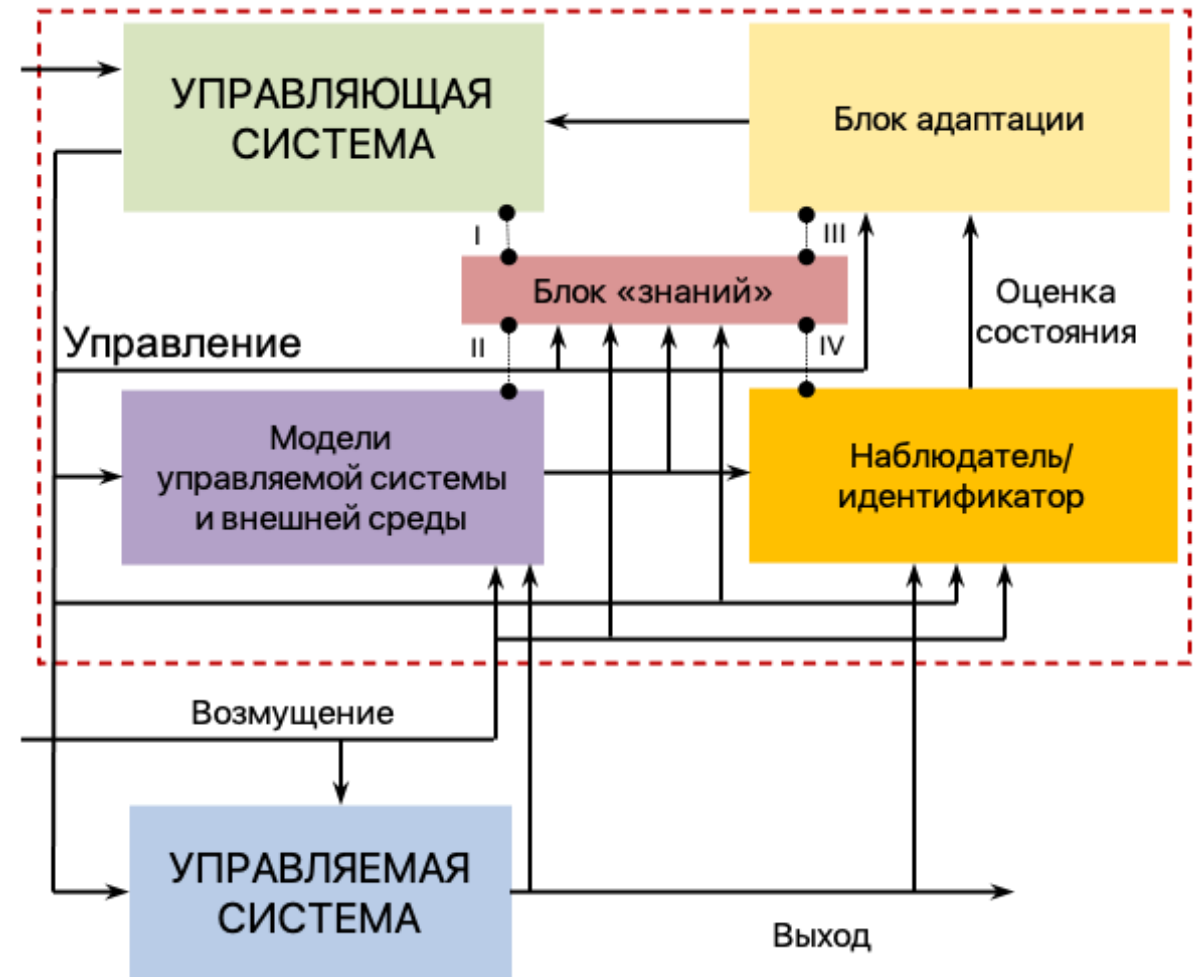
Мещеряков Р.В.

д.т.н., профессор

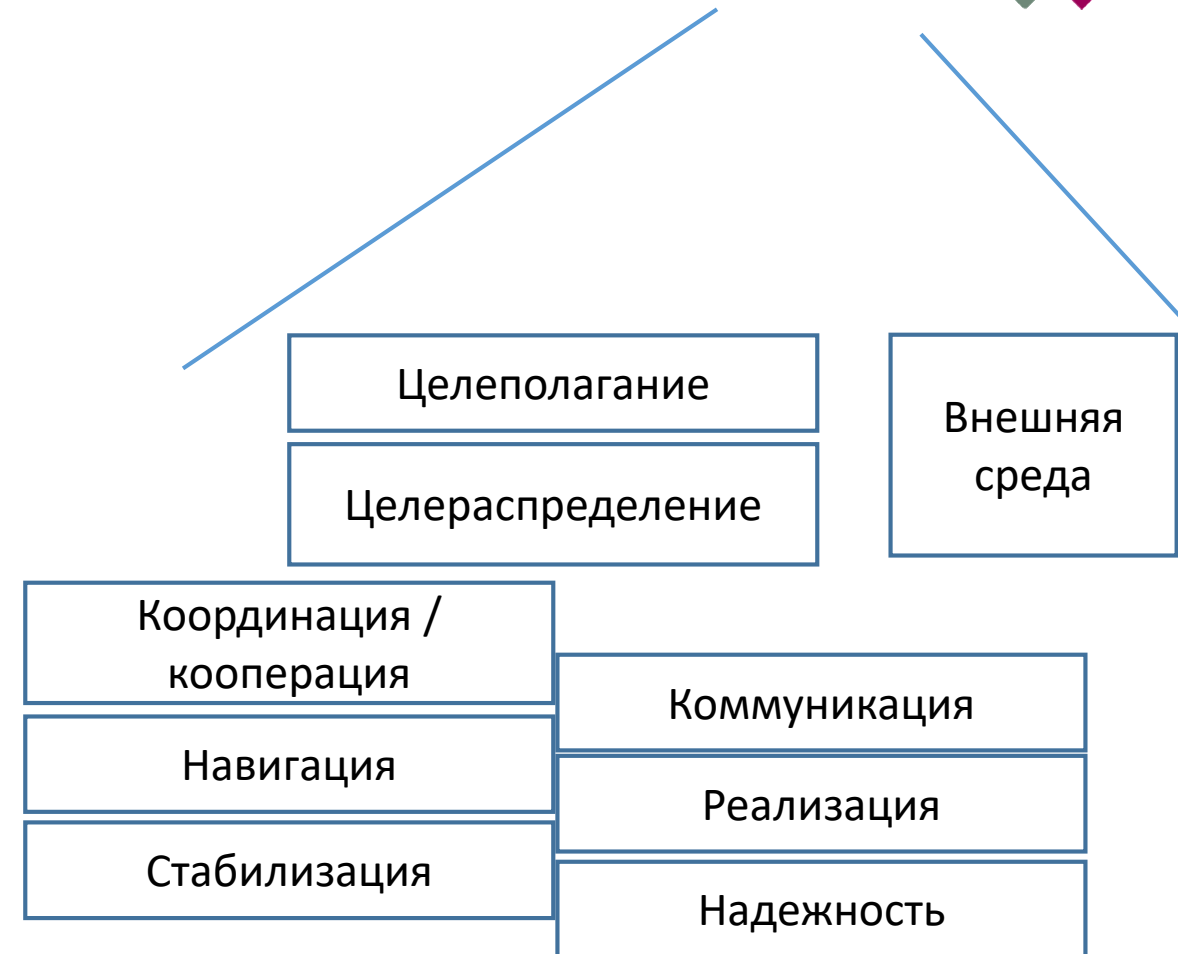
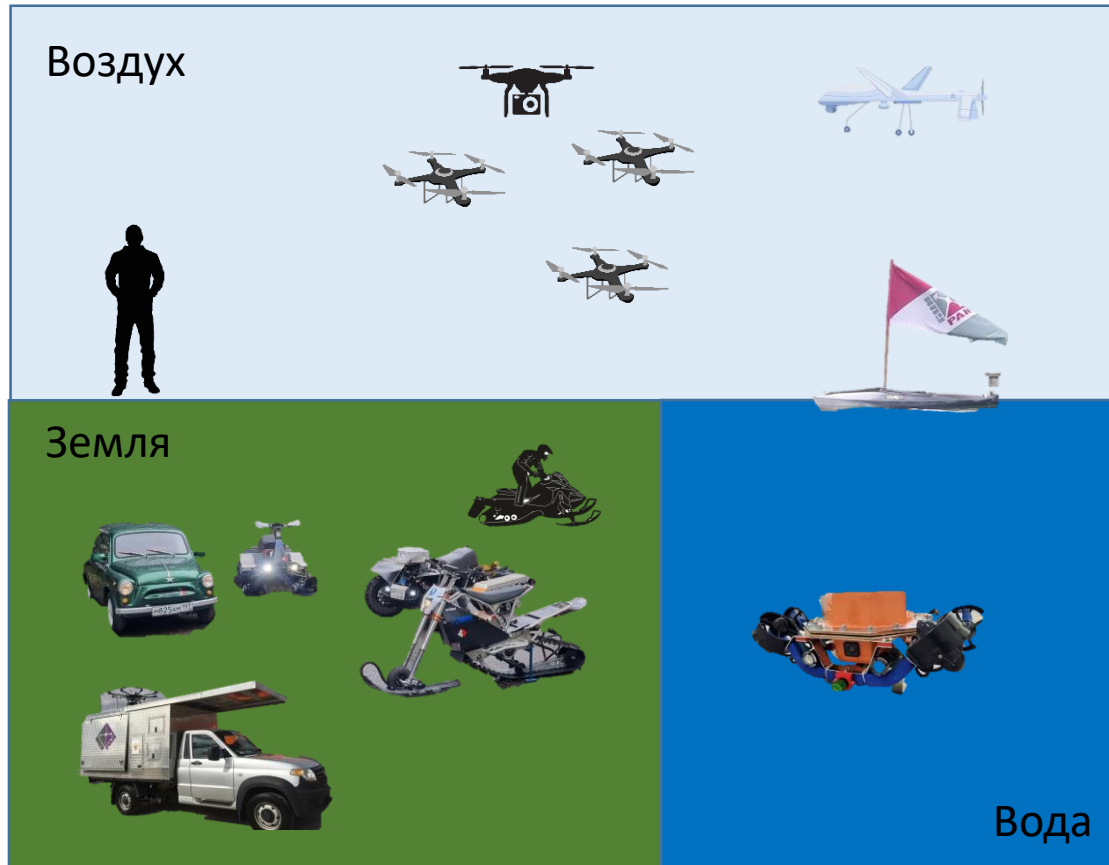
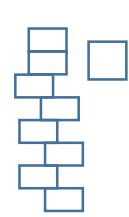
Директор центра интеллектуальных
робототехнических систем ИПУ РАН

17-20 июня 2024 г.

