

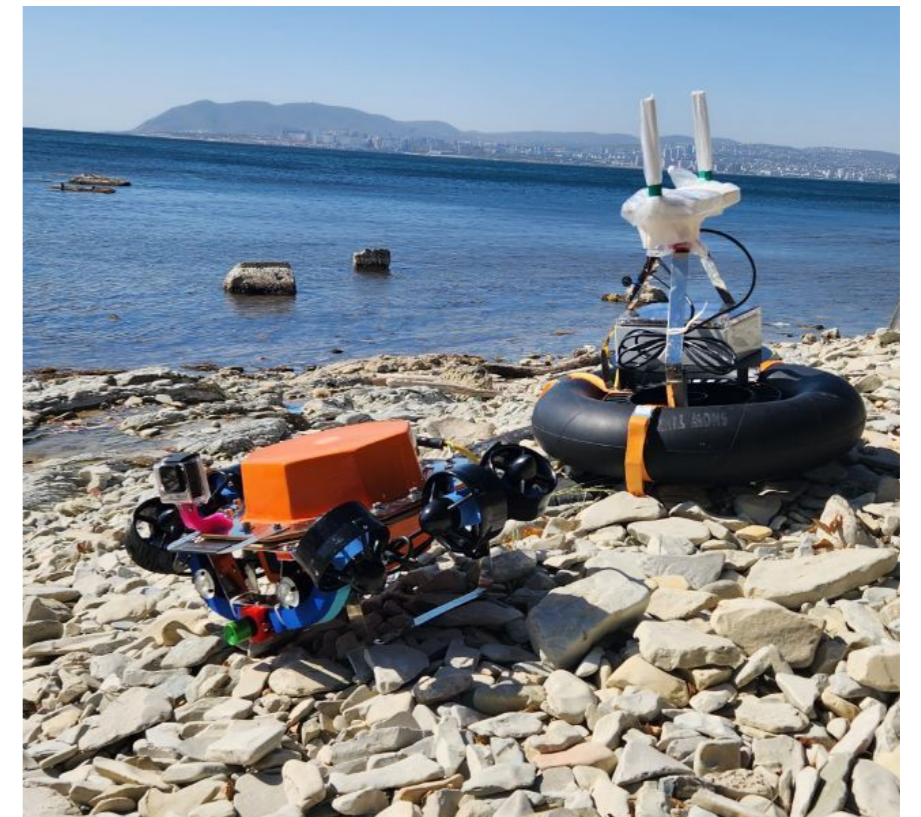
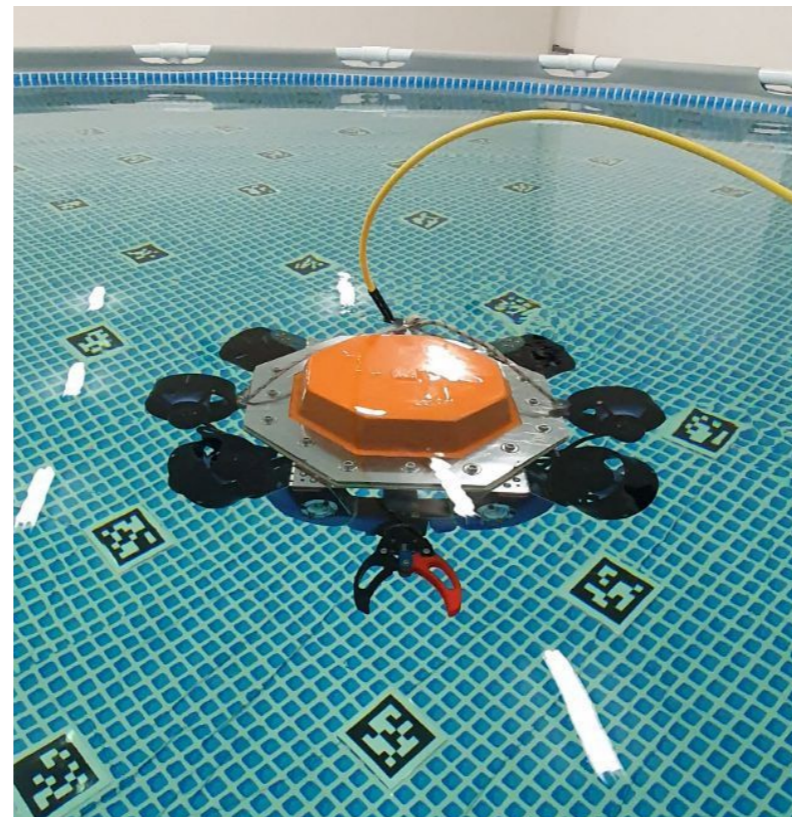
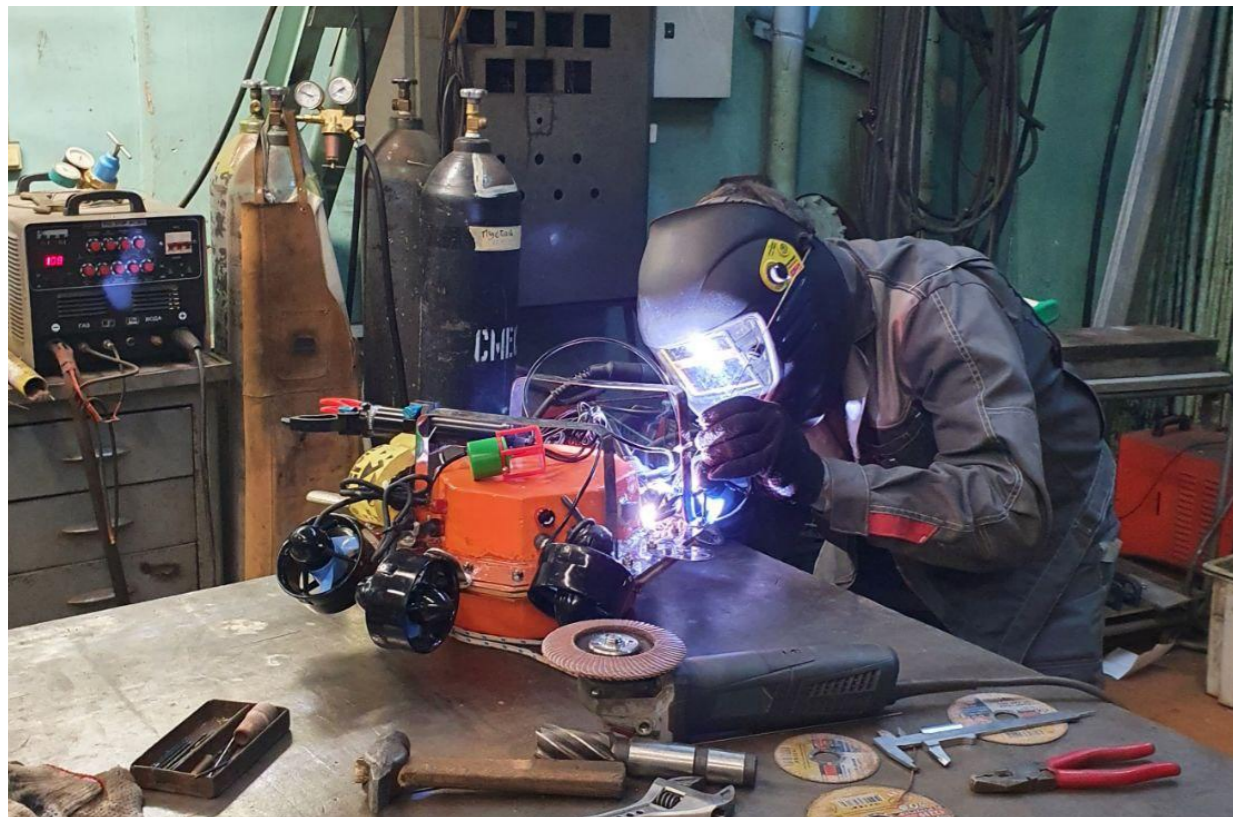
Итоги конкурса  
по синтезу регуляторов для системы управления  
необитаемым подводным аппаратом  
"Водяной"

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук*  
*Лаборатория № 17*  
Фархадов М. П., Абдулов А. В., Абраменков А. Н.

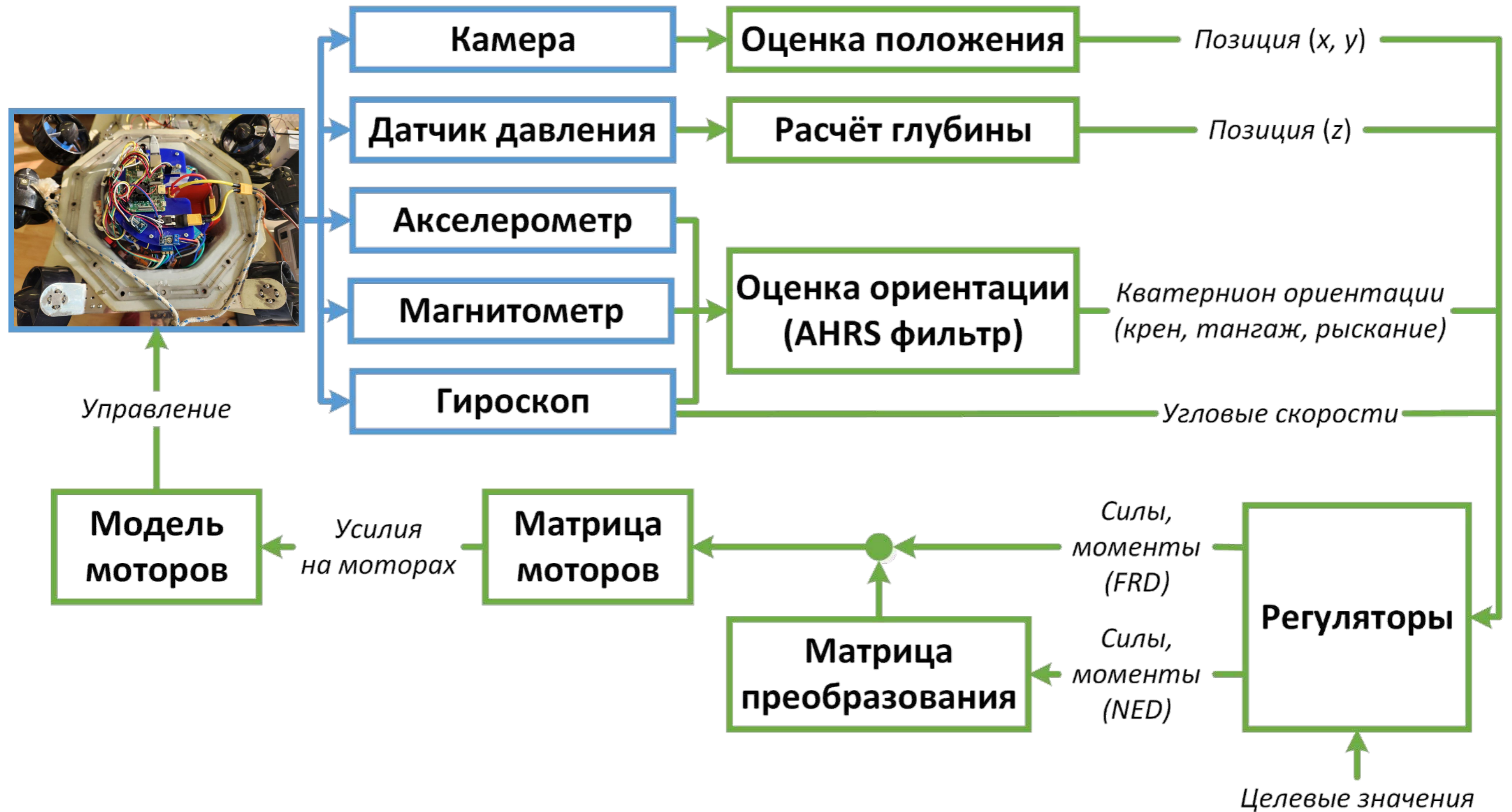
# Объект управления



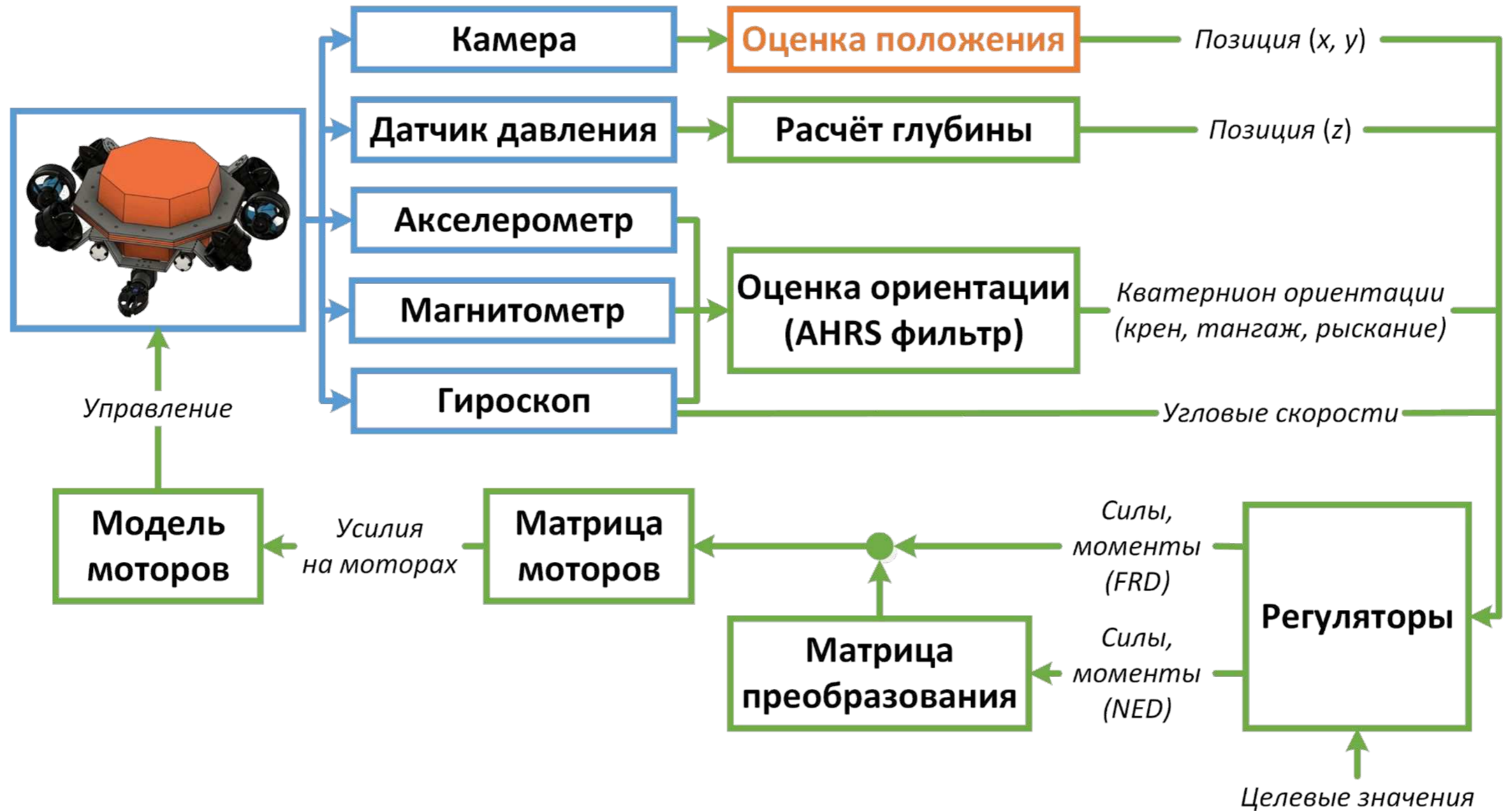
- Масса: 8.4 кг
- Объем: 8.7 дм<sup>3</sup>
- Габариты: 50 см x 50 см x 25 см
- Количество моторов: 6
- Степеней свободы: 6