Модели и методы управления



Обобщенная схема функционирования



Модели для предварительного проектирования летательных аппаратов

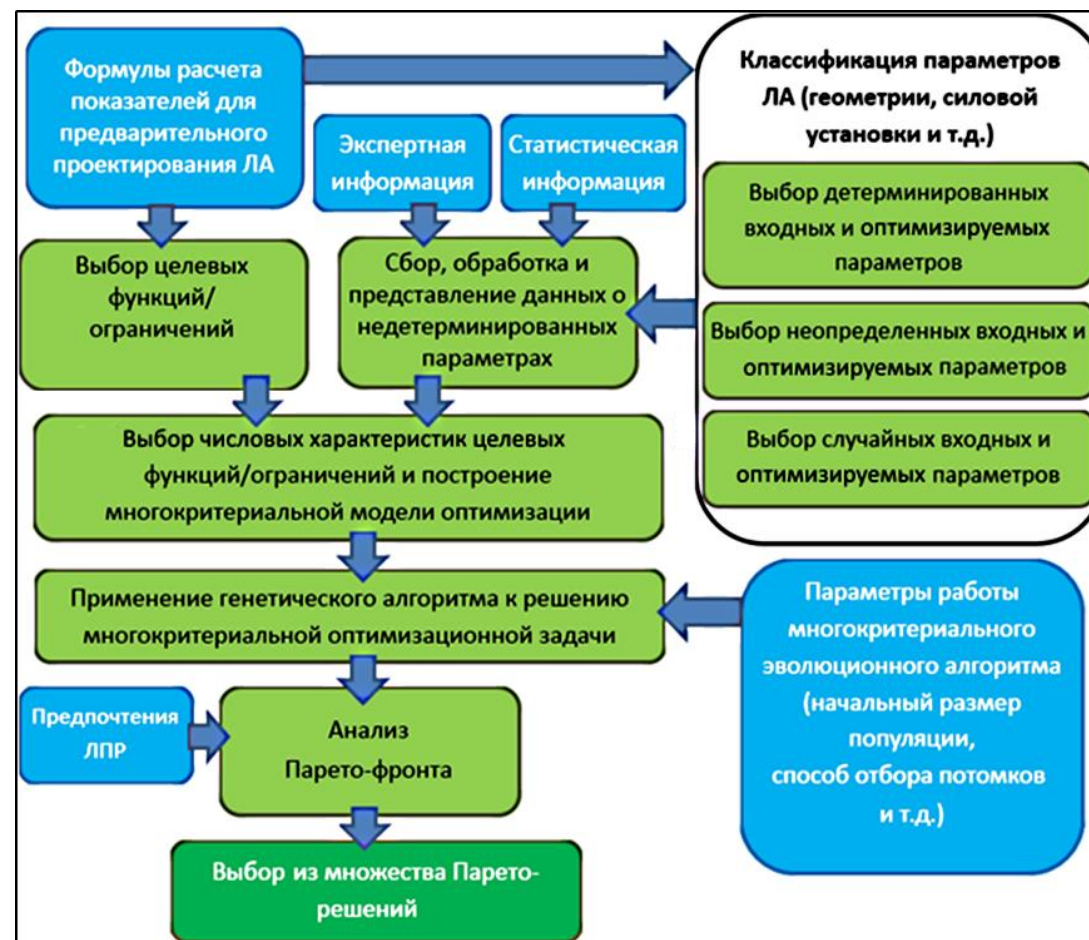
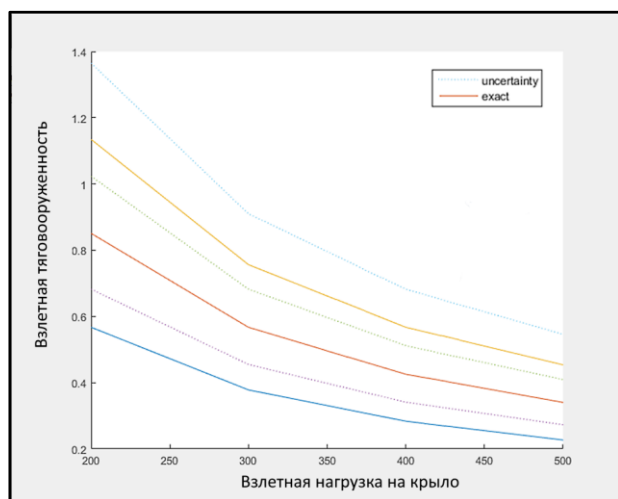
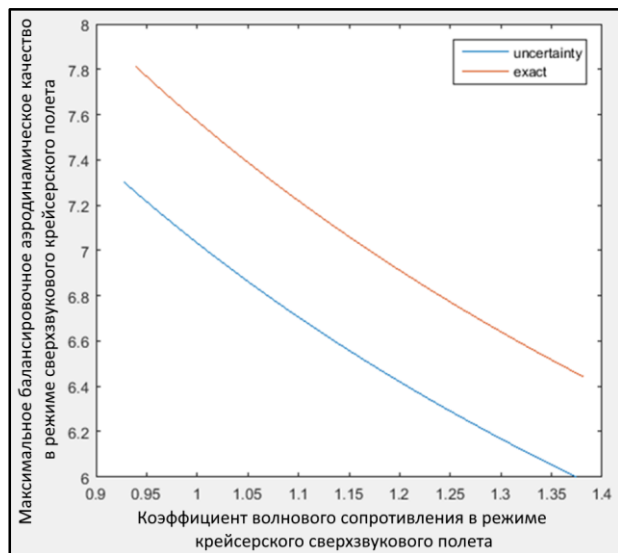
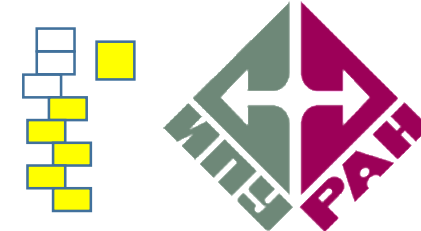


Схема решения оптимизационных задач синтеза параметров ЛА в условиях неопределенности

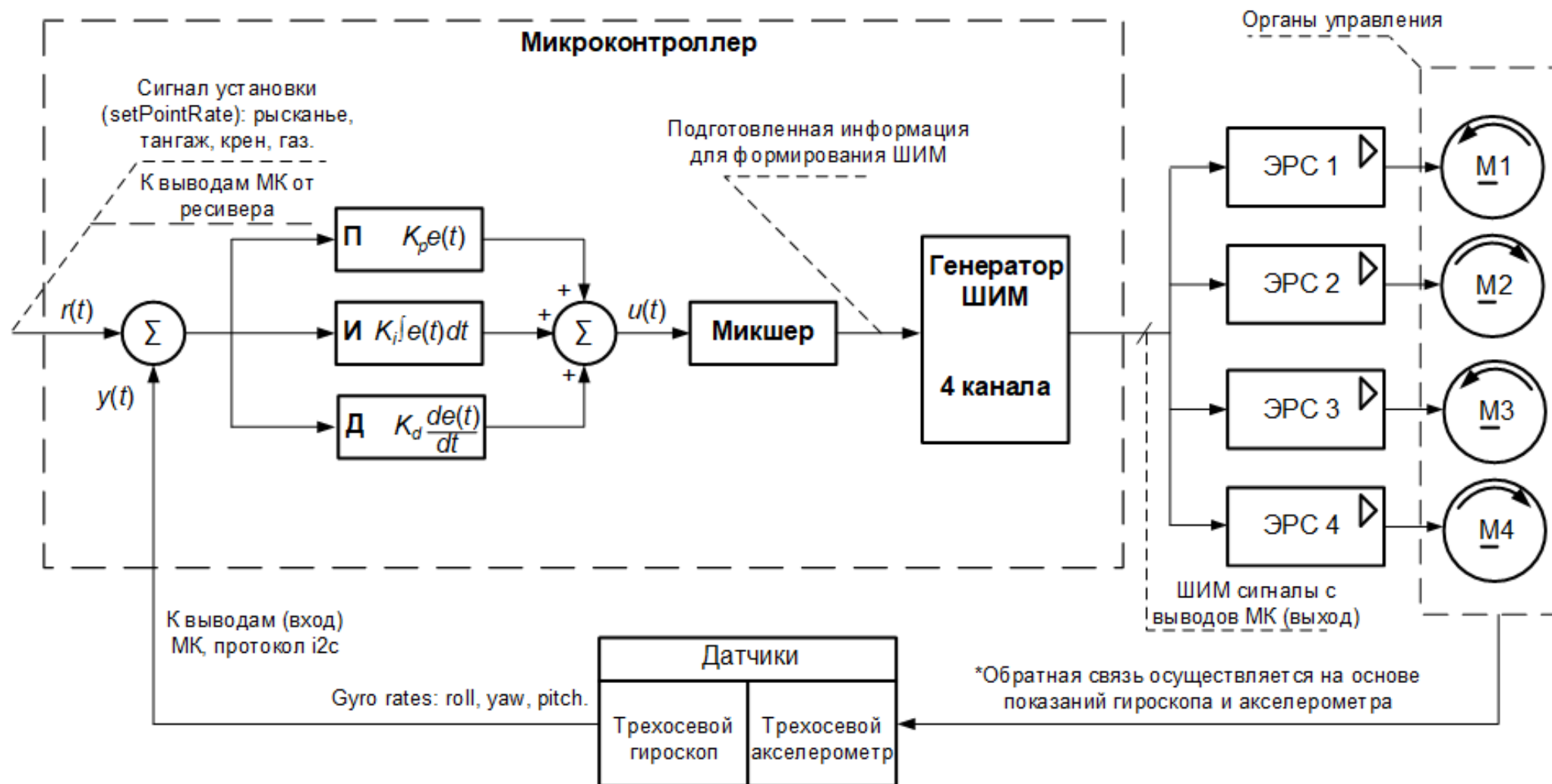
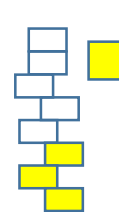
$$\max_{\bar{x}} \{ \sup_{\alpha_{(K/c_e)_{max}}} [(K/c_e)_{max}], \sup_{\alpha_{k_w}} [k_w] \},$$

где $(K/c_e)_{max}$ максимальное аэродинамическое качество и уровень волнового сопротивления k_w , $\alpha_{(K/c_e)_{max}}$ и α_{k_w} - уровни степени уверенности

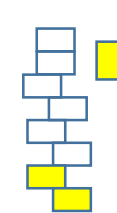
$$\begin{cases} \min_{\bar{x}} \inf_{\alpha_{M_0}} [M_0], \max_{\bar{x}} [r], \\ P(\sup_{\alpha_{M_{fuel}}} [M_{fuel}] \geq r) \geq P_{M_{fuel}}, \\ P(M(M_0 - 0.8M_{fuel}) \leq M_{land}) \geq \alpha_{M_{land}} \geq P_{M_I} \end{cases}$$

где M_0 – взлетная масса, M_{fuel} – масса топлива, M_I – свободный член ограничения на посадочную массу.

Полетный контроллер БПЛА. Схемотехника



Диагностика электромеханических систем летательных аппаратов



Выделение информативных признаков при прогнозировании технического состояния ЭМП

$$\begin{cases} \bar{x}, f \in O\{f\}, \bar{p} \in O\{\bar{p}\} \max E(\bar{x}, f, \bar{p}), \\ \bar{x}, f \in O\{f\}, \bar{p} \in O\{\bar{p}\} \max \{Q_1(\bar{x}, f, \bar{p}), \dots, Q_n(\bar{x}, f, \bar{p})\}, \\ d(\bar{x}) < d' \end{cases}$$

где \bar{x} – вектор оптимизируемых параметров, содержащий границы диапазонов для вычисления обобщенных характеристик спектра; f – вектор категориальных значений, определяющих вид функции, используемой для построения статистических регрессионных моделей тренда; $d(\bar{x})$ – общее или максимальное количество спектральных отсчетов, входящих в диапазоны, задаваемые вектором \bar{x} ; d' – пороговое значение для $d(\bar{x})$; Q_1, \dots, Q_n – критерии, отражающие адекватность моделей тренда; E – критерий отражающий выраженность тенденции; \bar{p} – параметры алгоритма вычисления обобщенных характеристик на основе амплитуд спектров; $O\{\bullet\}$ – область допустимых значений параметра/вектора

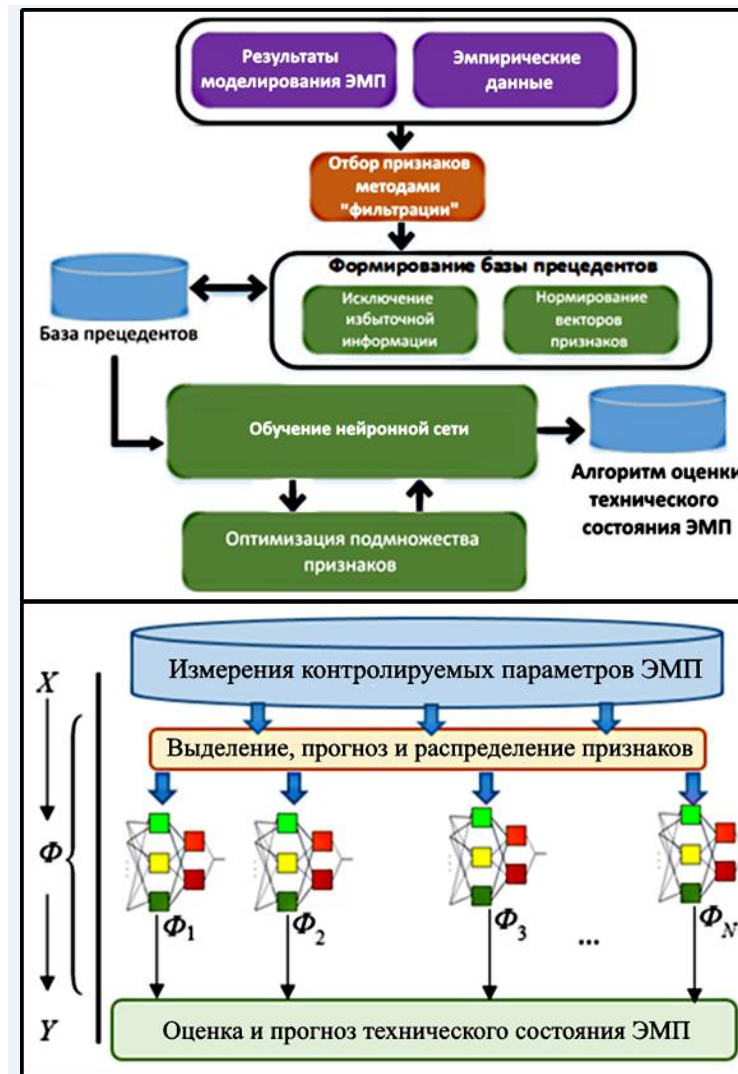
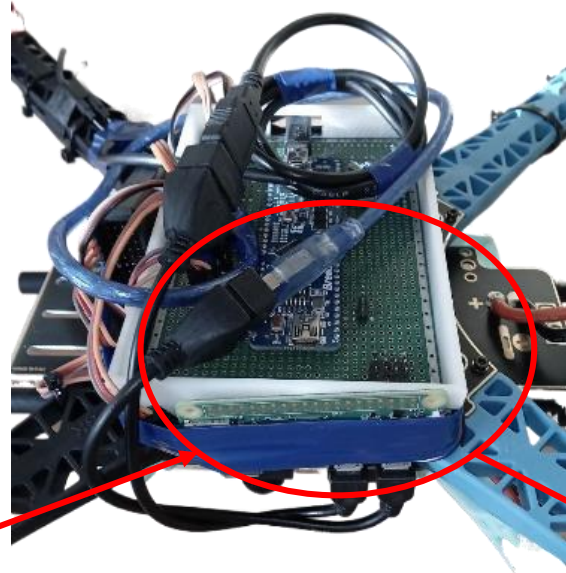
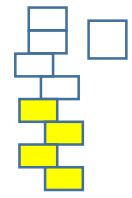