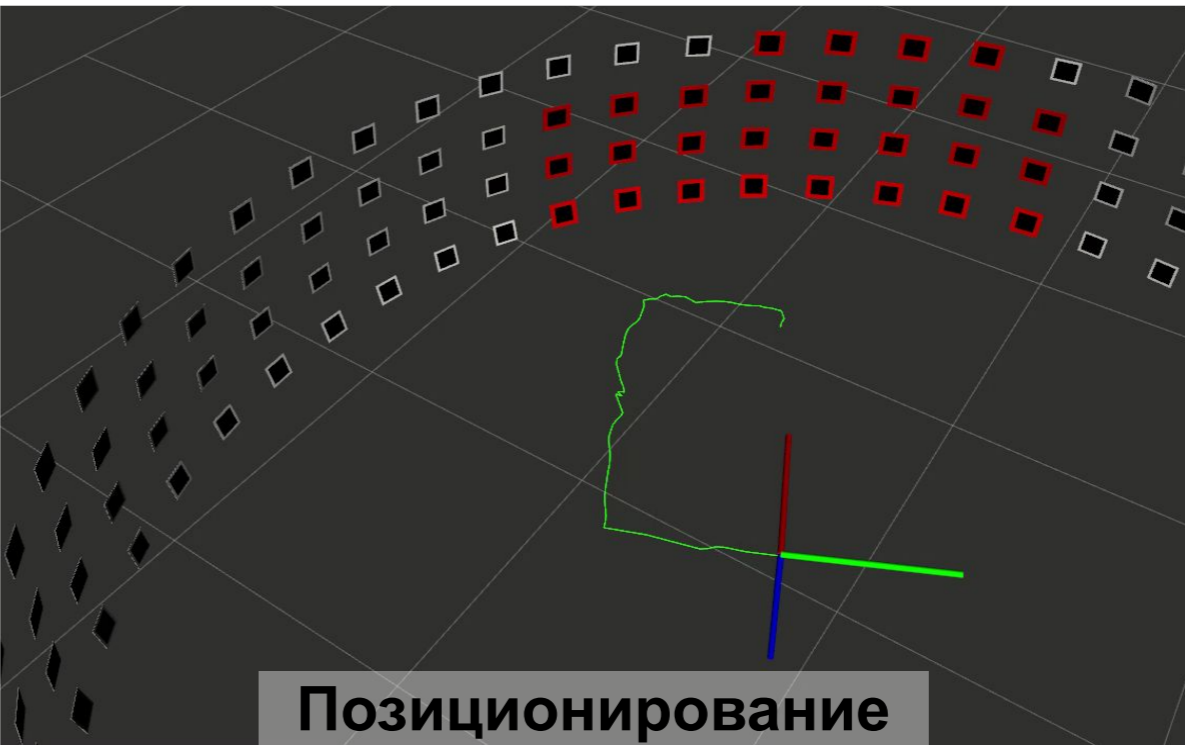
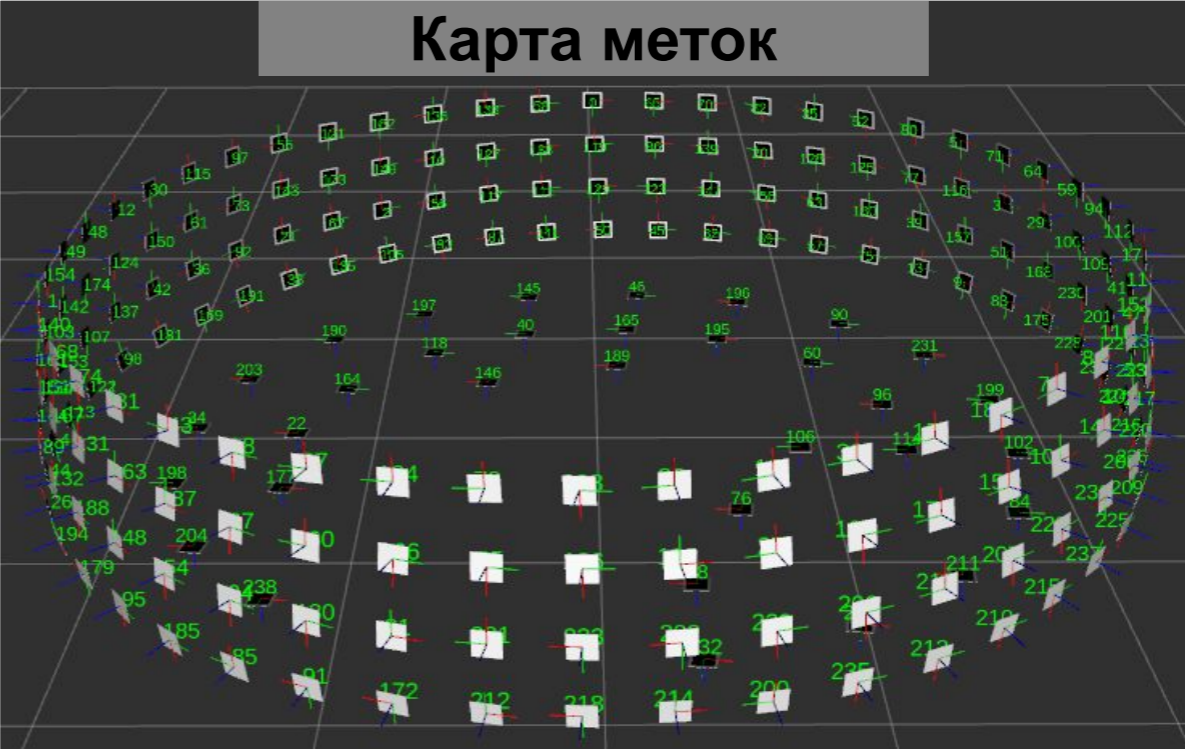
# Система управления



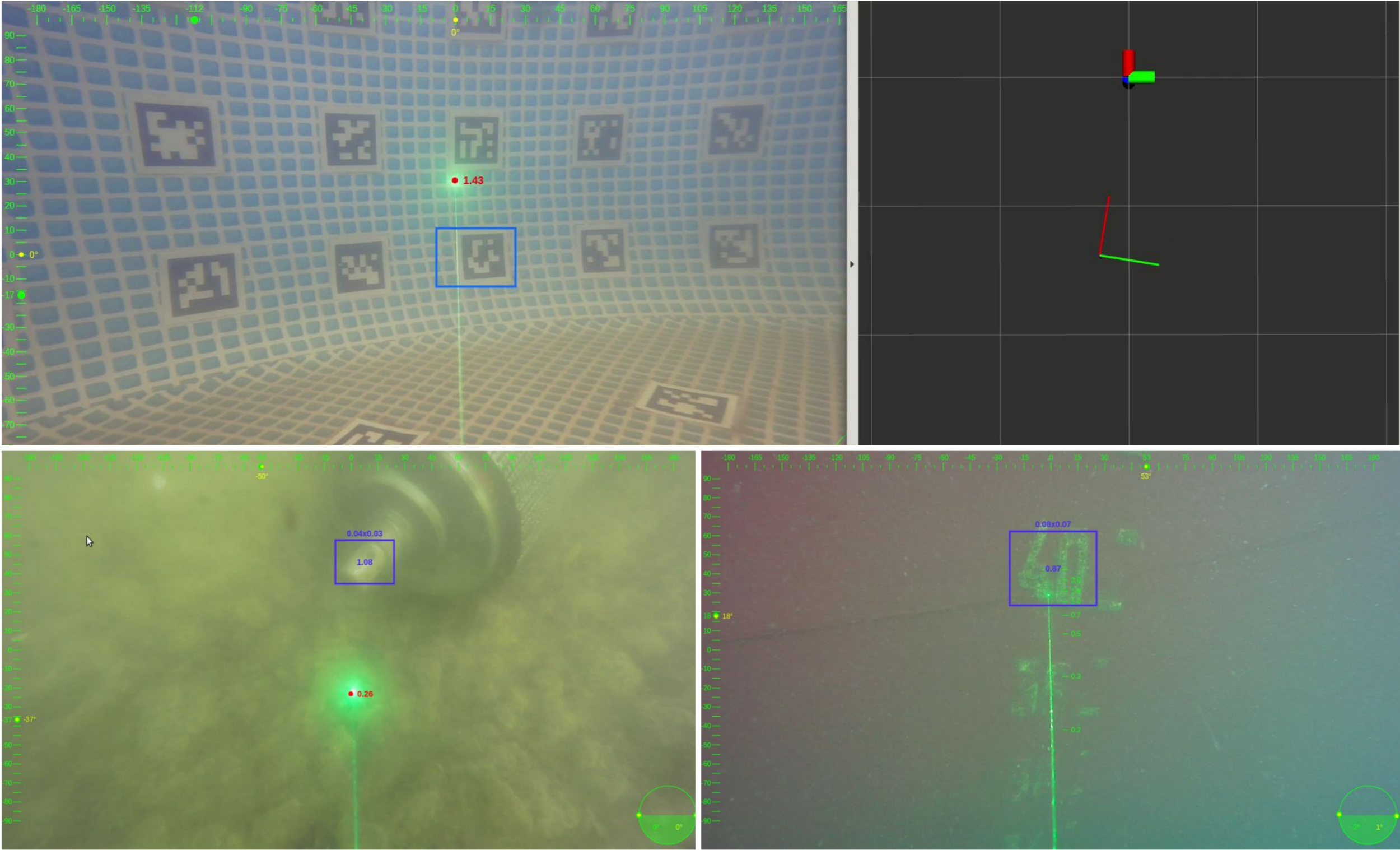
# Система управления



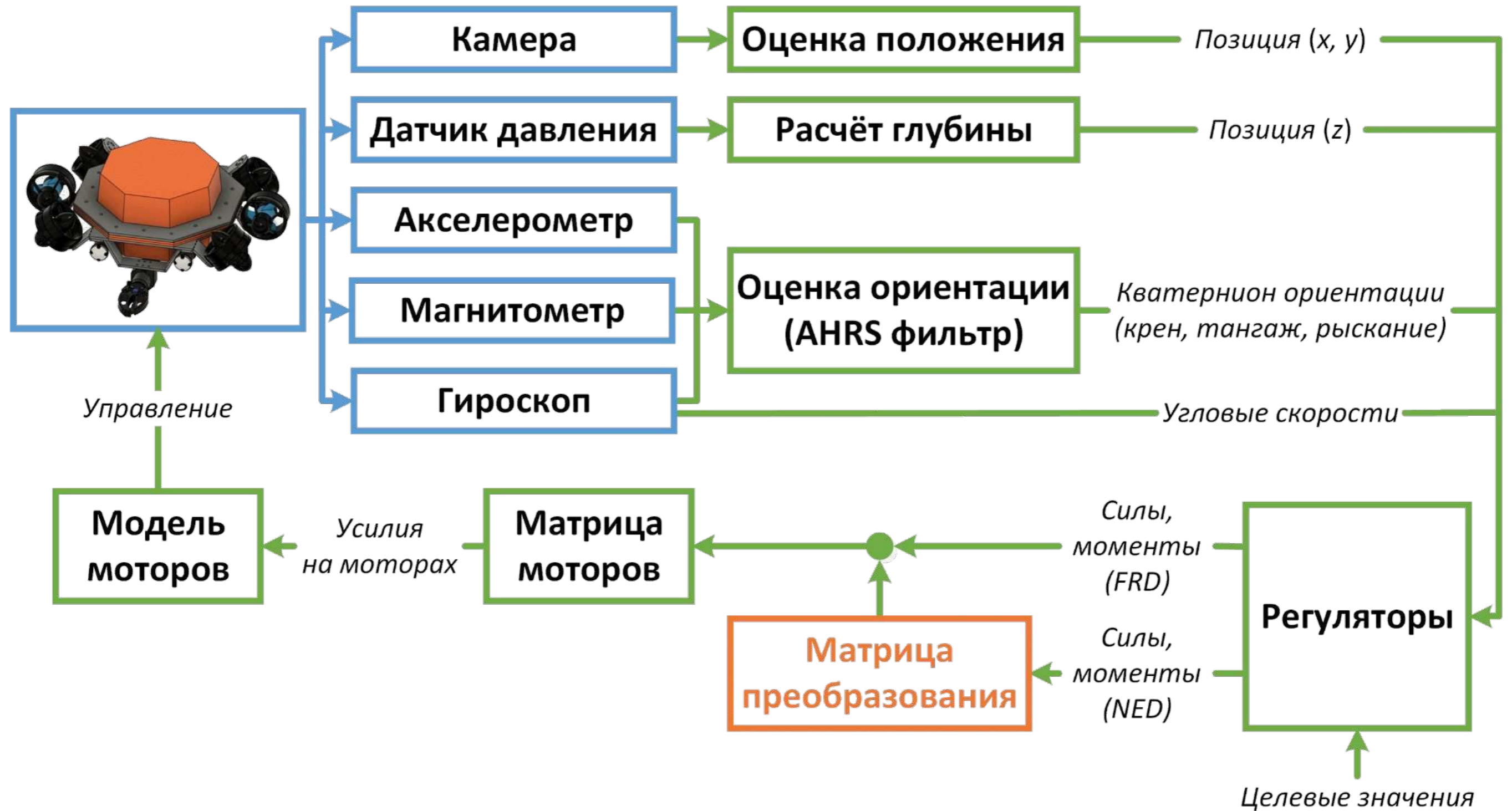
# Оценка положения по меткам



# Оценка положения относительно наблюдаемого объекта



# Система управления



# Матрица преобразования

Линейные ( $p$ ) и угловые ( $a$ ) положения в глобальной системе координат (NED):

$$P_{NED} = \begin{bmatrix} p \\ a \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

Линейные ( $v$ ) и угловые ( $w$ ) скорости в локальной системе координат (FRD):

$$V_{FRD} = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix}$$

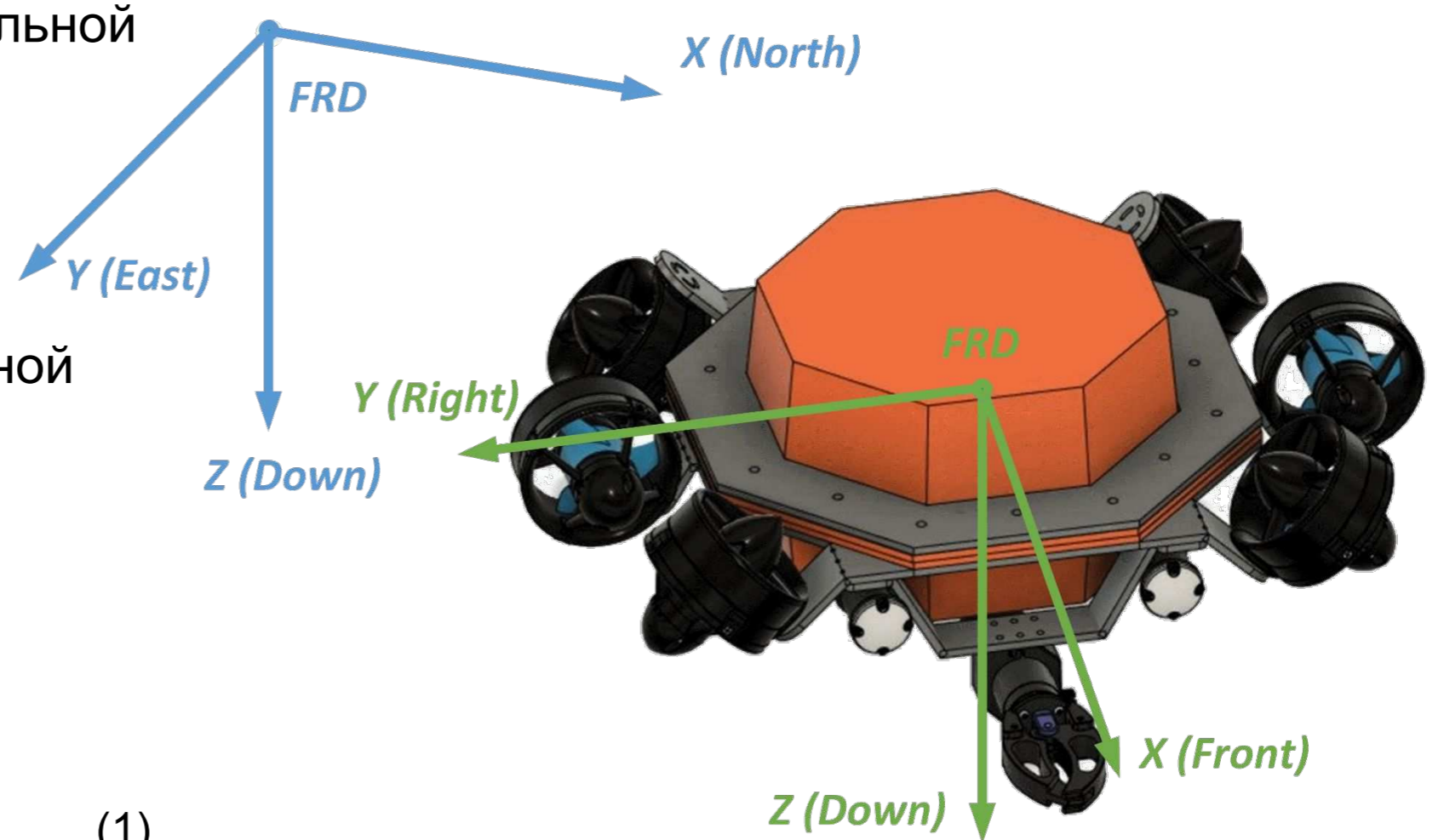
Матрица преобразования из FRD в NED:

$$\dot{P}_{NED} = \mathcal{R}(a)V_{FRD} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_p & 0 \\ 0 & \mathcal{R}_a \end{bmatrix} V_{FRD} \quad (1)$$

$$\mathcal{R}_p = \begin{bmatrix} c_y c_z & s_x s_y c_z - c_x s_z & s_x s_z + c_x s_y c_z \\ c_y s_z & c_x c_z + s_x s_y s_z & c_x s_y s_z - s_x c_z \\ -s_y & s_x c_y & c_x c_y \end{bmatrix}$$

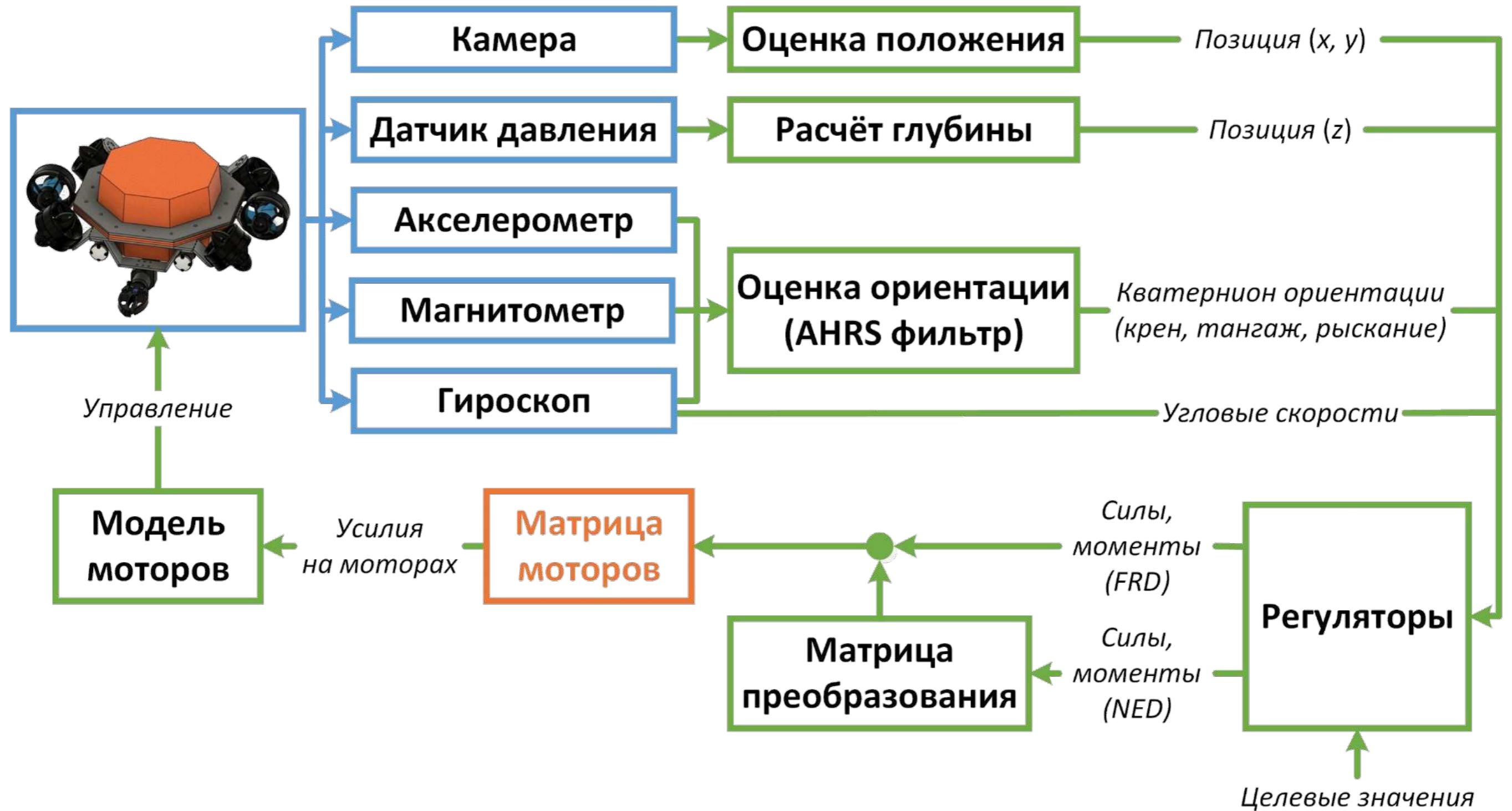
$$\mathcal{R}_a = \begin{bmatrix} 1 & s_x s_y / c_y & c_x s_y / c_y \\ 0 & c_x & -s_x \\ 0 & s_x / c_y & c_x / c_y \end{bmatrix}$$

$$\sin(a_i) = s_i, \cos(a_i) = c_i, i = x, y, z$$





# Система управления



# Матрица моторов

Силы и моменты ( $F$ ) создаваемые силой ( $f_i$ ) тяги  $i$ -го мотора:

$$F = \begin{bmatrix} D_i \\ R_i \times D_i \end{bmatrix} f_i = T_i f_i \quad (2)$$

$$D_i = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \text{ единичный вектор} \\ \text{направления}$$

$$R_i = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \text{ точка приложения} \\ \text{силы тяги мотора}$$

Общая матрица 6x6 ( $T$ ) пересчёта усилий моторов:

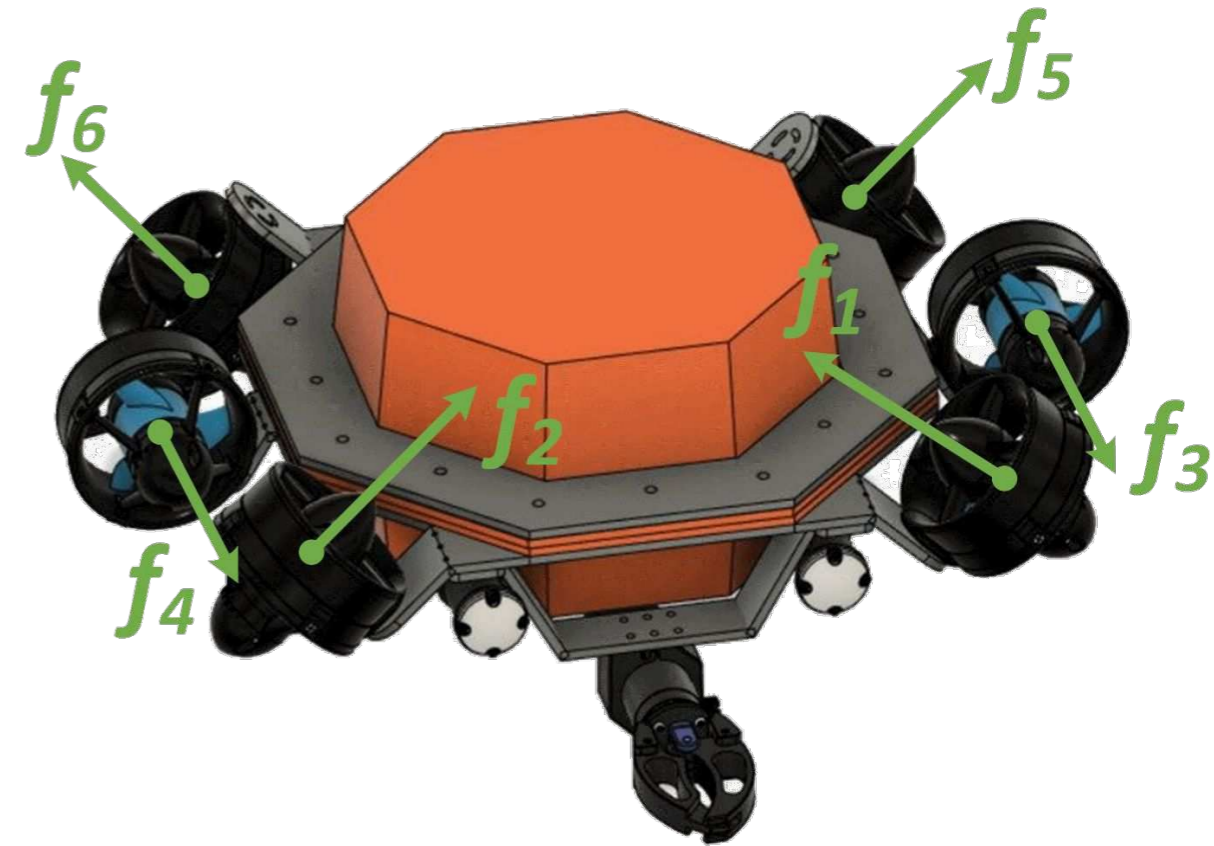
$$T = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5 \quad T_6]$$

$$F = T f \quad (3)$$

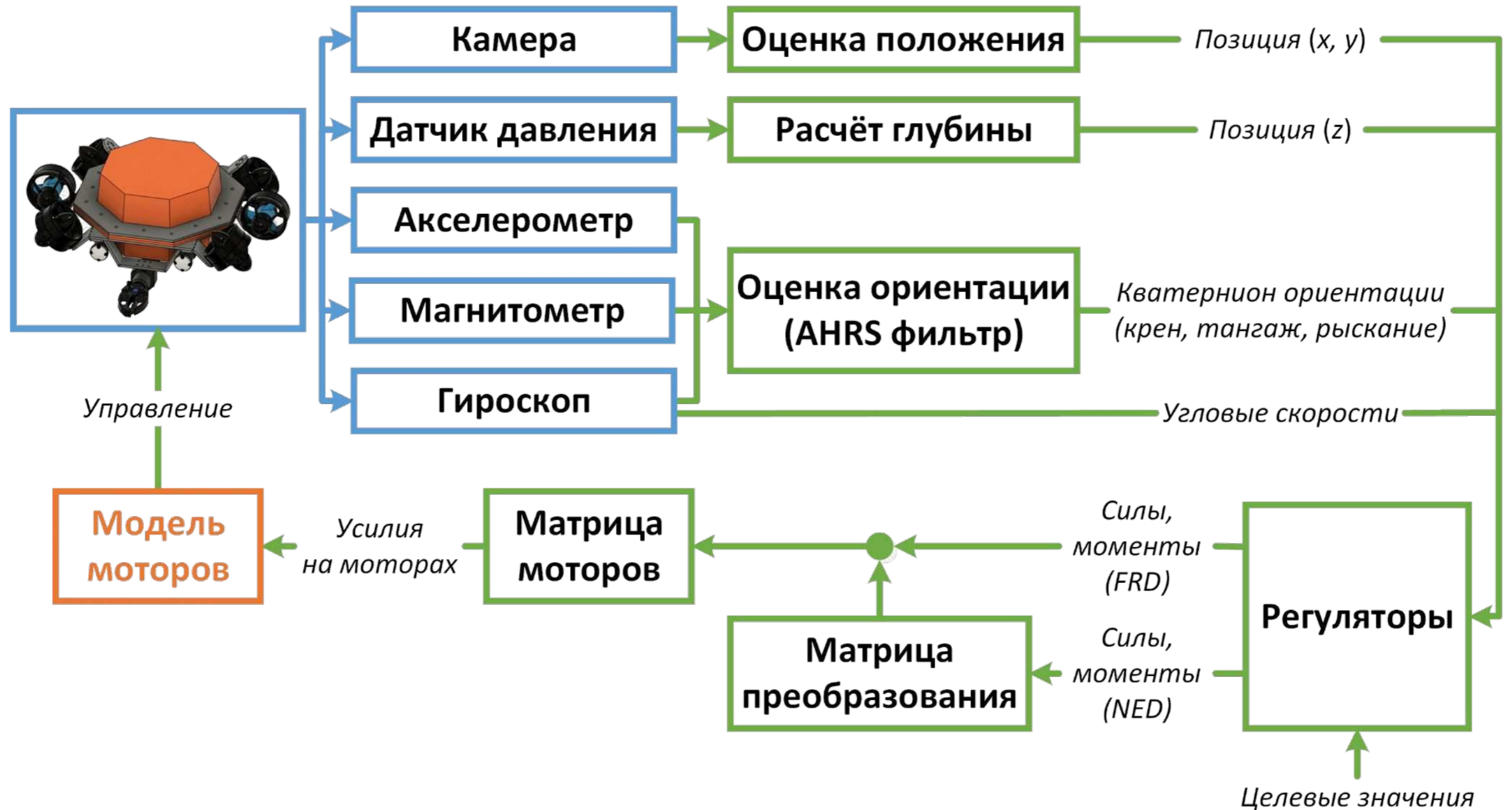
$$f = T^{-1} F \quad (4)$$

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \text{ результирующие} \\ \text{силы и моменты}$$

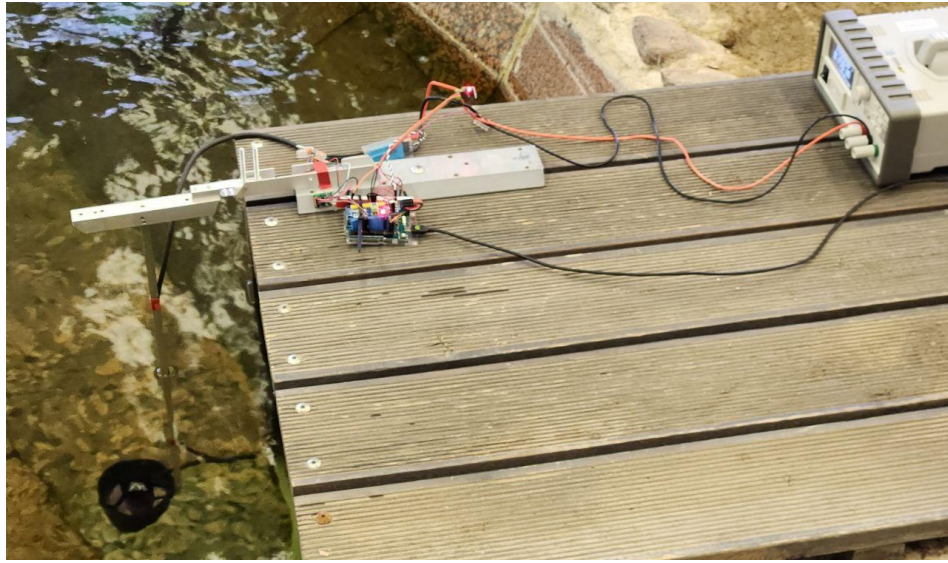
$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \text{ силы тяги моторов}$$