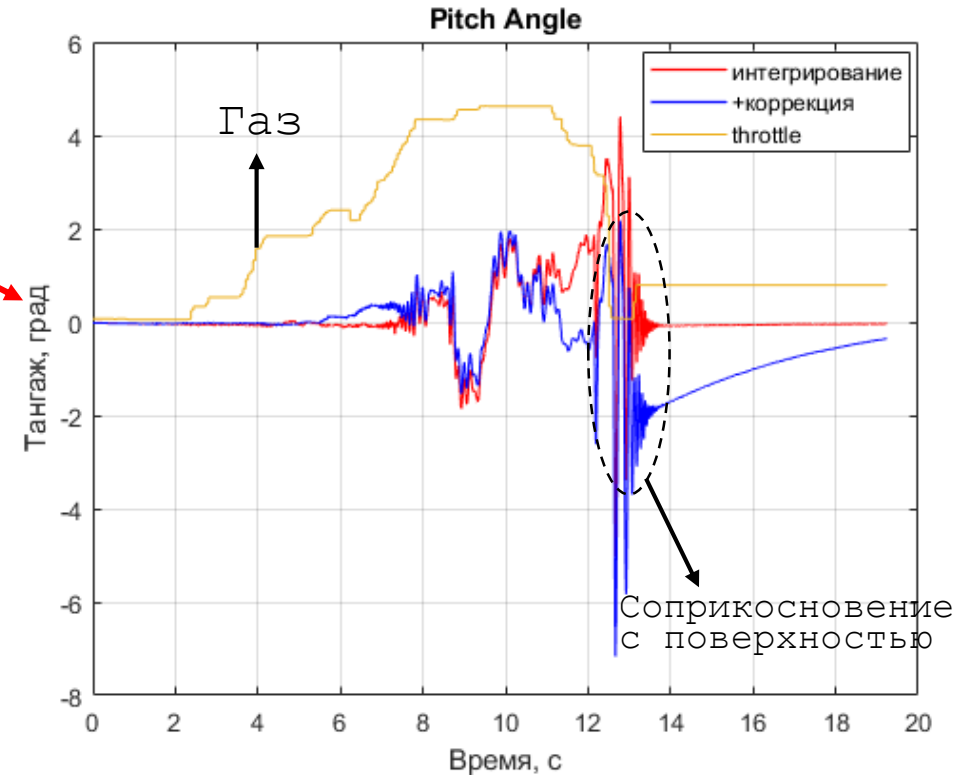
Схема построения алгоритма оценки технического состояния электромеханического привода (ЭМП)

Алгоритм оценки технического состояния ЭМП

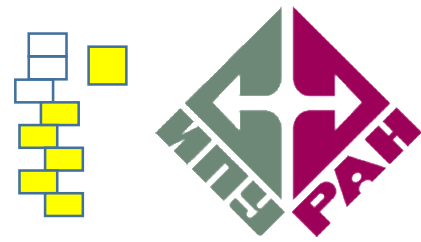
Модуль сбора параметров состояния полетного контроллера



Проведения оценки состояния с целью улучшения летных характеристик.



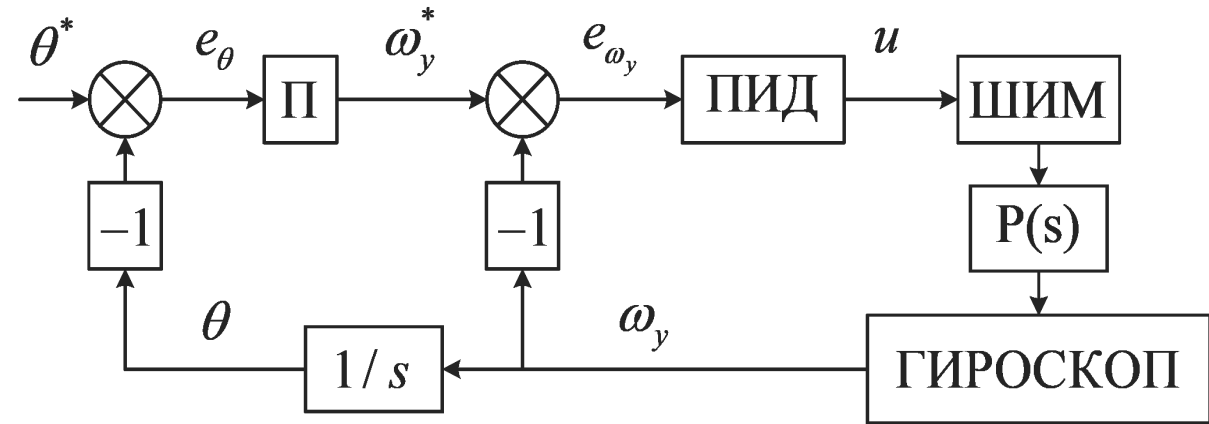
Принцип работы системы управления



$$u = C(s)e_{\omega_y}, \quad C(s) = \frac{K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s}{T_f s + 1},$$

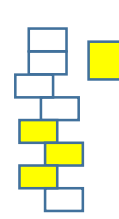
где $C(s)$ – передаточная функция ПИД-регулятора, а K_p, K_i, K_d – его коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно, T_f – постоянная времени фильтра, $e_{\omega_y} = \omega_y^* - \omega_y$ – ошибка слежения по угловой скорости, где ω_y^* – желаемое значение угловой скорости по тангажу, которое вырабатывается пропорциональным регулятором внешнего контура (по тангажу): $\omega_y^* = K_{p_\theta} e_\theta = K_{p_\theta} (\theta^* - \theta)$

где θ^* – желаемое значение угла тангажа, θ – текущее значение угла, рассчитываемое по показаниям гироскопа, K_{p_θ} – коэффициент регулятора. На схеме также показаны исполнительный орган – ШИМ, вырабатывающий сигнал, подаваемый на моторы, передаточная функция $P(s)$ упрощенно обозначающая реальный объект управления и гироскоп, измеряющий угловые скорости



Структурная схема системы управления (регулирования) углом тангажа.

Модель полетного контроллера



$$\dot{v}_x = \frac{1}{m} (\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi) F - \frac{\rho C_x}{2m} |v_x| v_x$$

$$\dot{v}_y = \frac{1}{m} (\cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi) F - \frac{\rho C_y}{2m} |v_y| v_y$$

$$\dot{v}_z = \frac{1}{m} \cos \varphi \cos \theta F - g - \frac{\rho C_z}{2m} |v_z| v_z$$

$$\dot{\omega}_x = \omega_y \omega_z \frac{I_y - I_z}{I_x} + \frac{1}{I_x} \tau_{roll} - K_{x1} \omega_x + K_{x2} \varphi - K_{x3} v_y$$

$$\dot{\omega}_y = \omega_x \omega_z \frac{I_z - I_x}{I_y} + \frac{1}{I_y} \tau_{pitch} - K_{y1} \omega_y + K_{y2} \theta - K_{y3} v_x$$

$$\dot{\omega}_z = \omega_x \omega_y \frac{I_x - I_y}{I_z} + \frac{1}{I_z} \tau_{yaw} - K_{z1} \omega_z + K_{z2} v$$

$$\dot{v} = -K_{z3} v + K_{z4} \omega_z$$

$$F = K_F (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$$

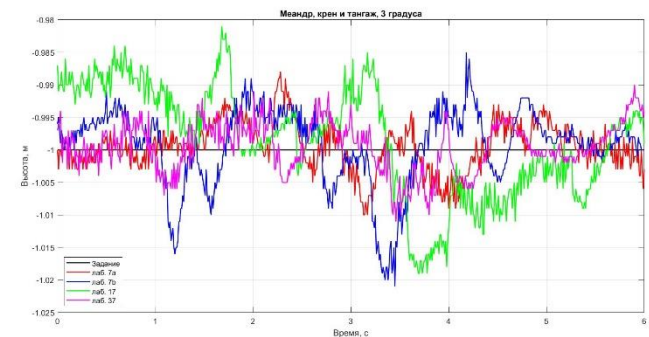
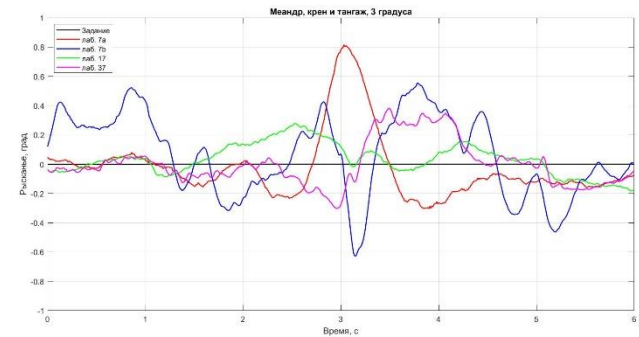
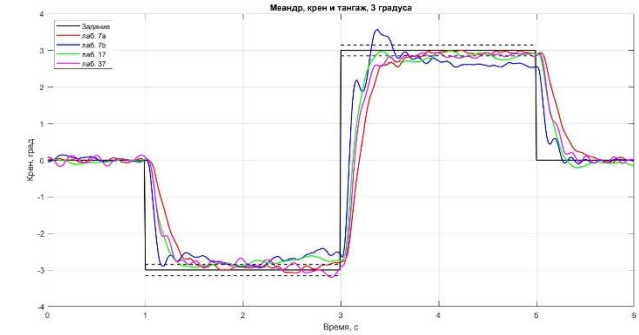
$$\tau_{roll} = K_\tau (\Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_1^2 - \Omega_4^2)$$

$$\tau_{pitch} = K_\tau (\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2)$$

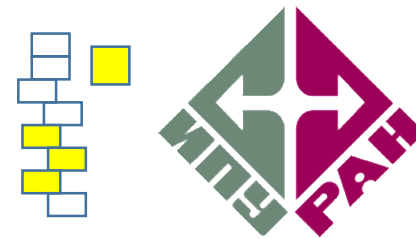
$$\tau_{yaw} = K_{yaw} (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_4^2)$$

$$\dot{\Omega}_i = -\frac{1}{T_p} \Omega_i - \frac{K_\Omega}{T_p} \Omega_i^2 + \frac{K_p}{T_p} u_i$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi / \cos \theta & \cos \varphi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$



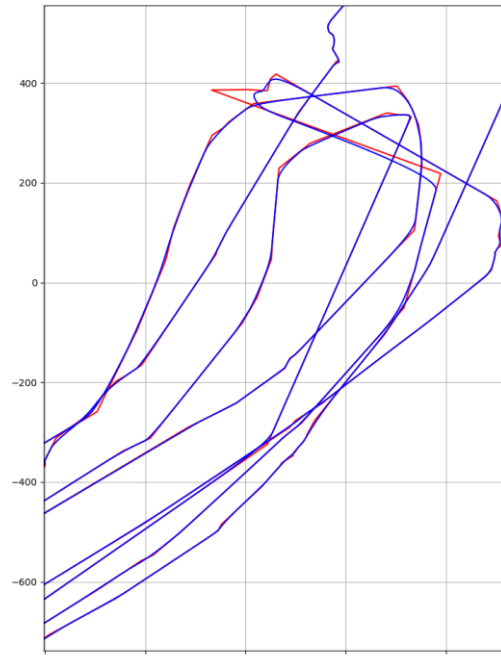
Локализация робота



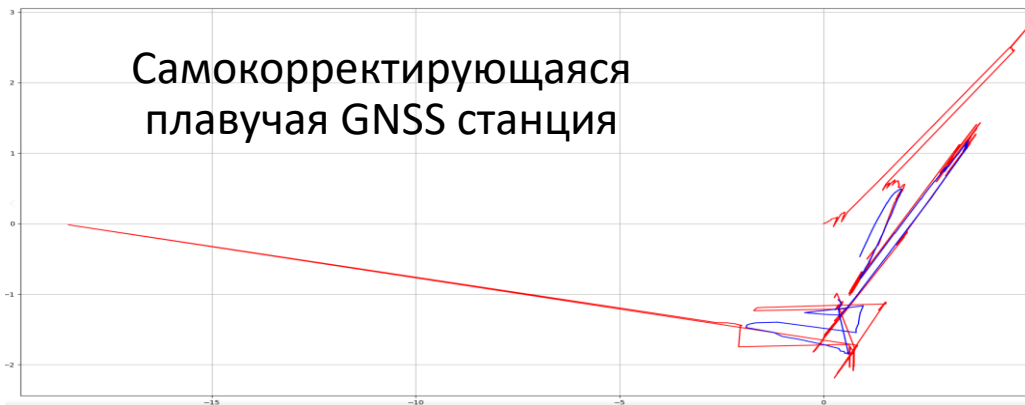
Колесно-Гусеничное ТС



Электроцикл



Самокорректирующаяся плавучая GNSS станция



Корневой-Кубаторный Филтър Калмана

Предсказание с помощью набора кубаторных точек

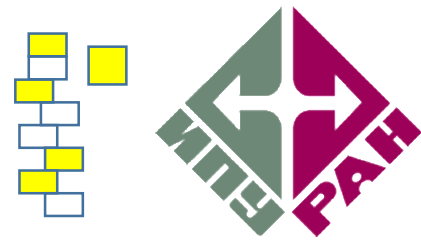
1. $X_{i,k|k} = S_{k|k}\xi_i + \hat{x}_{k|k} \quad (i = 1, \dots, 2n)$
2. $\hat{x}_{k+1|k} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} X_{i,k+1|k}^*$
3. $X_{k+1|k}^* = \frac{1}{\sqrt{2n}} [X_{1,k+1|k}^* - \dots - \hat{x}_{k+1|k}]$
4. $S_{k+1|k} = \text{Tria} ([X_{k+1|k}^* \dots])$