# Система управления



# Модель моторов



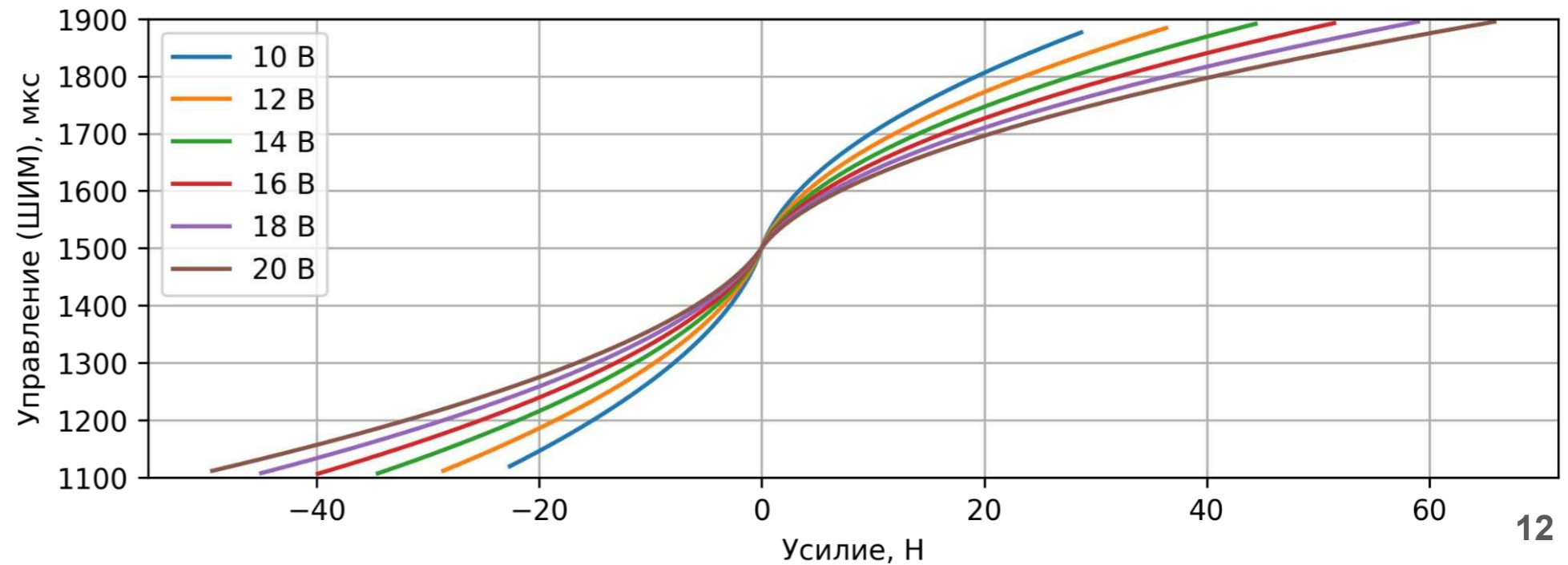
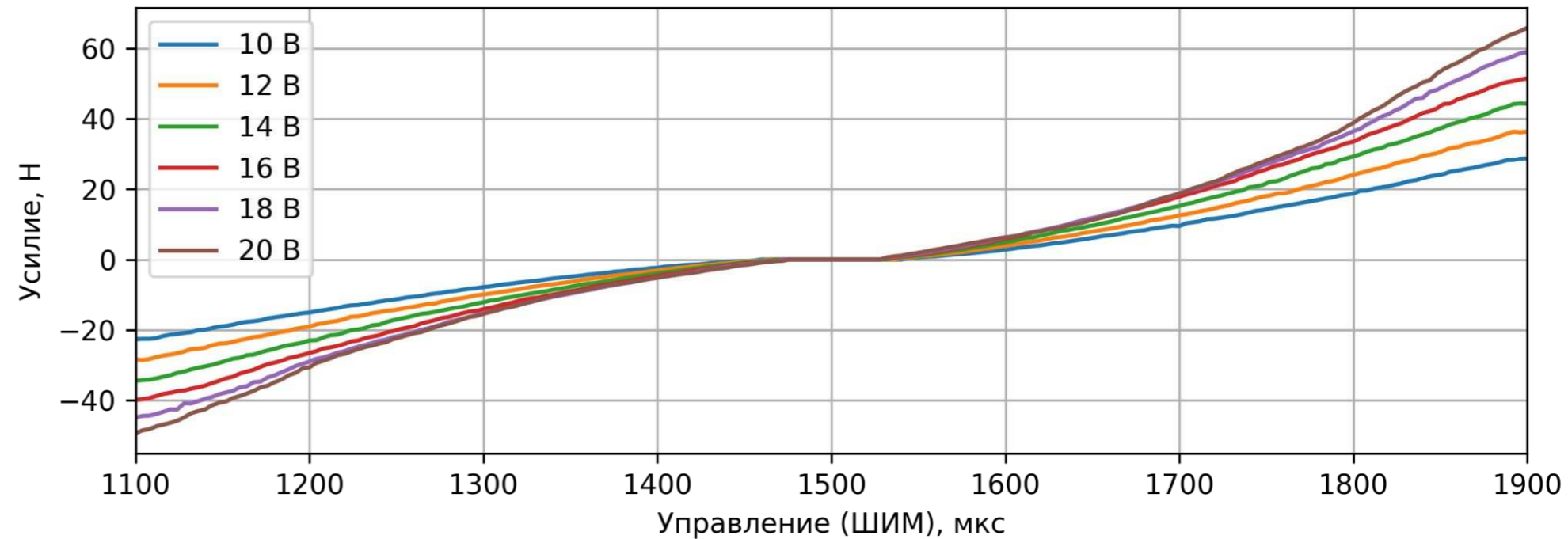
**Экспериментальные данные**  
зависимости *усилия* на моторе от  
управления *И* напряжения



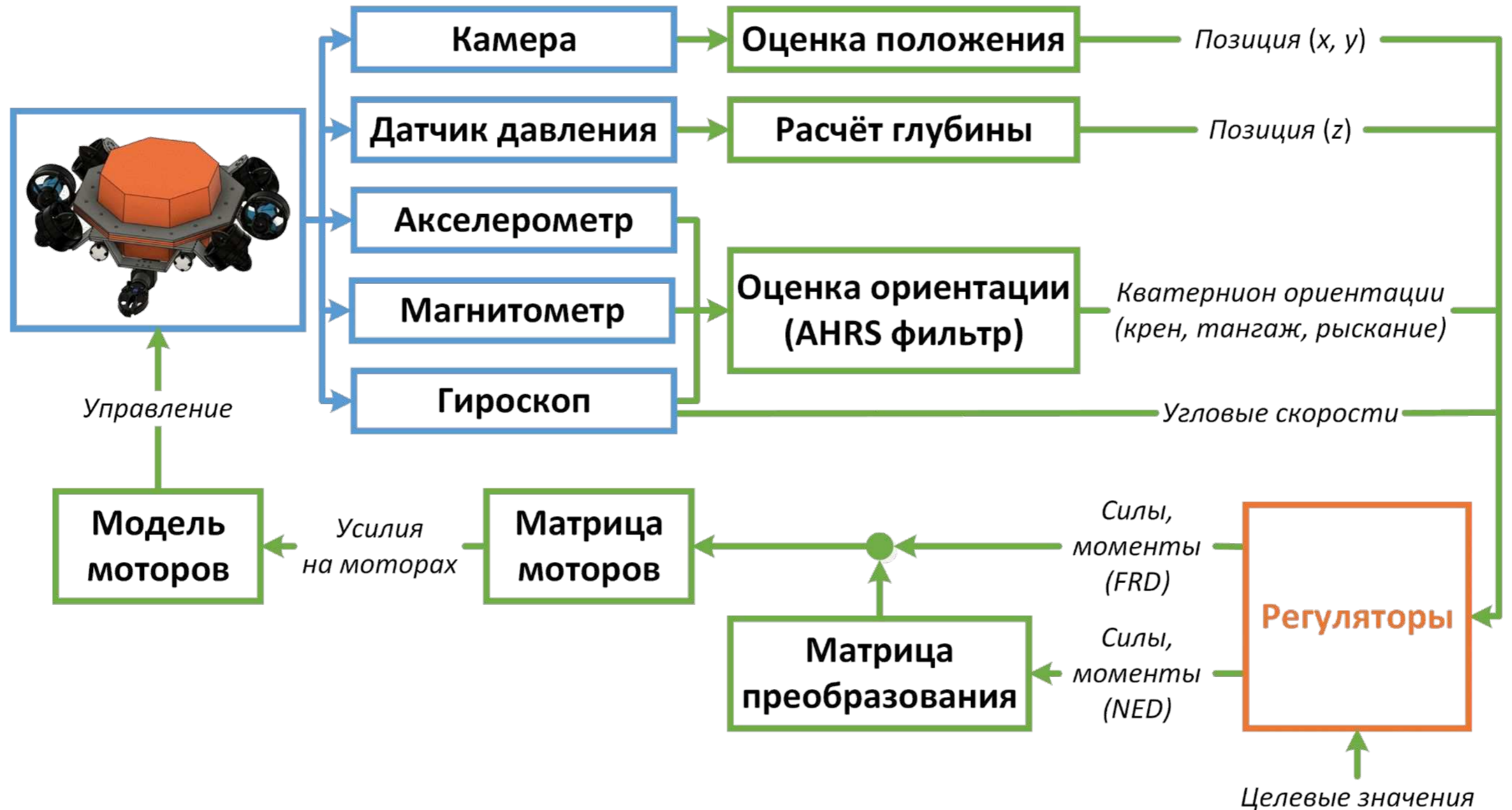
**Модель пересчёта *усилий* на  
моторе в управление**

*усилие* = функция(управление, напряжение)

*управление* = функция(усилие, напряжение)



# Система управления



# Конкурс по синтезу регуляторов

## Этап 1

### Регулятор ориентации

1. Переходный процесс при ступенчатом изменении углов **без груза** в схвате
2. Имитация слежения за движущимся объектом **без груза** в схвате
3. Переходный процесс при ступенчатом изменении углов **с грузом** в схвате
4. Переходный процесс при ступенчатом изменении полезной нагрузки (**сброс груза**)
5. Имитация слежения за движущимся объектом **с грузом** в схвате

*Дата испытаний: 19 мая 2023 г.*

## Этап 2

### Регулятор ориентации и удержания позиции

1. Удержание позиции (с использованием лазера) **в бассейне без возмущения**
2. Удержание позиции (с использованием лазера) **в бассейне с возмущением**
3. Удержание позиции (с использованием лазера) **в пруду без возмущения**
4. Удержание позиции (с использованием лазера) **в пруду с возмущением**

*Дата испытаний: 31 августа 2023 г.*

# Участники конкурса

	Лаборатория	Название команды	Состав команды	Этап 1	Этап 2
1	7	Lab7a	Глуценко Антон Игоревич Ласточкин Константин Андреевич	V	V
2	7	Lab7b	Александров Вадим Альбертович Шатов Дмитрий Владимирович	V	V
3	17	Lab17	Абдулов Александр Викторович Абраменков Александр Николаевич	V	
4	37	Lab37	Антипов Алексей Семенович Кокунько Юлия Георгиевна	V	V
5	38/82	Lab38	Потапов Антон Павлович Галяев Иван Андреевич		V
6	1	Lab1	Кустов Аркадий Юрьевич Юрченков Александр Викторович Белов Иван Романович		*

# Лаборатория 7 (Lab7a)



Ласточкин Константин Андреевич  
М.Н.С.



Глущенко Антон Игоревич  
Д.Т.Н., В.Н.С.



# Лаборатория 7 (Lab7b)



Александров Вадим Альбертович  
К.Т.Н., С.Н.С.



Шатов Дмитрий Владимирович  
К.Т.Н., С.Н.С.

# Лаборатория 17 (Lab17)

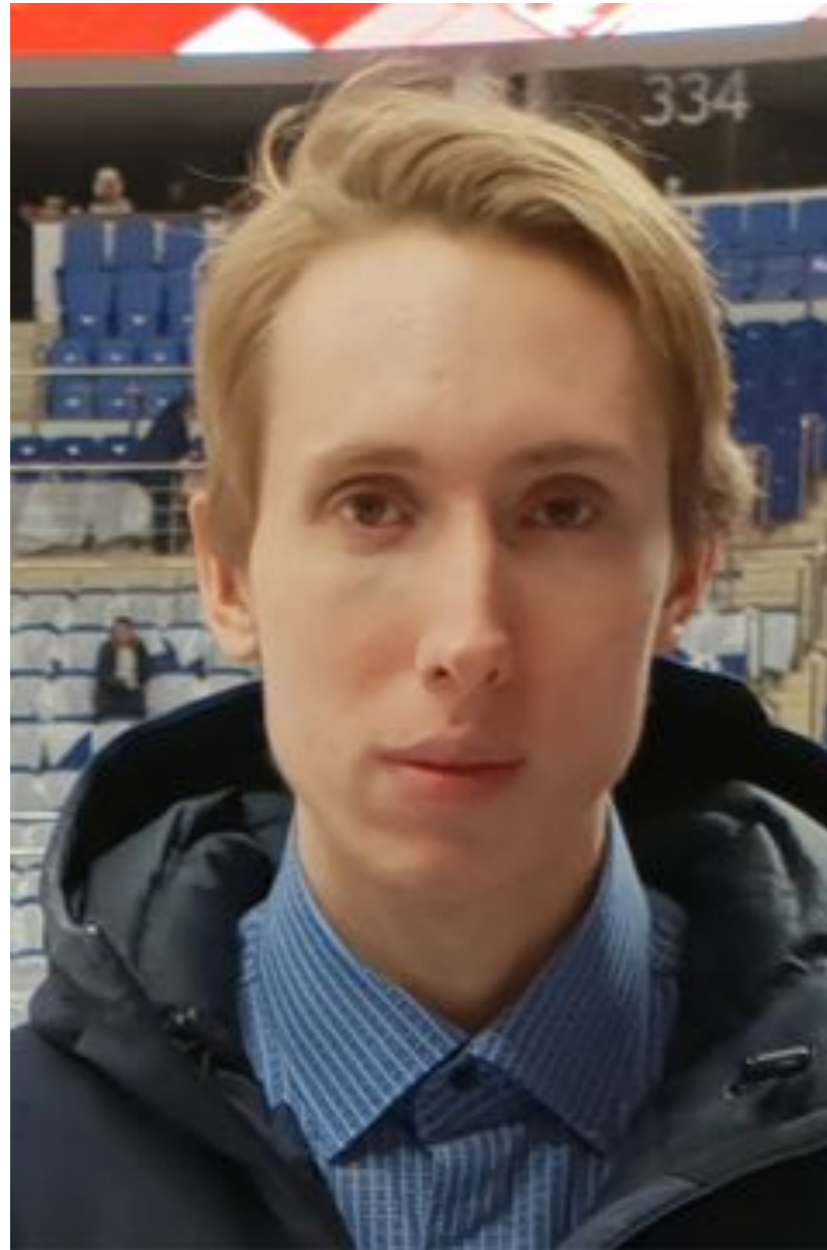


Абдулов Александр Викторович  
Н.С.

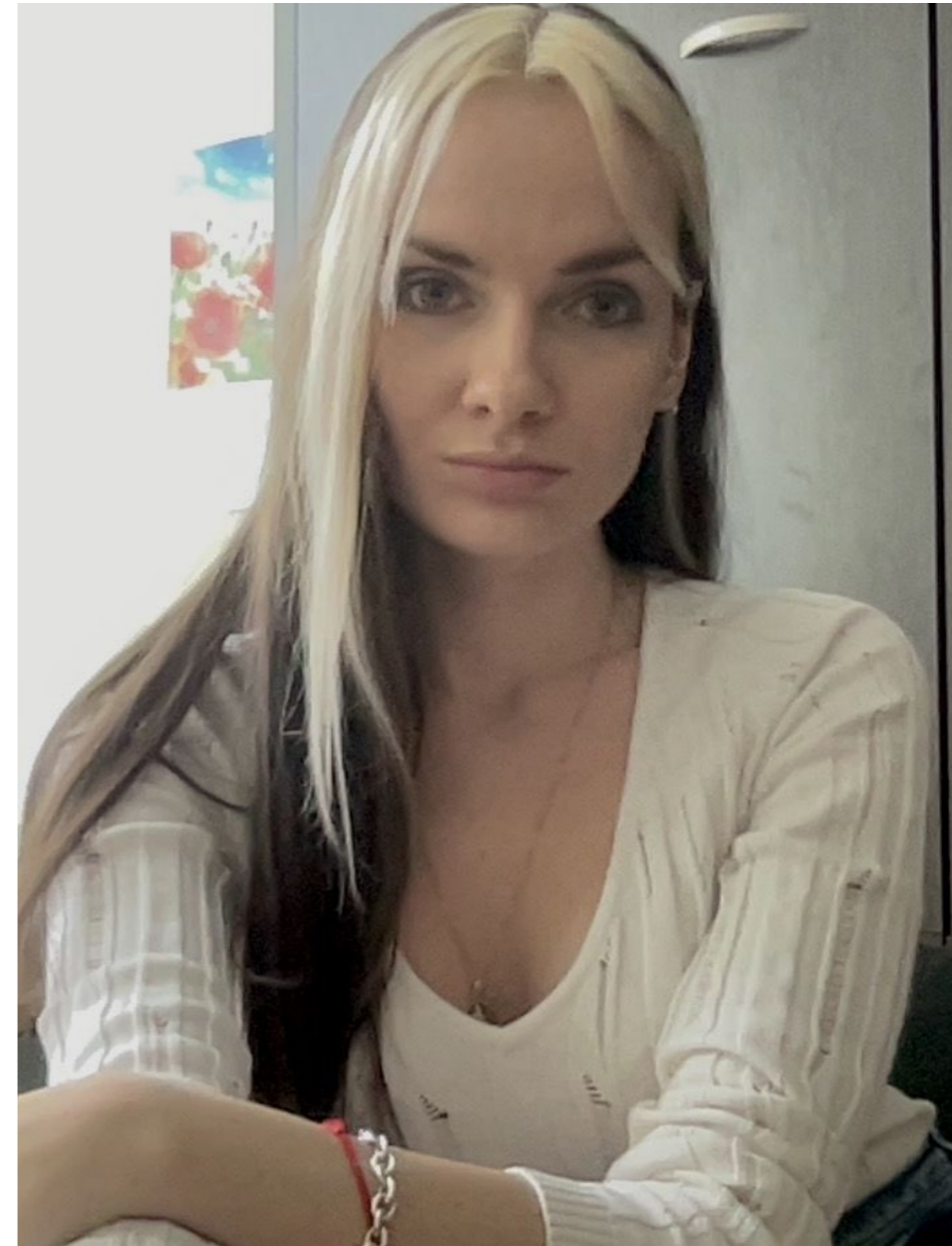


Абраменков Александр Николаевич  
Н.С.

# Лаборатория 37 (Lab37)



Антипов Алексей Семенович  
К.Т.Н., С.Н.С.



Кокунько Юлия Георгиевна  
М.Н.С.

# Лаборатории 38, 82 (Lab38)



Потапов Антон Павлович  
студент, математик, лаб. 38



Галяев Иван Андреевич  
м.н.с., лаб 82

# Лаборатория 1 (Lab1)



Белов Иван Романович  
к.ф.-м.н., с.н.с.

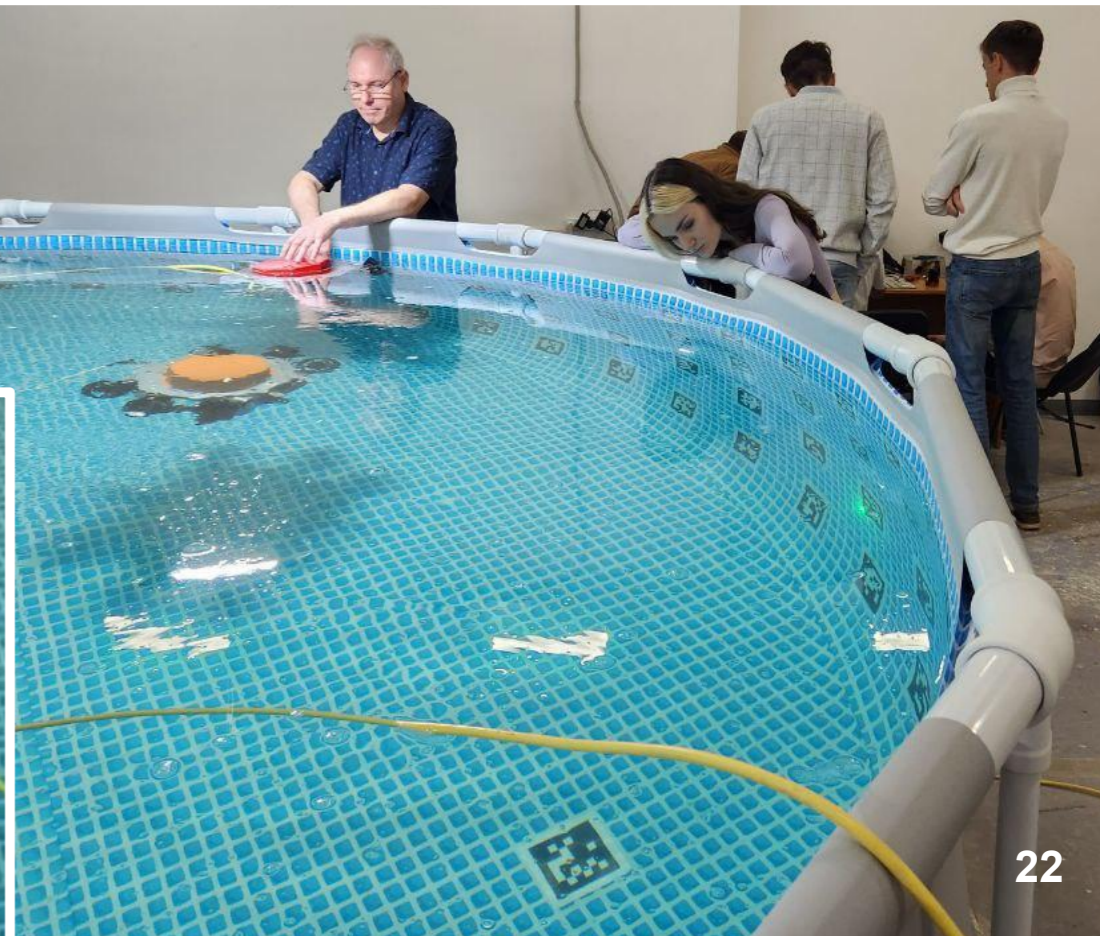
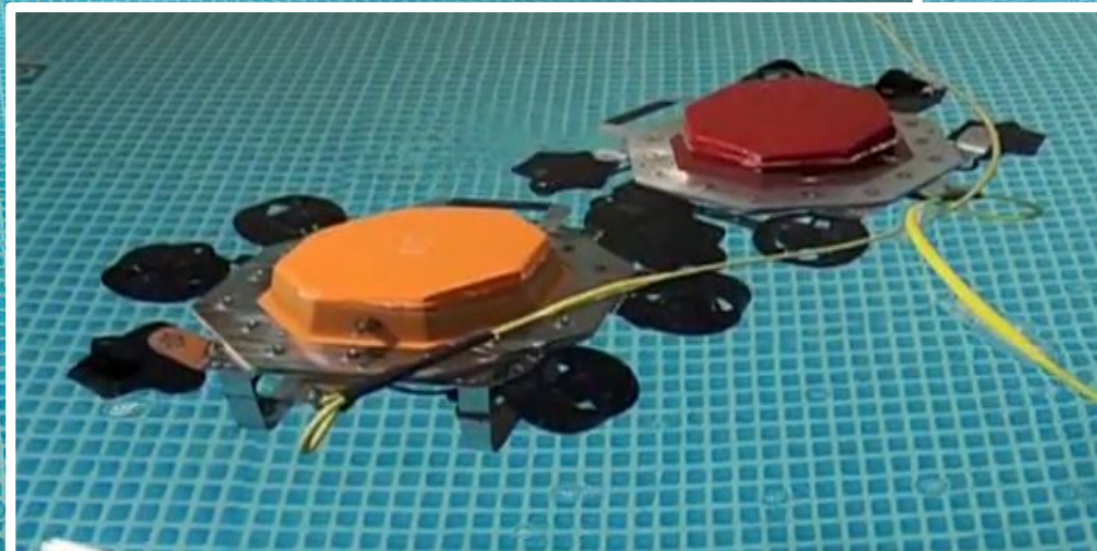
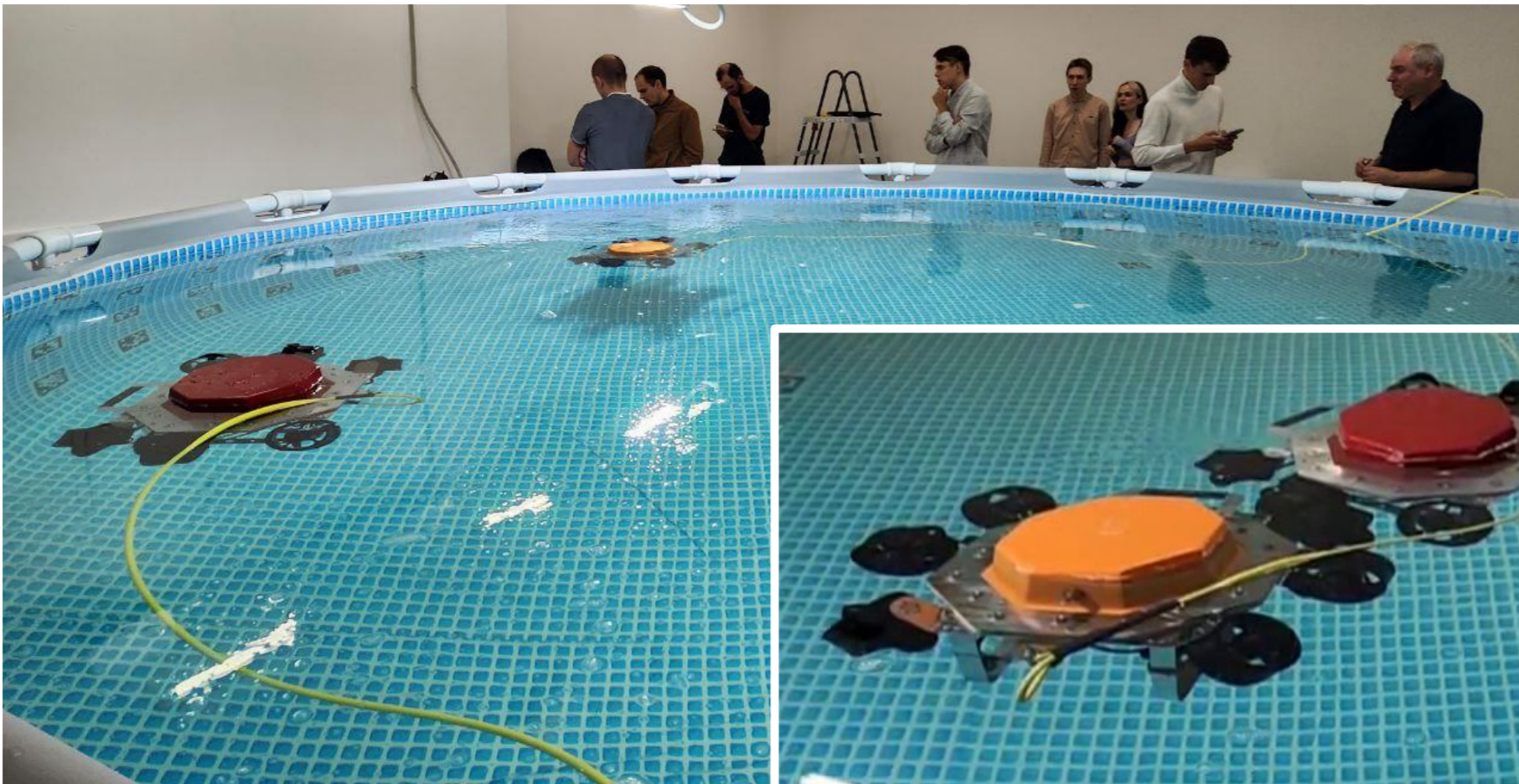
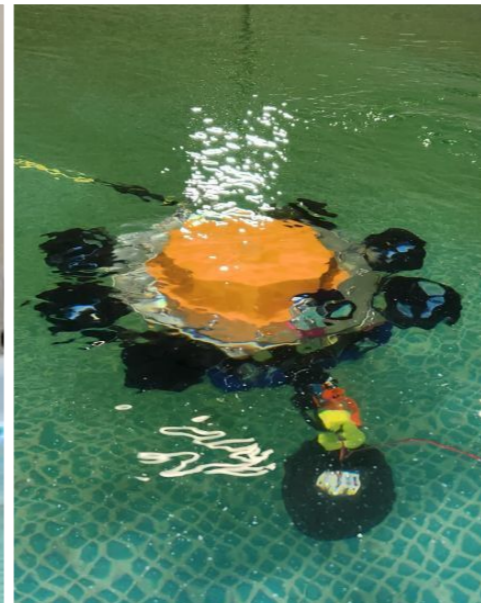
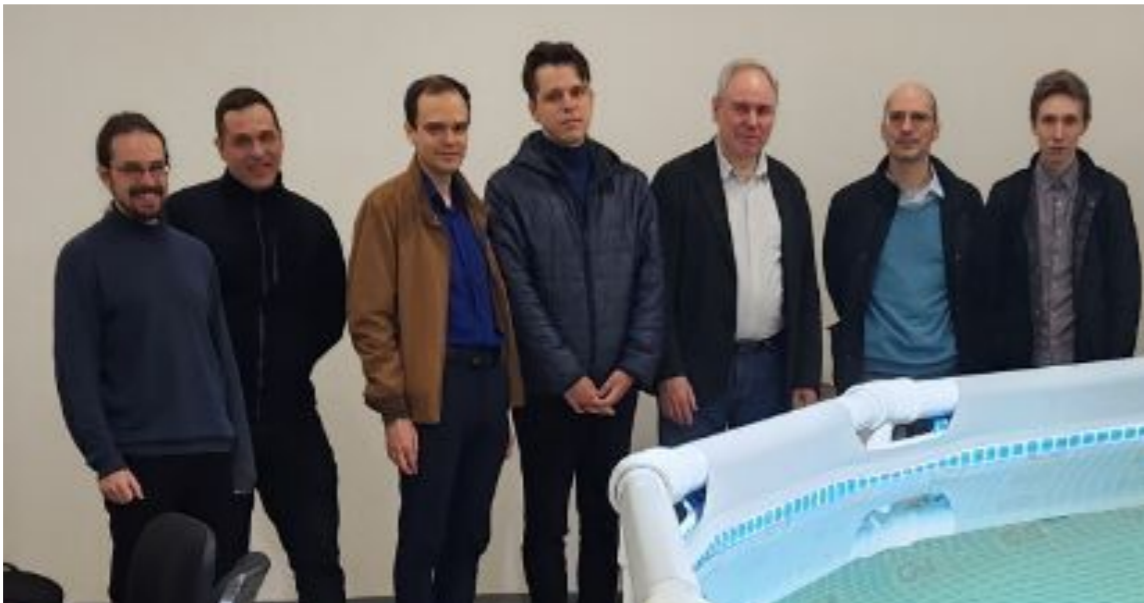


Юрченков Александр Викторович  
к.ф.-м.н., с.н.с.