Коррекция с помощью набора кубаторных точек

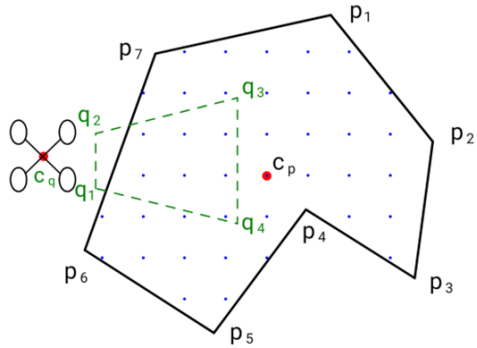
1. $X_{i,k|k} = S_{k|k}\xi_i + \hat{x}_{k|k} \quad (i = 1, \dots, 2n)$
2. $\hat{z}_{k+1|k} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} Z_{i,k+1|k}$
3. $X_{k+1|k} = \frac{1}{\sqrt{2n}} [X_{1,k+1|k} - \dots - \hat{x}_{k+1|k}]$
4. $Z_{k+1|k} = \frac{1}{\sqrt{2n}} [Z_{1,k+1|k} - \dots - \hat{z}_{k+1|k}]$
5. $\text{Tria} \left(\begin{matrix} Z_{k+1|k} & S_{R,k+1} \\ X_{k+1|k} & O \end{matrix} \right)$
6. $W_{k+1} = T_{21}/T_{11}$
7. $\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + W_{k+1} \dots$



Формирование маршрута БПЛА



модель тех. процесса по мониторингу площадного объекта

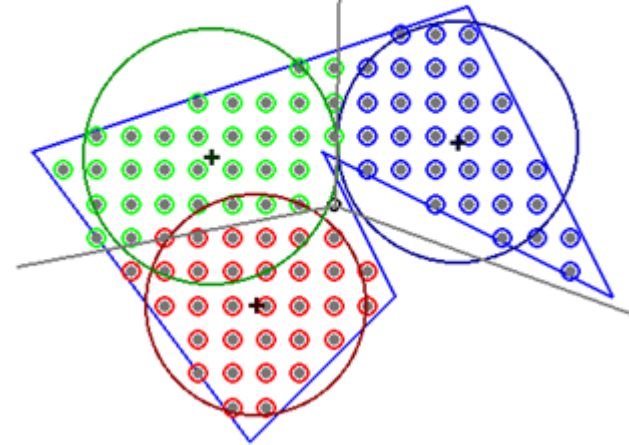


Элемент модели	Обозначение
Площадной объект	$P = \{p_1, \dots, p_N\}, p_i = \{x, y\}$
Зона видимости БПЛА	$Q = \{q_1, \dots, q_M\}, q_i = \{x, y\}$
Маршрут БПЛА	$R = \{r_1, \dots, r_K\}, r_i = \{x, y, \alpha\}$
Опорные точки площадного объекта	$P^* = \{p^*_1, \dots, p^*_N\}, p^*_i = \{x, y\}$
Контрольные точки наблюдения	$Q^* = \{q^*_1, \dots, q^*_M\}, q^*_i = \{x, y\}$
Алгоритм формирования маршрута	$\{P^*, Q^*\} \rightarrow R$

алгоритм формирования маршрута БПЛА

1. Расстановка опорных точек
2. Формирование решетчатого графа
3. Выбор стартовой точки r_0
4. Поиск на графе первичного маршрута R
5. Инициализация выходного маршрута $H = \{r_0\}$
6. Цикл:
 - 6.1. выбор ближайшего к БПЛА неосмотренного узла r
 - 6.2. добавление узла r в формируемый маршрут H
 - 6.3. пометка узлов в зоне видимости БПЛА как осмотренных
 - 6.4. имитационное моделирование шага движения БПЛА
 - 6.5. если расстояние до терминального узла мало, переход к п.7
7. Вывод уточненного маршрута H

секторное разбиение площадного объекта

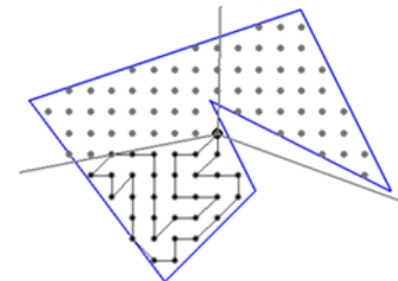


$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |p_i - c|}$$

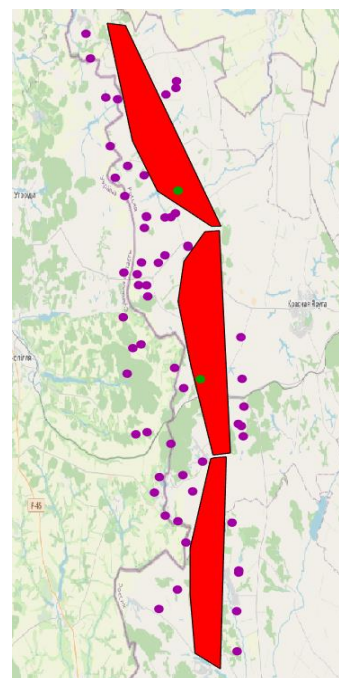
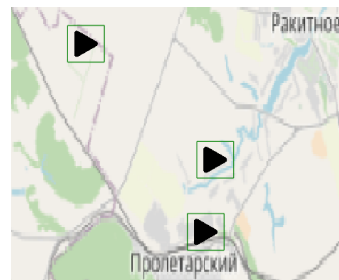
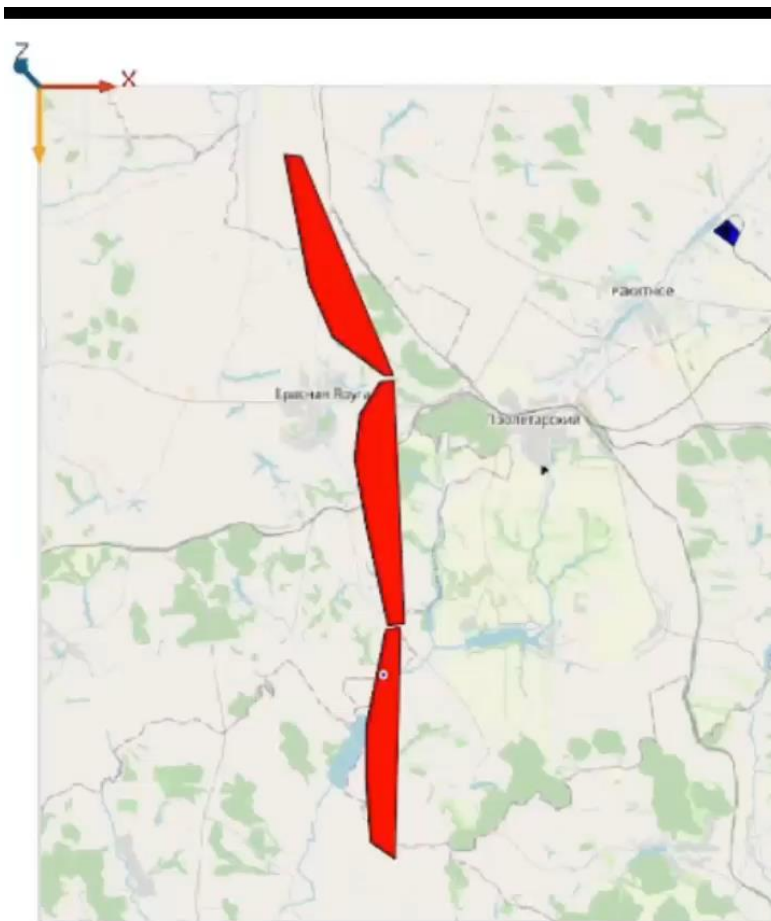
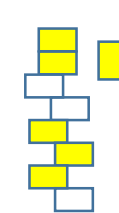
$$\rho = \frac{N_{2\sigma}}{N\sigma}$$

функция пригодности для эволюционного выбора первичного маршрута

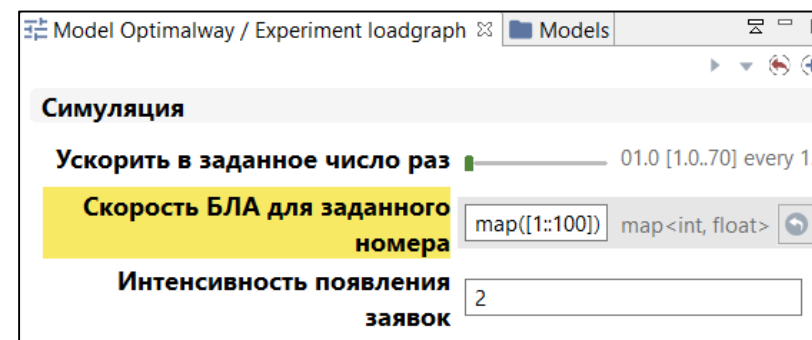
$$F = -\|q_a - q_1\| - \sum_{i=1}^{K-1} \|q_{i+1} - q_i\| - \|q_b - q_K\|,$$



Проектирование программного комплекса моделирования беспилотных авиационных (транспортных) систем



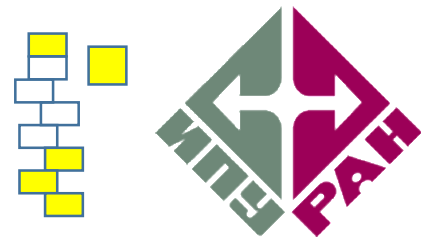
- Низкоуровневое проектирование, включая проектирование механизмов интеграции программных модулей
- Проектирование и разработка прототипа пилотного программного модуля оптимизации загрузки разнородных БЛА



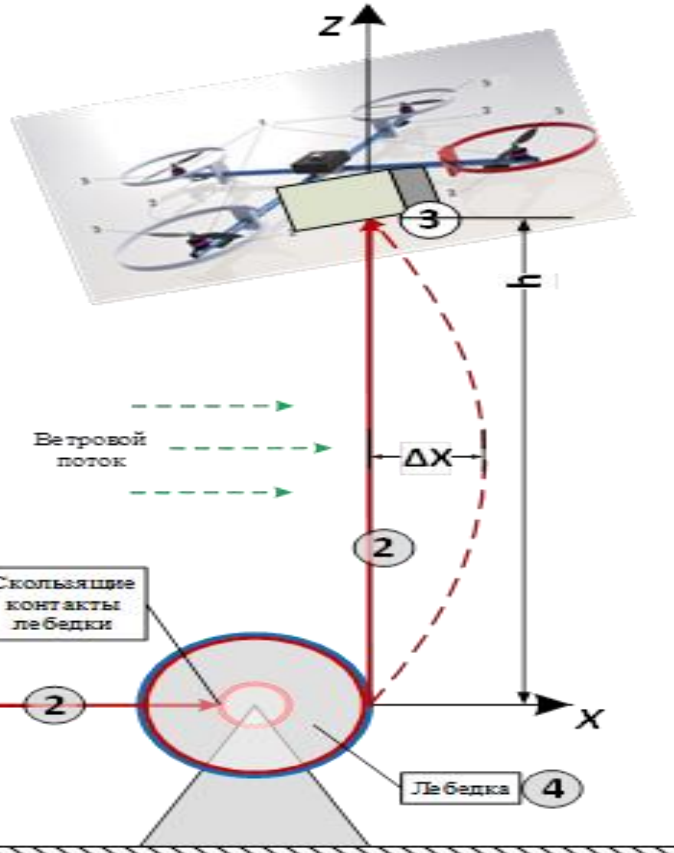
```
public Population Selection(int selectionSize)
{
    Population parentPool = new Population(selectionSize);
    Random rnd = new Random(DateTime.Now.Millisecond);

    for (int i = 0; i < parentPool.Size; i++) // каждая итерация цикла - "турнир"
    {
        // случайно выбираем двух особей
        int ind1 = rnd.Next(parentPool.Size);
        int ind2 = rnd.Next(parentPool.Size);
        // добавляем в родительский пул более приспособленную
        if (individuals[ind1].Fitness > individuals[ind2].Fitness)
            parentPool.Add(individuals[ind1]);
        else
            parentPool.Add(individuals[ind2]);
    }
    return parentPool;
}
```


Высотная привязная платформа



Математическая модель привязной платформы с учетом влияния троса-троса в условиях нестационарного течения воздуха.