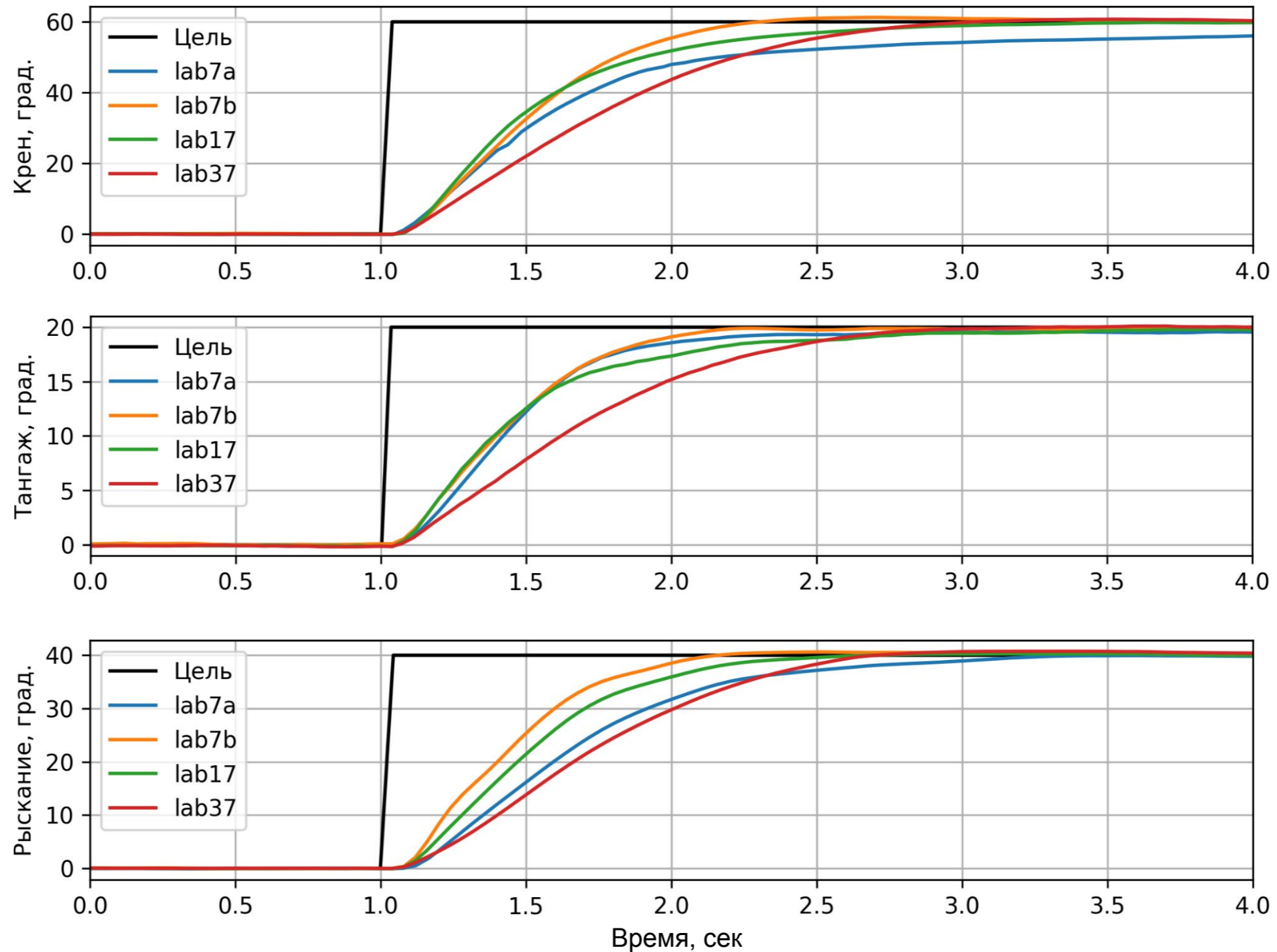


Кустов Аркадий Юрьевич  
к.ф.-м.н., с.н.с.

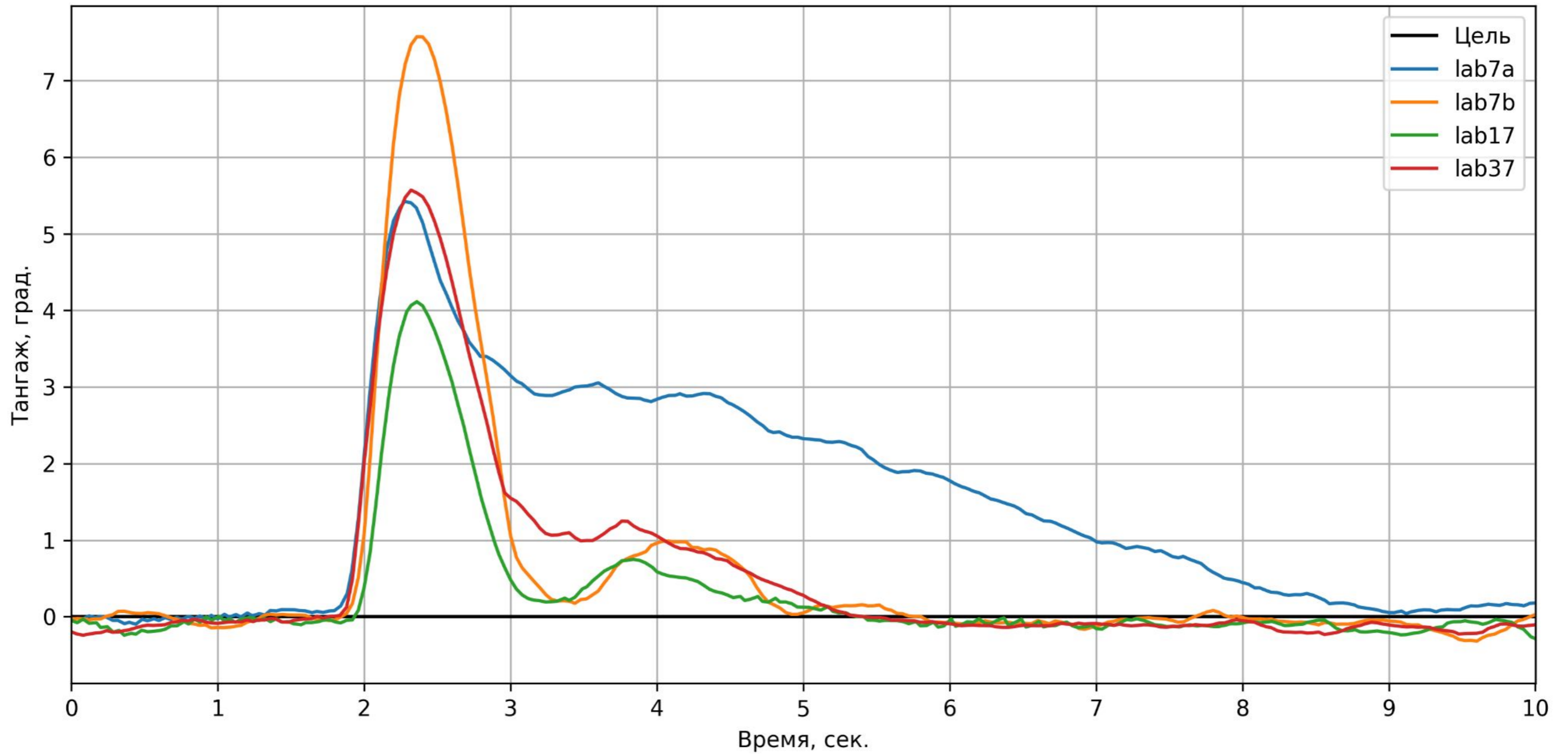
# Проведение испытаний



# Этап 1. Переходные процессы с грузом (задание 3)

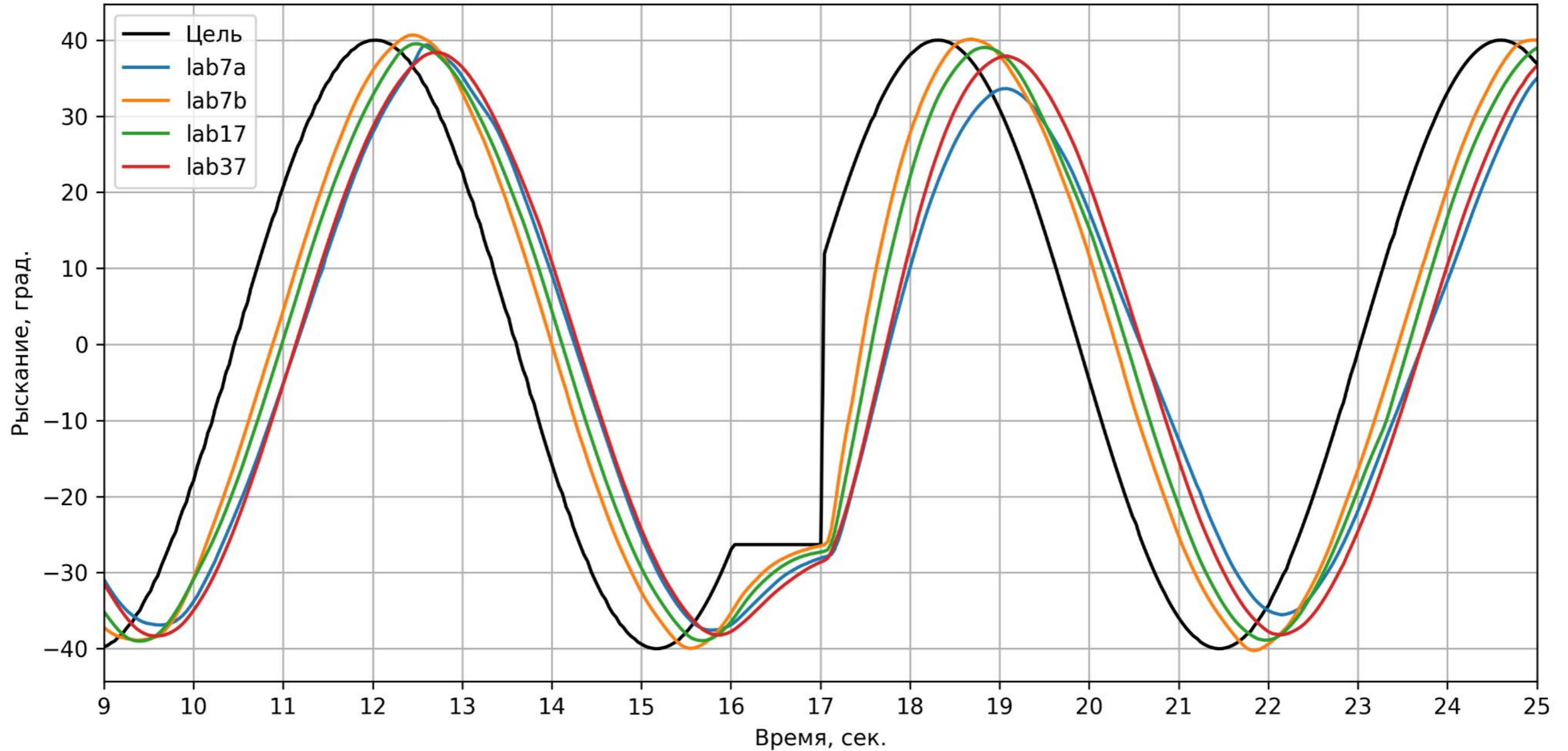


# Этап 1. Сброс груза (задание 4)





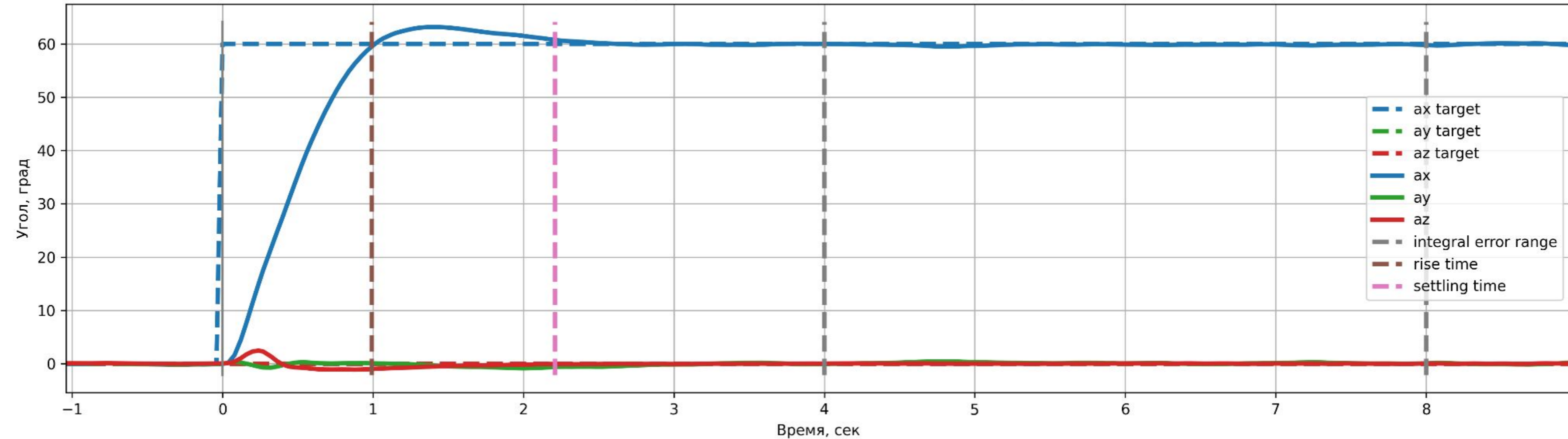
# Этап 1. Слежение за целью с грузом (задание 5)



# Этап 1. Автоматически оцениваемые показатели

lab7b

Интегральная ошибка:  $a_x=0.413$   $a_y=0.351$   $a_z=0.057$  | Интегральная ошибка (переходной процесс):  $a_y=0.800$   $a_z=1.330$   
 Время нарастания: 1.000 сек | Время переходного процесса: 2.200 сек | Перерегулирование: 0.053



rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)		
			roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw
1.000	2.200	0.053	0.413	0.351	0.057	—	0.800	1.330

# Этап 1. Фрагмент таблицы результатов по заданиям

task index	lab17									
	plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)		
					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw
101	<a href="#">plot</a>	1.801	1.801	0.000	0.251	0.124	0.075	—	0.689	1.073
102	<a href="#">plot</a>	1.880	1.880	0.000	0.142	0.125	0.175	—	0.848	0.515
103	<a href="#">plot</a>	1.720	1.720	0.000	0.320	0.300	0.150	—	1.067	3.109
104	<a href="#">plot</a>	1.720	2.520	0.000	0.393	0.231	0.368	—	0.767	1.569
105	<a href="#">plot</a>	1.560	1.560	0.000	0.185	0.157	0.401	0.378	—	0.332
106	<a href="#">plot</a>	1.521	1.521	0.000	0.359	0.217	0.243	0.735	—	0.752
107	<a href="#">plot</a>	1.400	1.400	0.000	0.143	0.213	0.341	0.506	—	0.896
108	<a href="#">plot</a>	1.564	1.564	0.000	0.287	0.239	0.422	0.798	—	0.605
109	<a href="#">plot</a>	1.200	1.200	0.000	0.305	0.183	0.221	0.910	0.623	—
110	<a href="#">plot</a>	1.239	2.600	0.004	0.153	0.094	0.376	0.681	0.232	—
111	<a href="#">plot</a>	1.600	5.240	0.027	0.412	0.341	0.877	0.635	0.317	—
112	<a href="#">plot</a>	0.960	0.960	0.000	0.638	0.219	0.426	0.715	0.500	—
113	<a href="#">plot</a>	1.600	1.600	0.000	0.196	0.144	0.099	—	—	—
114	<a href="#">plot</a>	1.320	1.320	0.000	0.212	0.194	0.232	—	—	—
score	47.359									

# Этап 1. Таблица результатов по заданиям

## Задание 1

task index	lab7a										lab7b										lab17										lab37									
	plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)		
					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw
101	plot	5.759	5.759	0.000	3.901	0.156	0.279	—	1.227	1.272	plot	1.000	2.200	0.053	0.413	0.351	0.057	—	0.800	1.330	plot	1.801	1.801	0.000	0.251	0.124	0.075	—	0.689	1.073	plot	1.680	3.080	0.014	0.299	0.190	3.609	—	0.518	4.776
102	plot	5.113	5.113	0.000	3.511	0.472	0.268	—	1.108	1.116	plot	0.929	1.890	0.074	0.313	0.209	0.186	—	1.092	0.949	plot	1.880	1.880	0.000	0.142	0.125	0.175	—	0.848	0.515	plot	1.600	1.600	0.000	0.210	0.119	0.085	—	0.532	1.389
103	plot	5.602	5.602	0.000	4.168	1.023	0.088	—	1.998	0.998	plot	0.990	2.160	0.061	0.388	0.341	0.108	—	1.021	1.352	plot	1.720	1.720	0.000	0.320	0.300	0.150	—	1.067	3.109	plot	1.640	1.640	0.000	0.293	0.223	0.948	—	0.328	2.280
104	plot	5.162	5.162	0.000	4.369	0.553	0.907	—	0.791	1.588	plot	0.930	6.809	0.085	0.477	0.294	0.979	—	1.212	1.847	plot	1.720	2.520	0.000	0.393	0.231	0.368	—	0.767	1.569	plot	1.600	1.600	0.000	0.395	0.396	0.536	—	0.481	1.314
105	plot	0.804	0.804	0.000	0.237	0.261	0.739	0.946	—	0.667	plot	1.120	2.880	0.000	0.327	0.094	0.393	1.046	—	1.480	plot	1.560	1.560	0.000	0.185	0.157	0.401	0.378	—	0.332	plot	1.680	2.440	0.000	0.412	0.197	0.416	0.799	—	1.616
106	plot	0.791	0.791	0.000	0.716	0.297	0.328	0.716	—	0.452	plot	0.919	0.919	0.000	0.139	0.144	0.355	0.205	—	0.301	plot	1.521	1.521	0.000	0.359	0.217	0.243	0.735	—	0.752	plot	1.559	1.559	0.000	0.266	0.181	0.432	0.505	—	0.173
107	plot	0.801	2.483	0.040	0.321	0.268	0.290	1.407	—	1.999	plot	0.880	1.120	0.000	0.140	0.105	0.064	1.388	—	0.837	plot	1.400	1.400	0.000	0.143	0.213	0.341	0.506	—	0.896	plot	1.600	1.600	0.000	0.239	0.153	0.225	0.852	—	0.632
108	plot	0.838	0.838	0.000	0.420	0.570	0.152	0.392	—	0.569	plot	0.960	0.960	0.000	0.365	0.291	0.345	0.928	—	0.445	plot	1.564	1.564	0.000	0.287	0.239	0.422	0.798	—	0.605	plot	1.521	1.521	0.000	0.318	0.415	0.303	0.324	—	0.326
109	plot	1.351	6.357	0.027	1.153	0.307	0.528	1.088	0.353	—	plot	0.800	3.600	0.046	0.427	0.343	1.068	1.825	0.861	—	plot	1.200	1.200	0.000	0.305	0.183	0.221	0.910	0.623	—	plot	1.600	3.320	0.094	0.369	0.256	0.786	0.698	0.489	—
110	plot	3.243	3.243	0.000	0.493	0.173	1.117	0.848	0.703	—	plot	0.720	2.522	0.057	0.281	0.229	0.159	1.457	0.981	—	plot	1.239	2.600	0.004	0.153	0.094	0.376	0.681	0.232	—	plot	1.560	3.321	0.046	0.307	0.216	0.336	1.178	0.350	—
111	plot	1.367	1.367	0.000	0.139	0.114	0.484	0.673	0.376	—	plot	0.920	0.920	0.000	0.200	0.165	0.108	0.760	0.350	—	plot	1.600	5.240	0.027	0.412	0.341	0.877	0.635	0.317	—	plot	1.640	1.640	0.000	0.354	0.160	0.180	1.066	0.524	—
112	plot	1.439	4.191	0.011	0.701	0.286	0.606	1.075	0.408	—	plot	0.960	1.920	0.012	0.337	0.218	0.175	1.128	0.503	—	plot	0.960	0.960	0.000	0.638	0.219	0.426	0.715	0.500	—	plot	1.520	1.520	0.000	0.417	0.312	0.101	0.707	0.491	—
113	plot	1.400	1.400	0.000	0.217	0.505	0.044	—	—	—	plot	1.080	1.080	0.000	0.069	0.111	0.047	—	—	—	plot	1.600	1.600	0.000	0.196	0.144	0.099	—	—	—	plot	1.520	4.560	0.179	0.194	0.117	1.278	—	—	—
114	plot	1.439	1.439	0.000	0.365	0.414	0.079	—	—	—	plot	0.840	1.720	0.083	0.501	0.214	0.415	—	—	—	plot	1.320	1.320	0.000	0.212	0.194	0.232	—	—	—	plot	1.760	1.760	0.000	0.240	0.134	0.144	—	—	—
score	32.921										43.44										47.359										38.092									

## Задание 2

task index	lab7a										lab7b										lab17										lab37									
	plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)		
					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw
201	plot	—	—	—	2.914	27.350	86.123	—	—	—	plot	—	—	—	2.224	28.006	57.899	—	—	—	plot	—	—	—	2.950	27.396	72.366	—	—	—	plot	—	—	—	2.892	38.816	96.759	—	—	—
202	plot	—	—	—	2.497	28.339	88.273	—	—	—	plot	—	—	—	3.315	29.378	60.522	—	—	—	plot	—	—	—	3.072	28.545	75.172	—	—	—	plot	—	—	—	3.242	39.377	99.604	—	—	—
score	1.205										1.616										1.176										0.057									

## Задание 3

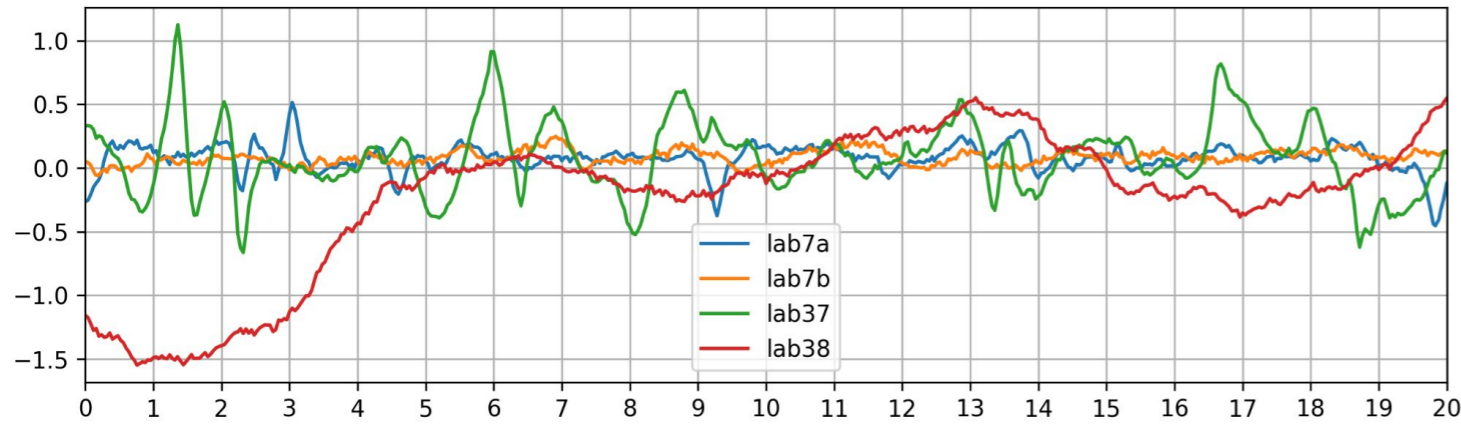
task index	lab7a										lab7b										lab17										lab37									
	plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)			plot	rise time	settling time	over-shoot	error (steady)			error (transient)		
					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw					roll	pitch	yaw	roll	pitch	yaw
301	plot	5.430	5.430	0.000	3.522	5.268	1.739	—	5.411	3.944	plot	1.160	1.960	0.021	0.385	0.499	0.110	—	1.725	0.683	plot	1.960	1.960	0.000	0.203	0.357	0.100	—	0.988	3.152	plot	1.800	1.800	0.000	0.376	0.676	0.984	—	0.936	0.945
302	plot	4.640	4.640	0.000	2.211	0.478	0.333	—	2.150	2.652	plot	1.121	2.480	0.007	0.094	0.100	0.299	—	1.548	1.444	plot	2.160	2.320	0.000	0.338	0.200	0.404	—	1.002	3.259	plot	1.880	1.880	0.000	0.401	0.172	0.206	—	0.878	1.414
303	plot	5.359	5.359	0.000	4.359	0.475	0.747	—	0.631	4.404	plot	1.160	1.520	0.014	0.219	0.484	0.167	—	1.391	1.027	plot	2.000	2.000	0.000	0.173	0.369	0.192	—	1.366	3.628	plot	3.000	5.800	0.012	0.266	0.387	2.864	—	1.034	1.685
304	plot	4.805	4.805	0.000	2.475	0.406	1.101	—	0.949	3.950	plot	1.120	1.840	0.005	0.188	0.195	0.303	—	0.855	1.013	plot	2.120	2.320	0.000	0.382	0.159	0.318	—	1.003	3.257	plot	1.960	1.960	0.000	0.259	0.312	0.156	—	0.704	3.910
305	plot	1.045	1.045	0.000	0.225	0.581	0.758	0.240	—	0.515	plot	0.960	0.960	0.000	0.149	0.120	0.106	0.897	—	0.980	plot	1.560	1.560	0.000	0.295	0.241	0.314	0.470	—	1.239	plot	1.506	2.796	0.005	0.294	0.382	0.496	0.843	—	1.179
306	plot	0.877	0.877	0.000	0.212	0.131	0.382	0.421	—	1.061	plot	0.960	4.400	0.004	0.175	0.125	1.060	0.178	—	0.644	plot	1.520	6.480	0.005	0.257	0.158	0.873	0.277	—	0.584	plot	1.531	5.240	0.003	0.283	0.117	0.797	0.458	—	0.312
307	plot	1.001	1.001	0.000	0.152	0.119	0.424	0.337	—	0.516	plot	1.084	1.084	0.000	0.133	0.067	0.074	0.181	—	0.094	plot	1.560	1.560	0.000	0.231	0.185	0.141	0.271	—	0.208	plot	1.600	1.600	0.000	0.414	0.299	0.118	0.352	—	0.259
308	plot	1.076	1.076	0.000	0.168	0.532	0.206	0.224	—	0.217	plot	1.042	1.042	0.000	0.171	0.157	0.073	0.192	—	0.130	plot	1.560	1.560	0.000	0.200	0.206	0.156	0.160	—	0.152	plot	1.640	1.640	0.000	0.241	0.300	0.068	0.207	—	0.084
309	plot	1.998	1.998	0.000	0.242	0.226	0.424	0.531	1.030	—	plot	1.040	1.040	0.000	0.135	0.153	0.197	0.846	0.555	—	plot	1.320	1.320	0.000	0.323	0.172	0.218	0.579	0.269	—	plot	1.520	1.520	0.000	0.408	0.268	0.204	0.598	0.302	—
310	plot	1.604	1.604	0.000	0.315	0.107	0.659	0.569	0.203	—	plot	1.000	1.000	0.000	0.154	0.126	0.212	0.825	0.445	—	plot	1.280	1.280	0.000	0.161	0.294	0.191	0.432	0.346	—	plot	1.603	1.603	0.000	0.214	0.165	0.269	0.461	0.488	—
311	plot	2.086	4.127	0.000	0.355	0.354	1.384	0.450	0.758	—	plot	1.000	1.000	0.000	0.223	0.143	0.218	1.034	0.895	—	plot	1.360	1.360	0.000	0.235	0.233	0.524	0.542	0.369	—	plot	1.640	1.640	0.000	0.174	0.279	0.320	0.330	0.659	—
312	plot	1.522	1.522	0.000	0.153	0.153	0.228	0.446	0.589	—	plot	0.800	1.800	0.075	0.155	0.171	0.181	0.819	0.874	—	plot	1.400	1.400	0.000	0.267	0.151	0.354	0.517	0.186	—	plot	1.557	1.557	0.000	0.479	0.197	0.250	0.533	0.322	—
3																																								

# Этап 1. Агрегированная таблица результатов

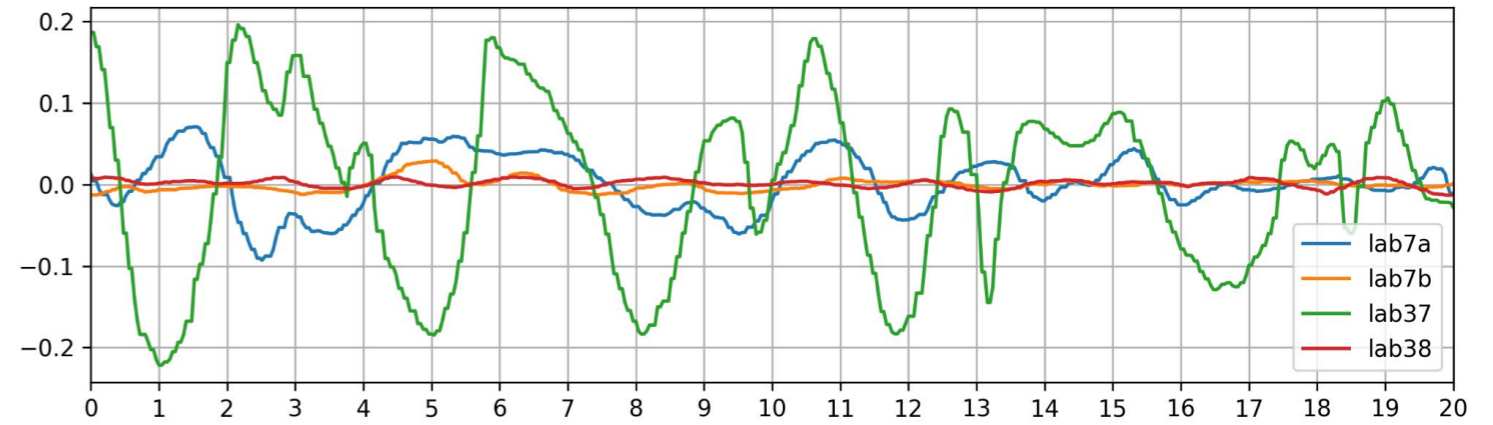
№	Lab7a	Lab7b	Lab17	Lab37
1	32.921 (4)	43.44 (2)	47.359 (1)	38.092 (3)
2	1.205 (2)	1.616 (1)	1.176 (3)	0.057 (4)
3	31.988 (4)	50.883 (1)	43.235 (2)	36.952 (3)
4	0.415 (3)	0.084 (4)	0.834 (1)	0.817 (2)
5	1.483 (1)	1.191 (3)	1.278 (2)	0.294 (4)