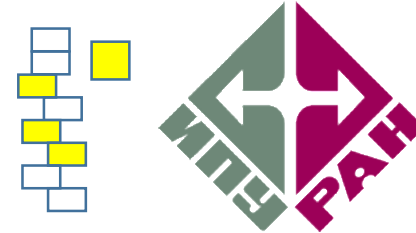


$$\frac{dx_1}{dz} = \rho g; \quad \frac{dx_2}{dz} = x_3; \quad \frac{dx_4}{dz} = \sqrt{1 + x_3^2}; \quad \frac{dx_5}{dz} = \sqrt{\frac{1 + x_3^2}{x_1}} \rho;$$

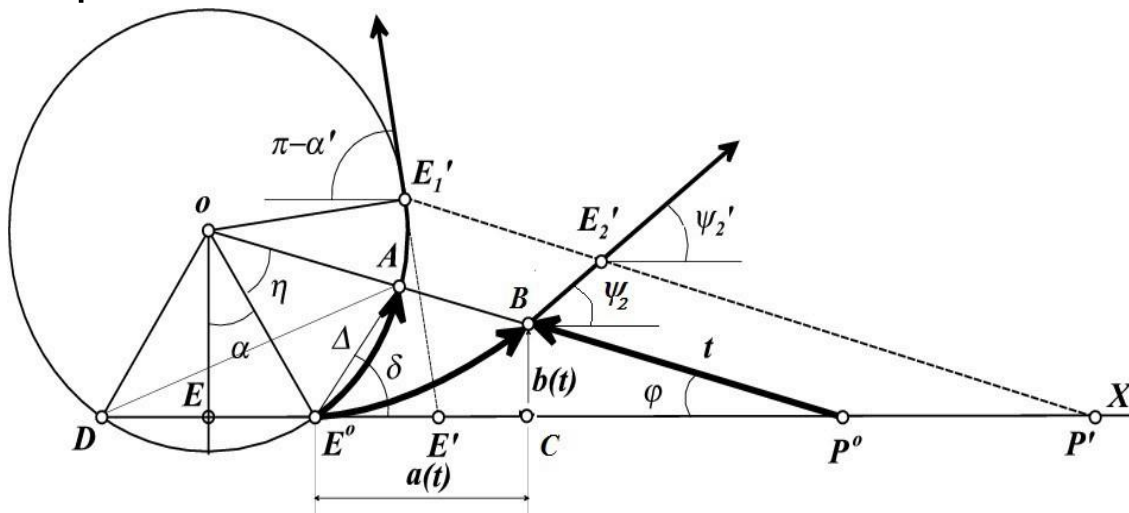
$$\frac{dx_3}{dz} = \frac{-\rho g x_3 (1 + x_3^2) - A v^2 \sqrt{1 + x_3^2}}{x_1}.$$



Гарантированный перехват защитником всех опасных траекторий



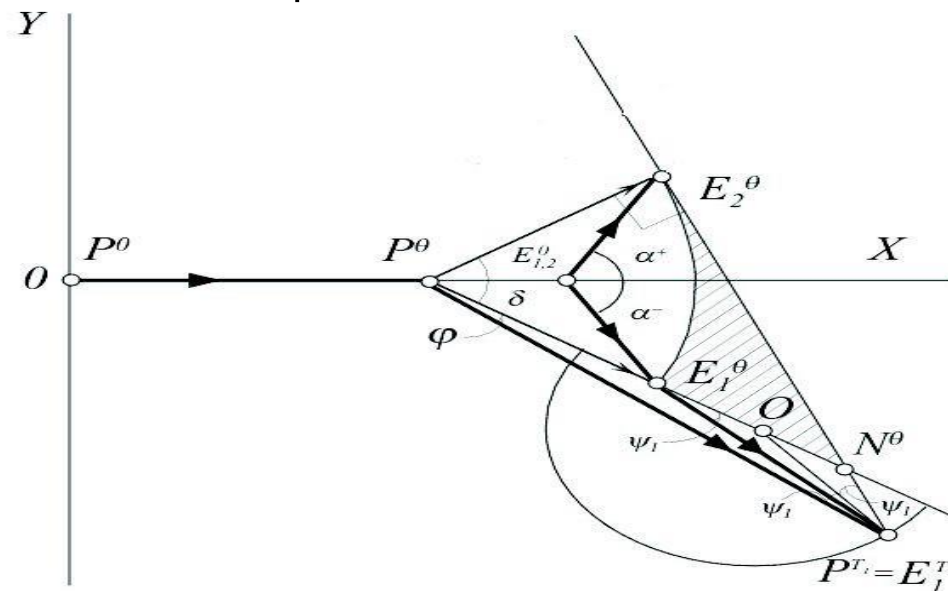
MTD-игры. Перехват преследователя ложной целью



Уклонение и перехват
($\beta_1 = 0.25, \beta_2 = 0.5$)

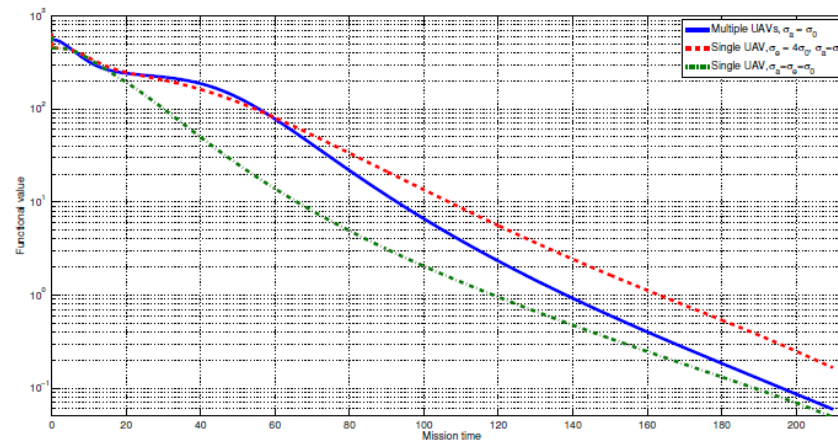
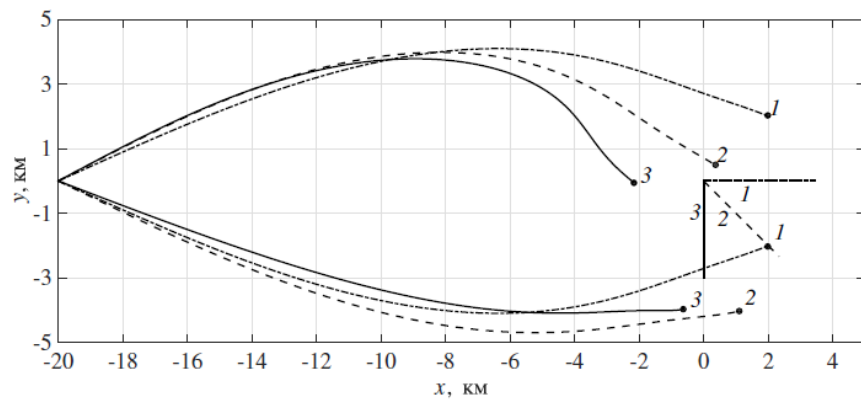
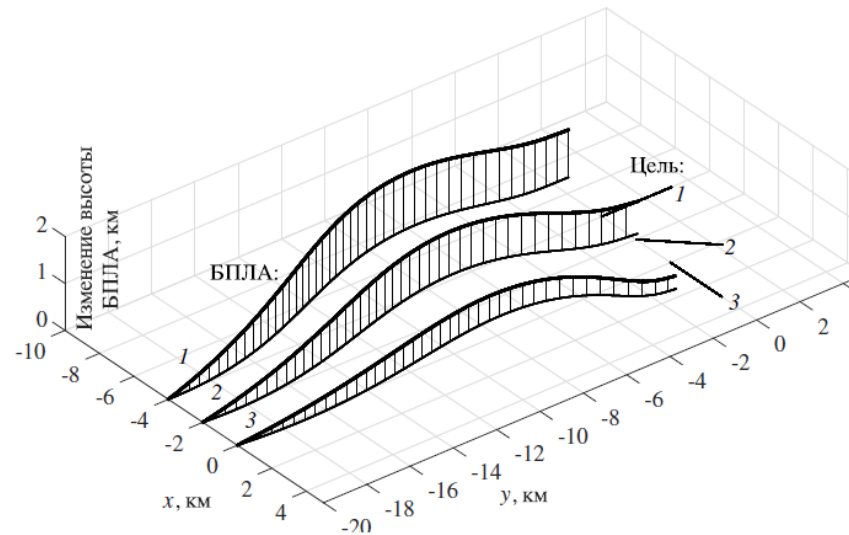
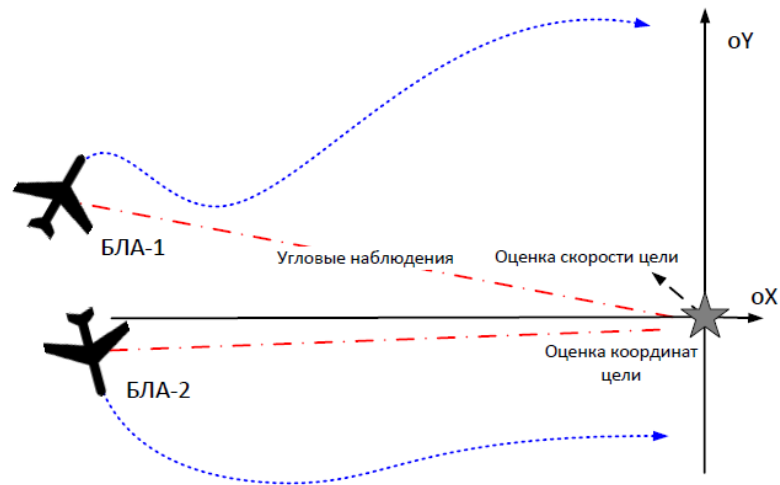
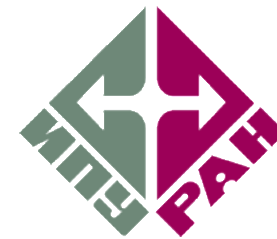
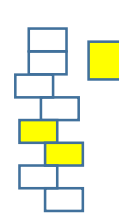
Терминальные условия $\sin \psi = \sin \alpha$

Поочередное преследование с ложной целью

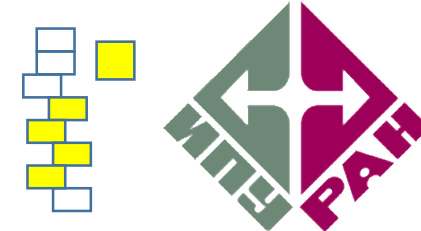


Оптимальные траектории игроков в случае позиционного выбора порядка преследования при $E^0 = E^0$ и $\beta = 0.5$

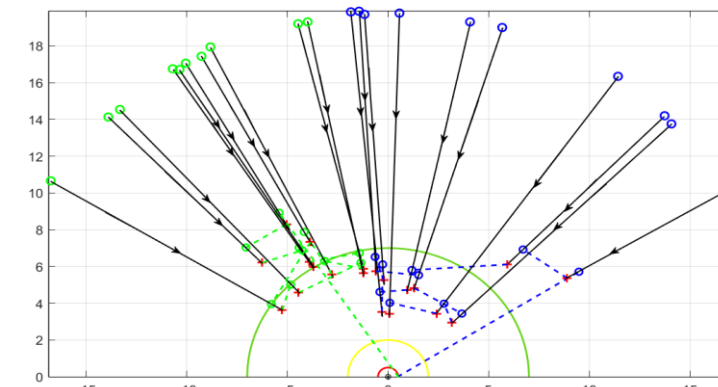
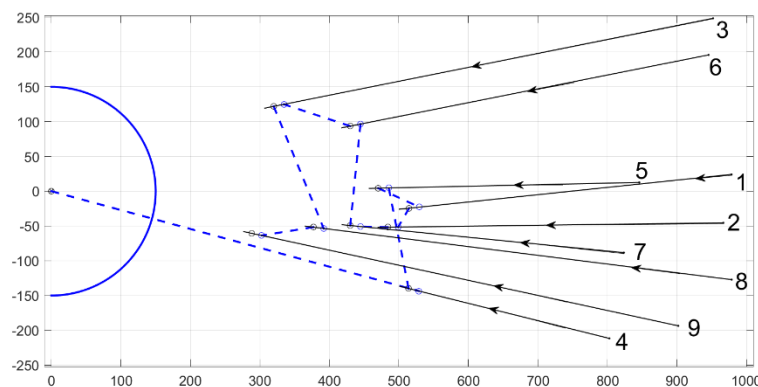
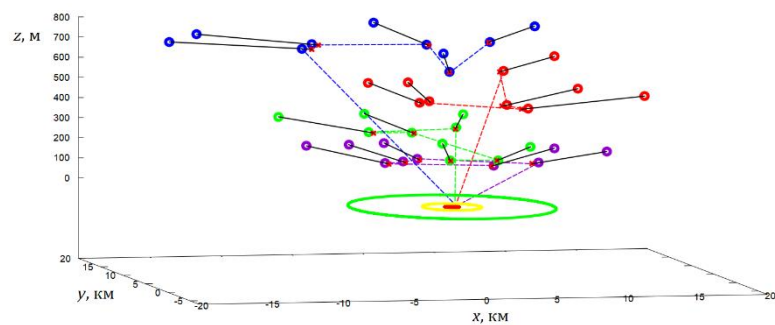
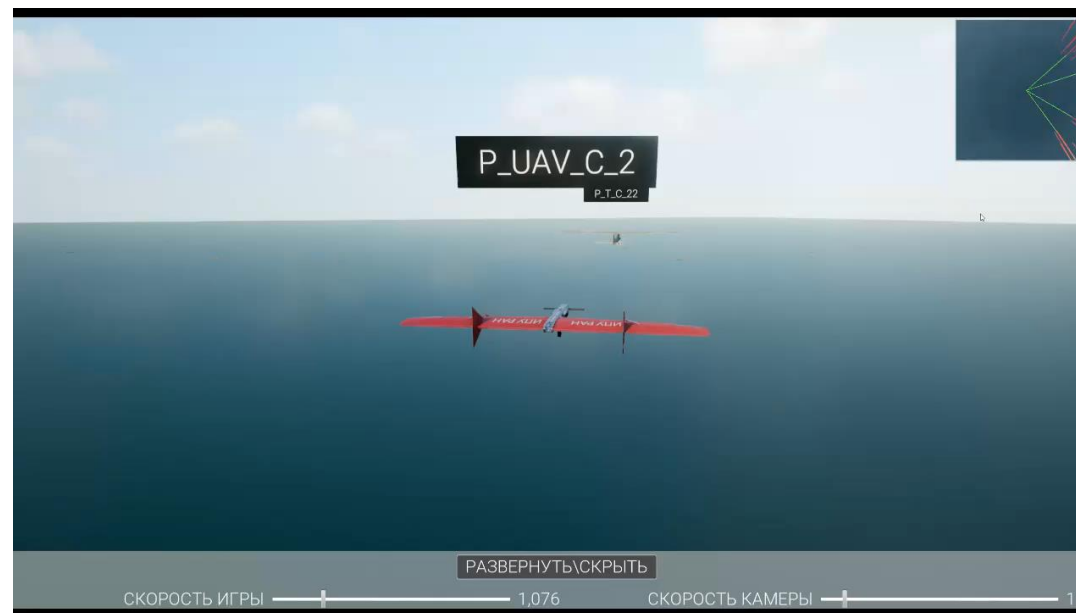
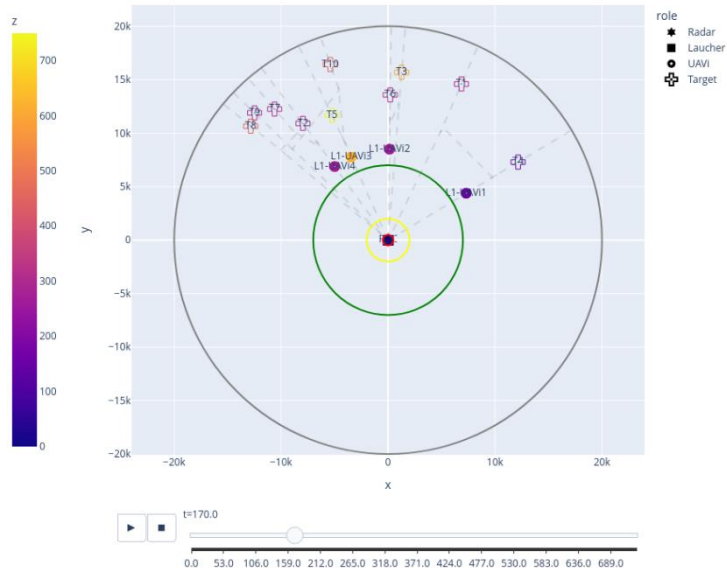
Оптимизация траектории БПЛА в задаче определения ЭДЦ



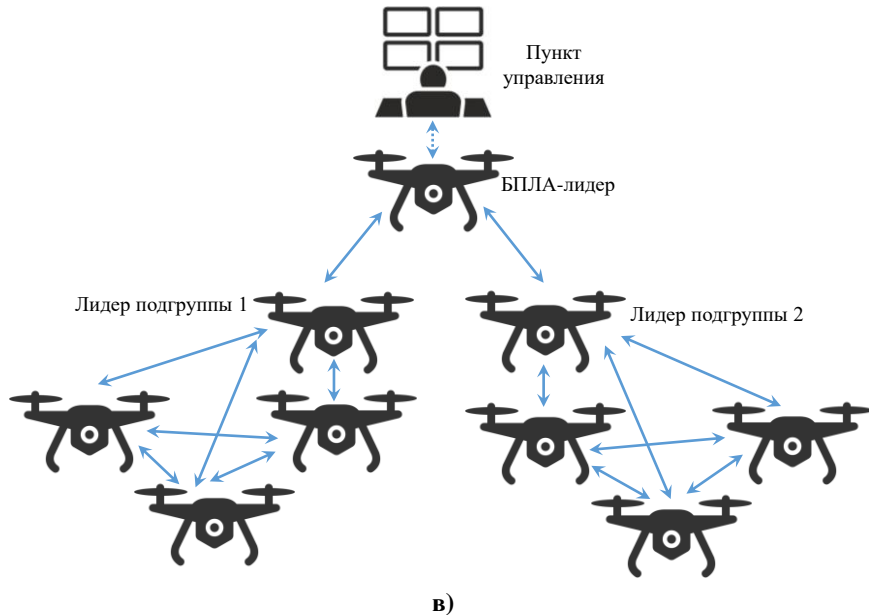
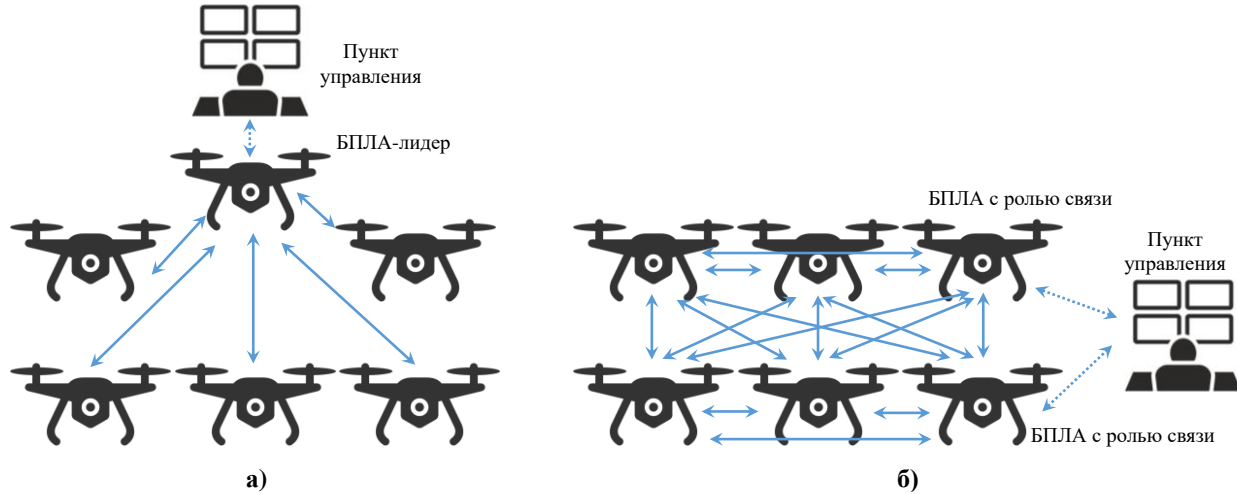
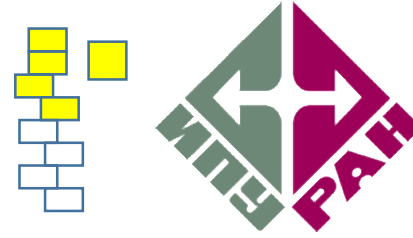
Оптимизация плана перехвата движущихся целей



Programm: R530v5, Scenario: red_zone_attack_4x10_90

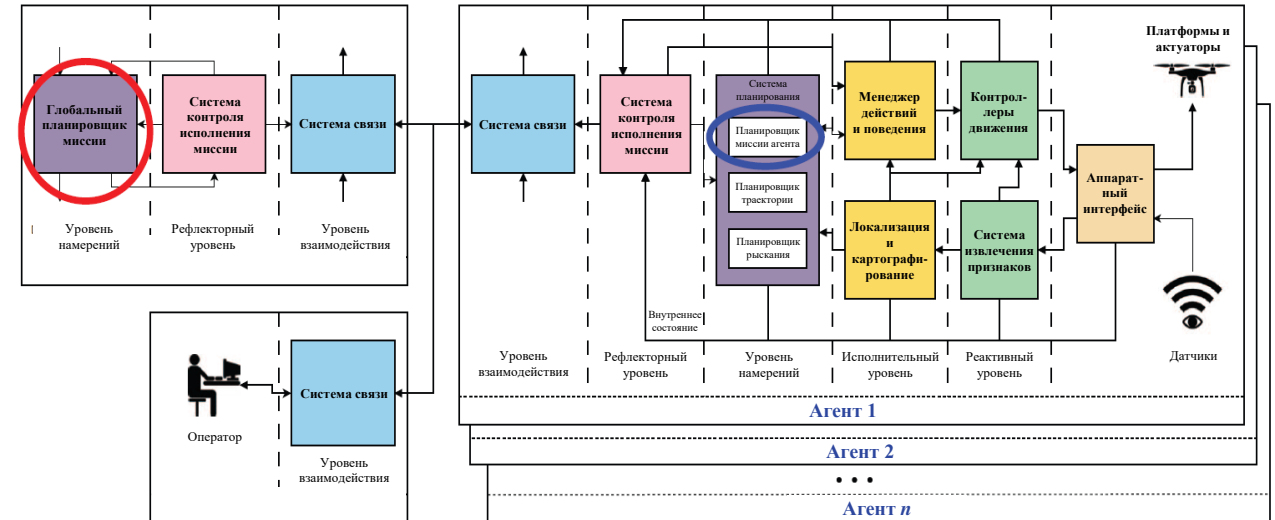


Группа БПЛА

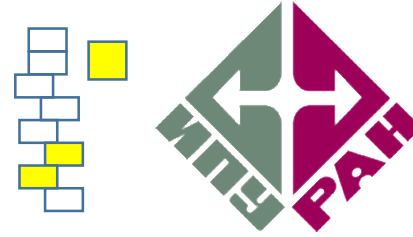


Принципы планирования маршрутов для парка летательных аппаратов:

- минимизации затрат,
- максимизации охвата и прибыли,
- бесконфликтности в воздушном пространстве,
- контроля, быстродействия, робастности и безопасности работы алгоритмов составления расписания,
- точности доставки,
- резервирования средств доставки.

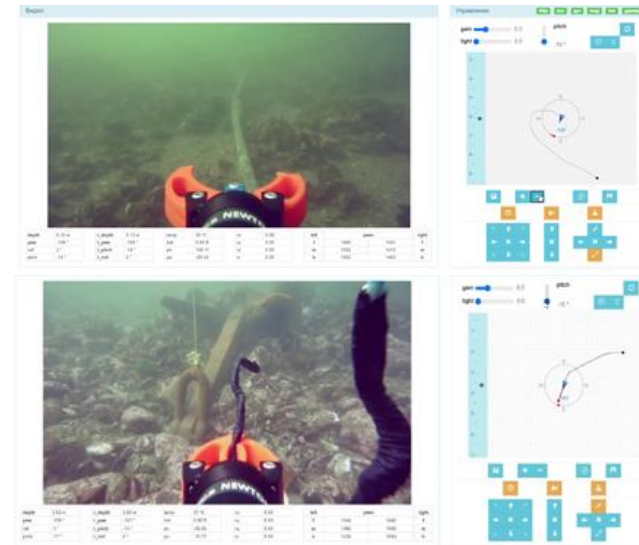
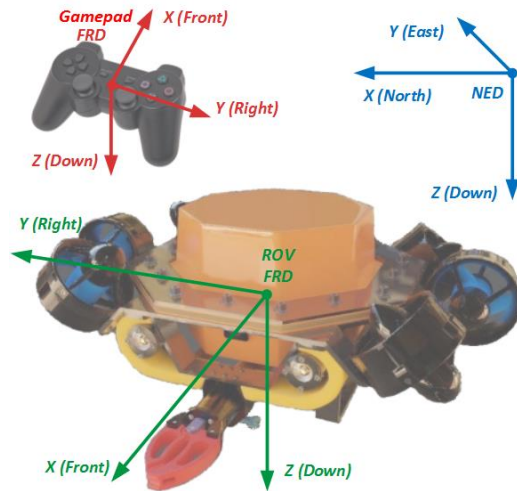
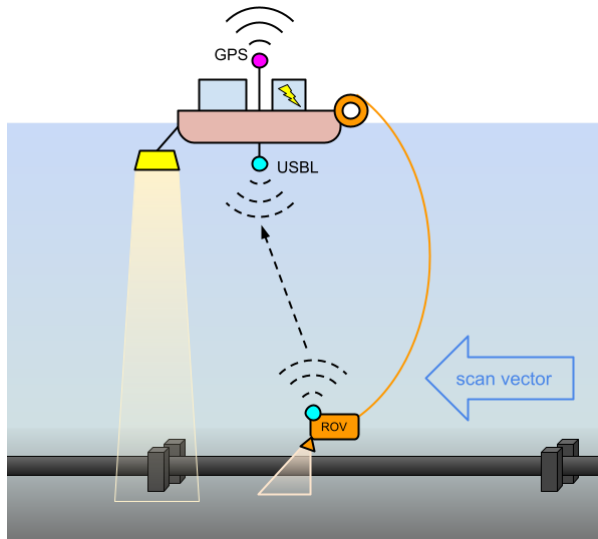
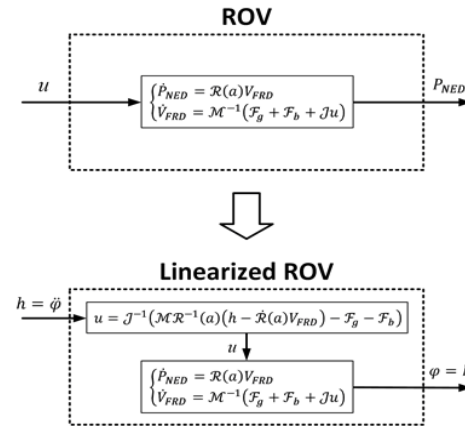


Автономный необитаемый аппарат



Разработка всенаправленного мобильного подводного аппарата с возможностью удержания любой ориентации.

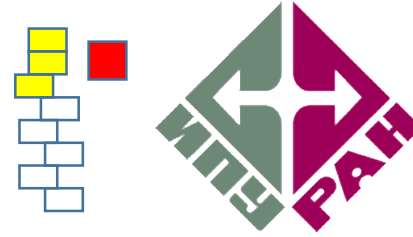
Система инерциального подруливания для повышения качества выполнения оператором подводных работ манипулятором и фото-видео инспекции объектов.



Распределенная система полигонов

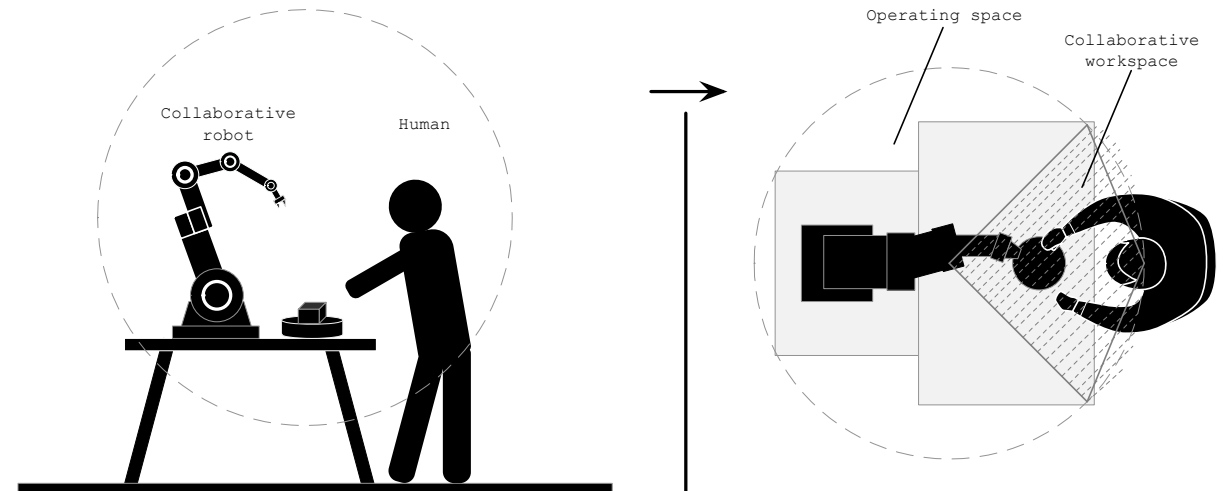
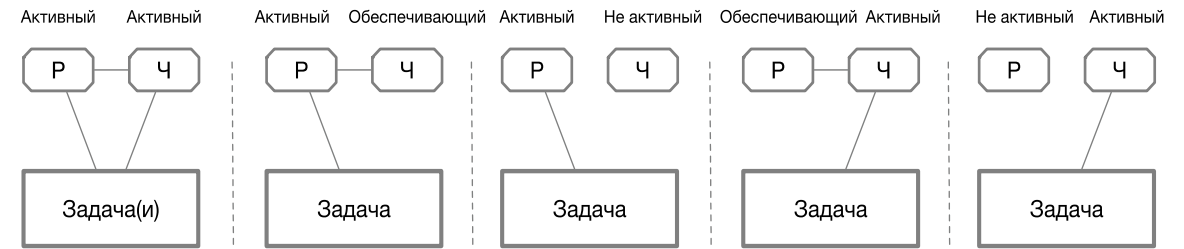


Безопасное взаимодействие человека и робота в едином рабочем пространстве

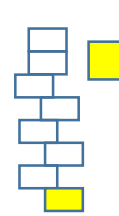


Основания классификации взаимодействий человека и робота:

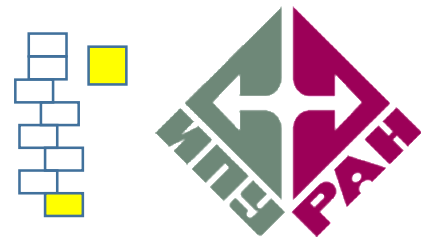
- по типу задач;
- по уровню критичности задачи;
- морфология робота;
- отношение людей к роботу;
- по составу команды;
- по уровню совместного взаимодействия между командами;
- по роли взаимодействия;
- по типу физической близости человека и робота;
- принятие решения;
- пространство и время;
- по уровню автономности или степени вмешательства.



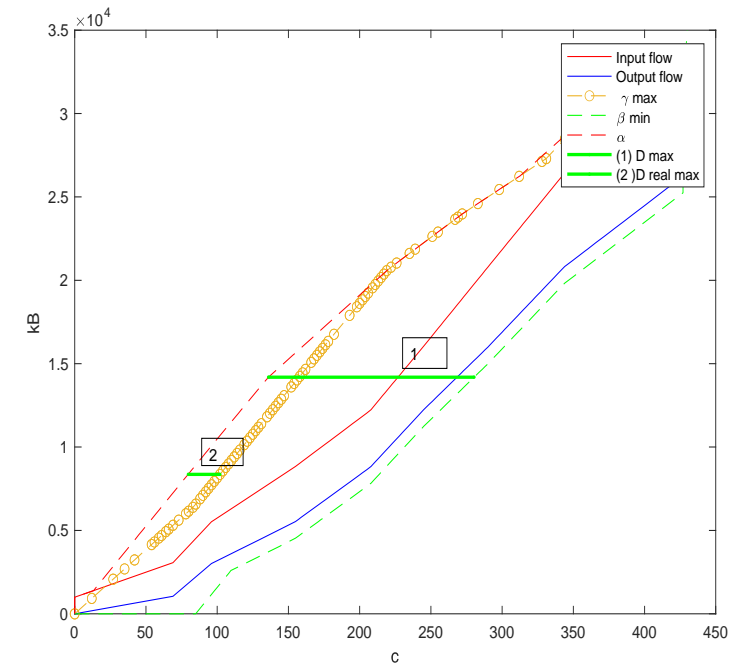
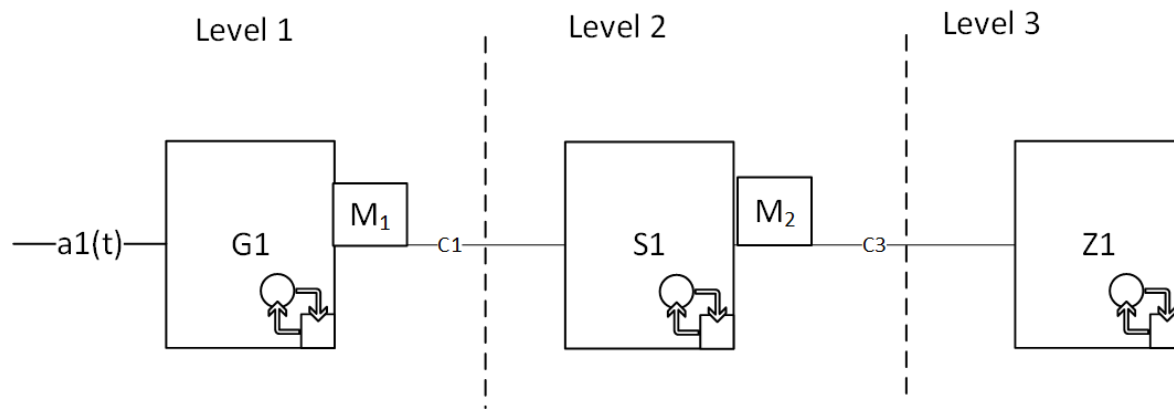
Моделирование и синтез архитектуры кибербезопасности в распределенной цифровой системы с мобильными агентами



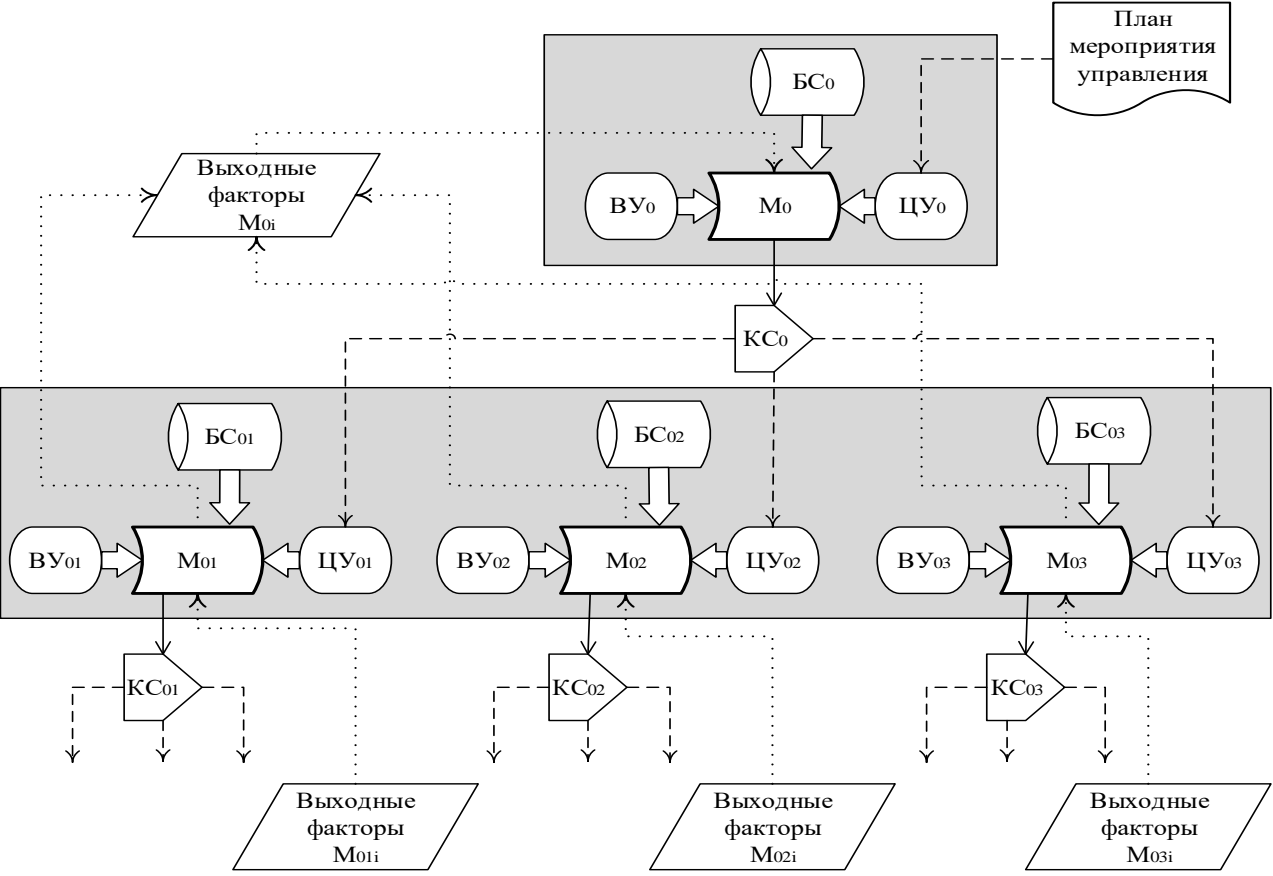
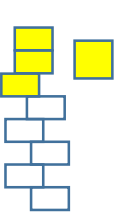
Моделирование и анализ временных характеристик доступности мобильных агентов



- $A^* \geq A \otimes \beta$
- $\beta' = A^* \overline{\otimes} A$
- $\beta_{Si} = \beta_{Gk} \otimes M_1^{-1} (\beta_{Cn1} \otimes \beta_{Sl} \otimes M_2^{-1} (\beta_{Cn2} \otimes \beta_{Zm}))$



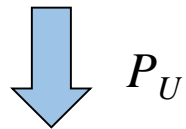
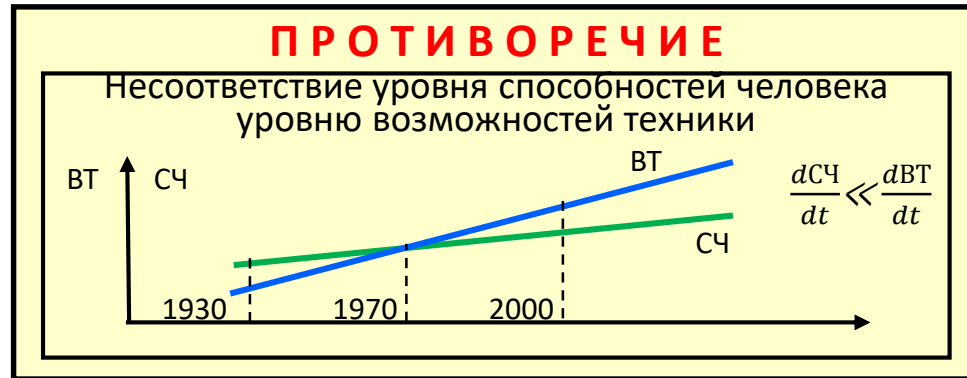
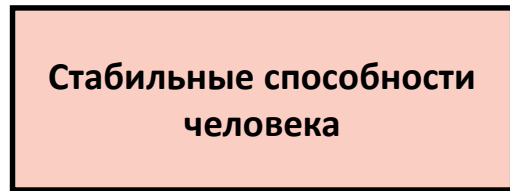
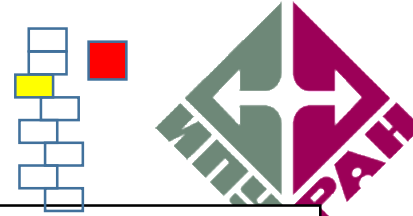
Сценарное управление сложными объектами и системами в условиях неполной информации



Процедура формирования моделей децентрализованного группового управления

- БС₀₂ - базовая структура объекта управления
- ВУ₀₁ - вызовы и угрозы
- ЦУ₀₁ - цель управления
- М₀₁ - модель ситуации
- КС₀₁ - координирующий сценарий
- - прямая цепочка управления
- ⇨ - формирование модели ситуации
- -> - формирование иерархии целей
- ...> - включение факторов в модель верхнего уровня

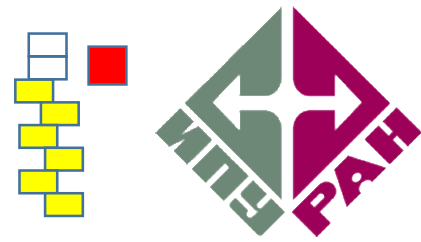
Человека в контуре управления



Неполная реализация ресурсного потенциала техники

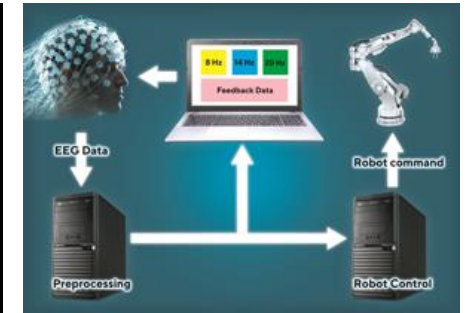
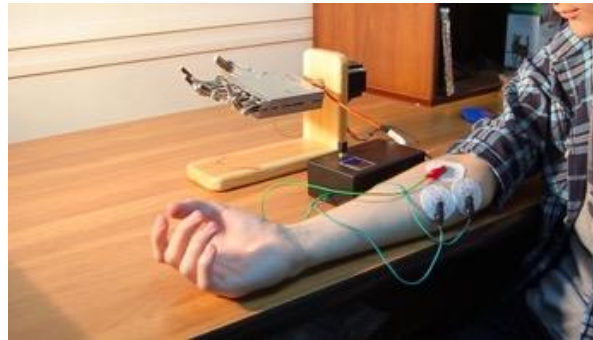
Эффективность применения РТК: $\bar{W} = \sum_{i=1}^n P_{U_i} W_{U_i}$, P_{U_i} - вероятность принятия U_i -го решения; W_{U_i} - результативность при U_i -м решении

Интерфейсы управления



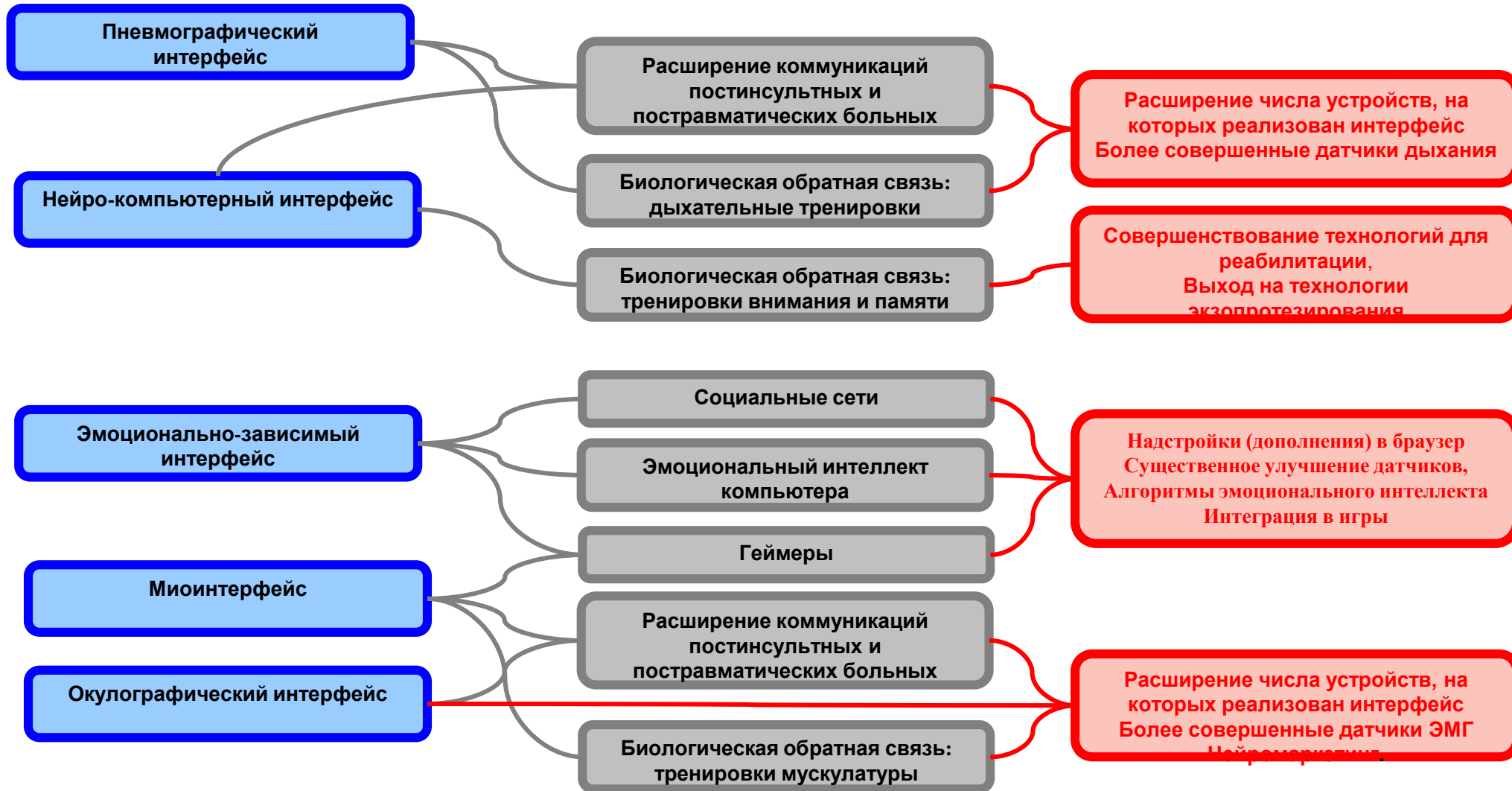
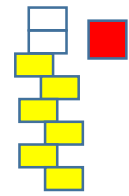
Для управления техническими средствами (роботами) с использованием биологических интерфейсов используются две базовых концепции:

- а) замещающее управление – замещение утраченных функций,
- б) дополнительное управление – получение новых каналов управления в дополнение к полному комплекту существующих.

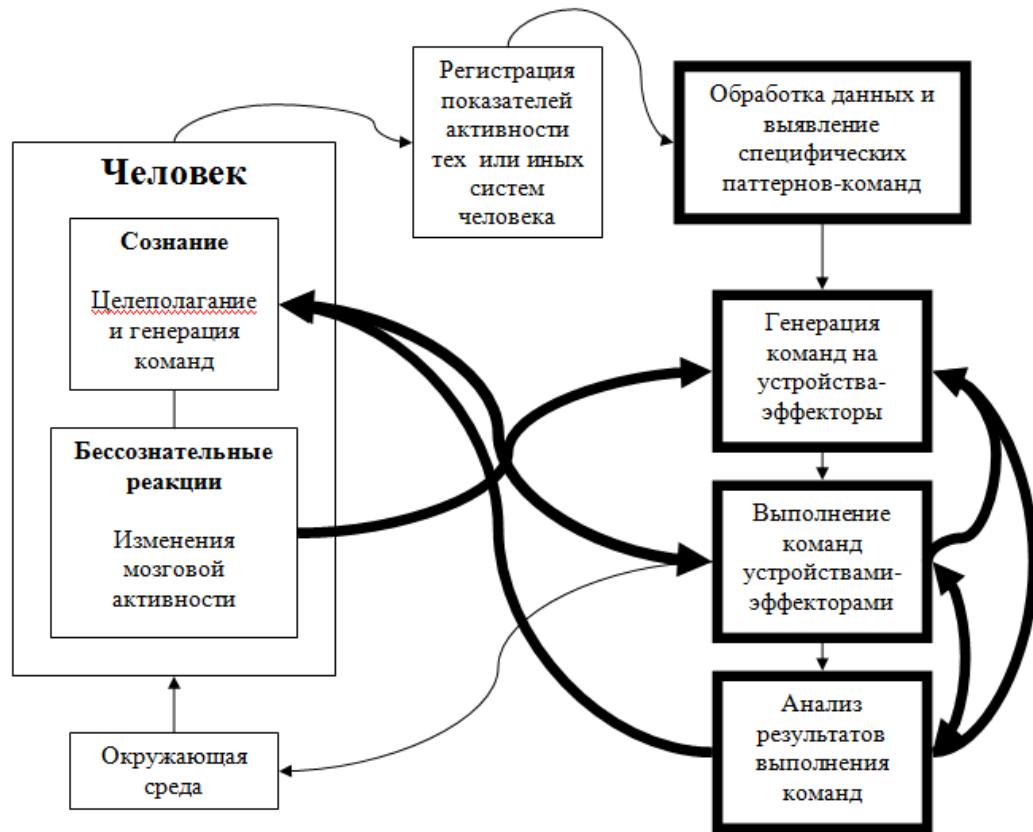
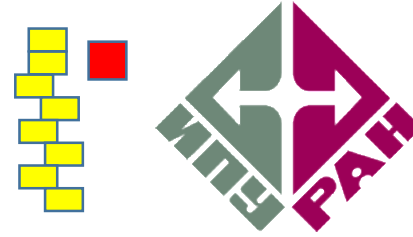


Управление дроном с помощью мышечной активности:

Интерфейсы управления



Искусственный и гибридный интеллект



- Моделирование и прогноз поведения оператора.
- Алгоритмы цифровой обработки биомедицинских сигналов.
- Алгоритмы классификации особенностей биомедицинских сигналов.
- Алгоритмы управления устройствами эффекторами, воспроизводящие особенности управления пользователя.



Заключение

- Проблемные вопросы:
 - Желание отказаться от построения моделей к набору данных (обучающих выборок) и получения быстрых решений.
 - Разработка моделей объекта управления, внешней среды: глубина проработки и введение ограничений.
 - Создание архитектуры системы управления и оценка реализуемости на имеющихся ресурсах.
 - Проверка работоспособности и коррекция параметров управления.
 - Реализация алгоритмов управления и верификация используемых моделей.
- Управление – это основа.



Интеллектуальные робототехнические системы

Мещеряков Р.В.

д.т.н., профессор

Директор центра интеллектуальных
робототехнических систем ИПУ РАН

17-20 июня 2024 г.