# Этап 2. Удержание позиции в бассейне без возмущений

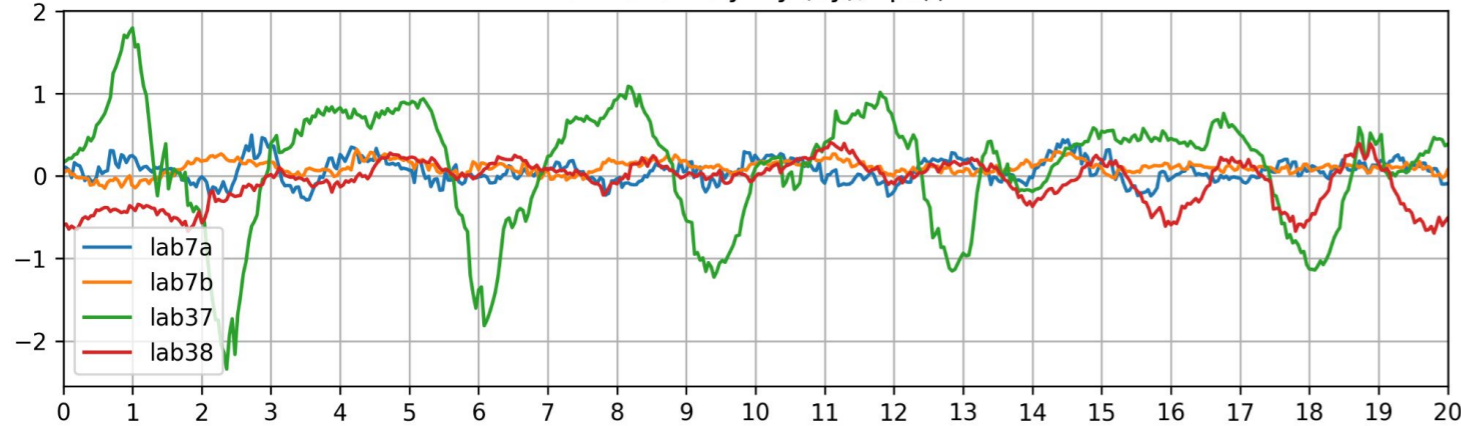
Ошибка по углу ( $\alpha_x$ ), град.



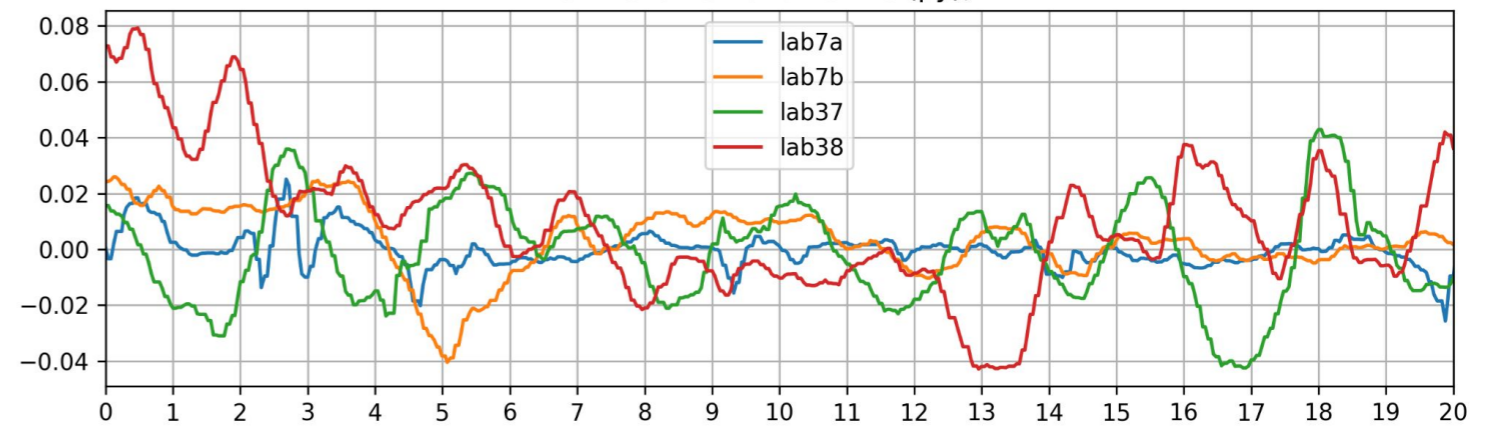
Ошибка по положению ( $p_x$ ), м



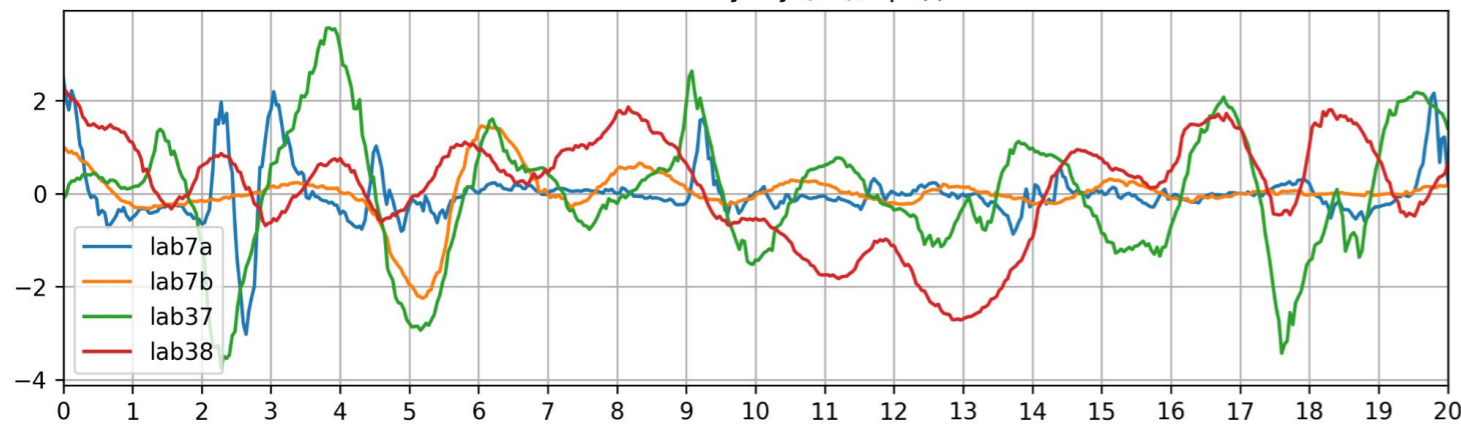
Ошибка по углу ( $\alpha_y$ ), град.



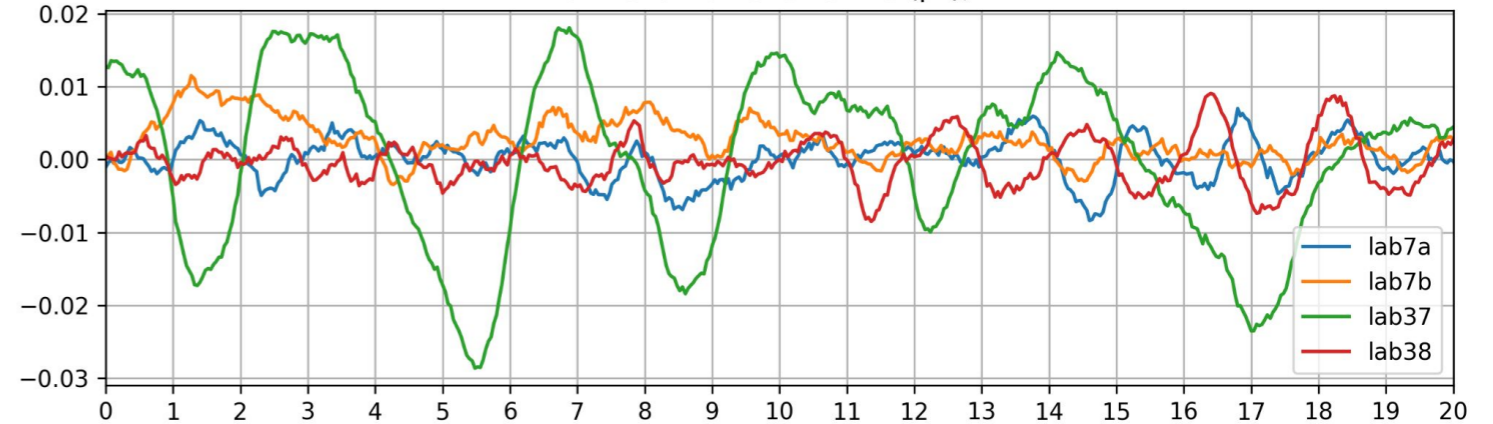
Ошибка по положению ( $p_y$ ), м



Ошибка по углу ( $\alpha_z$ ), град.



Ошибка по положению ( $p_z$ ), м

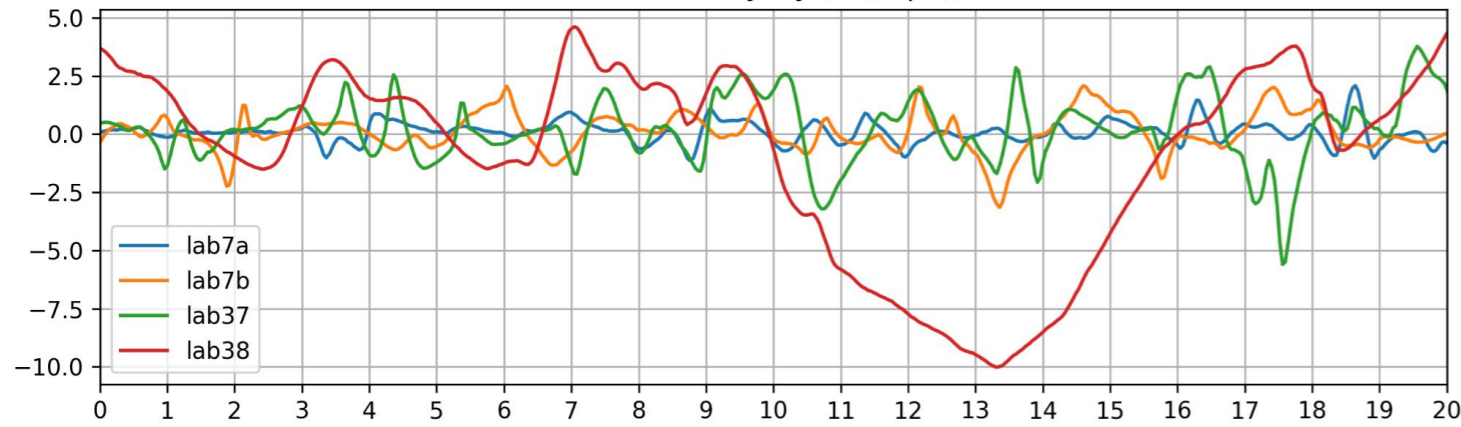


Время, сек

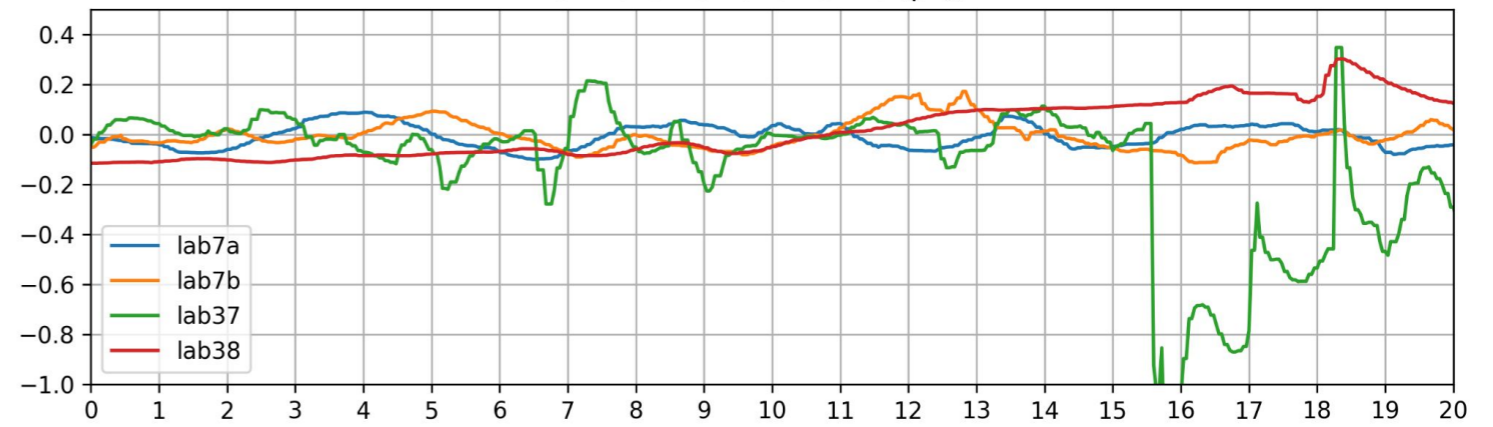
Время, сек

# Этап 2. Удержание позиции в бассейне с возмущениями

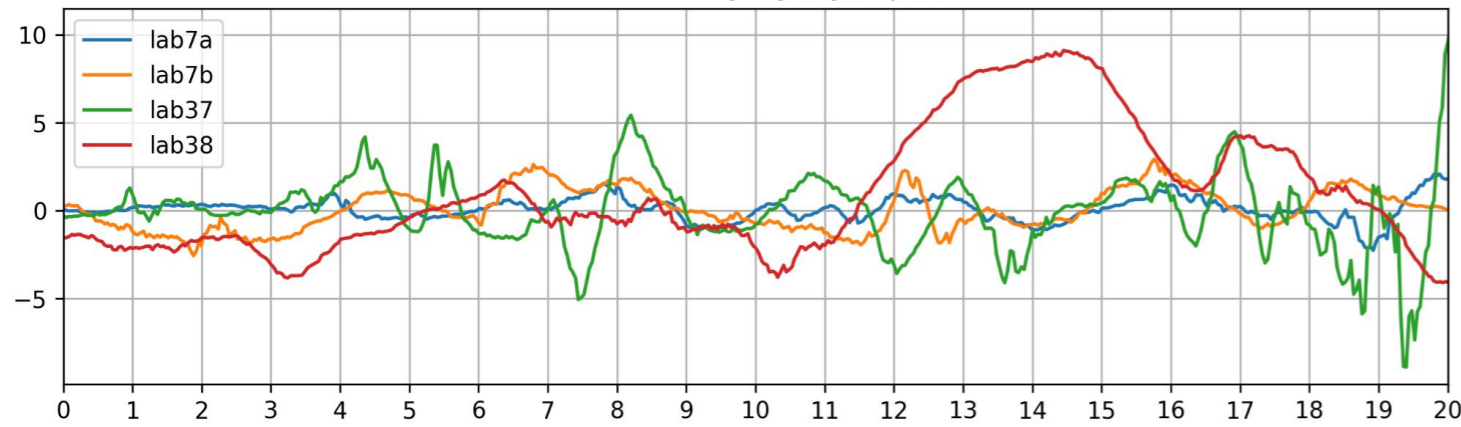
Ошибка по углу ( $\alpha_x$ ), град.



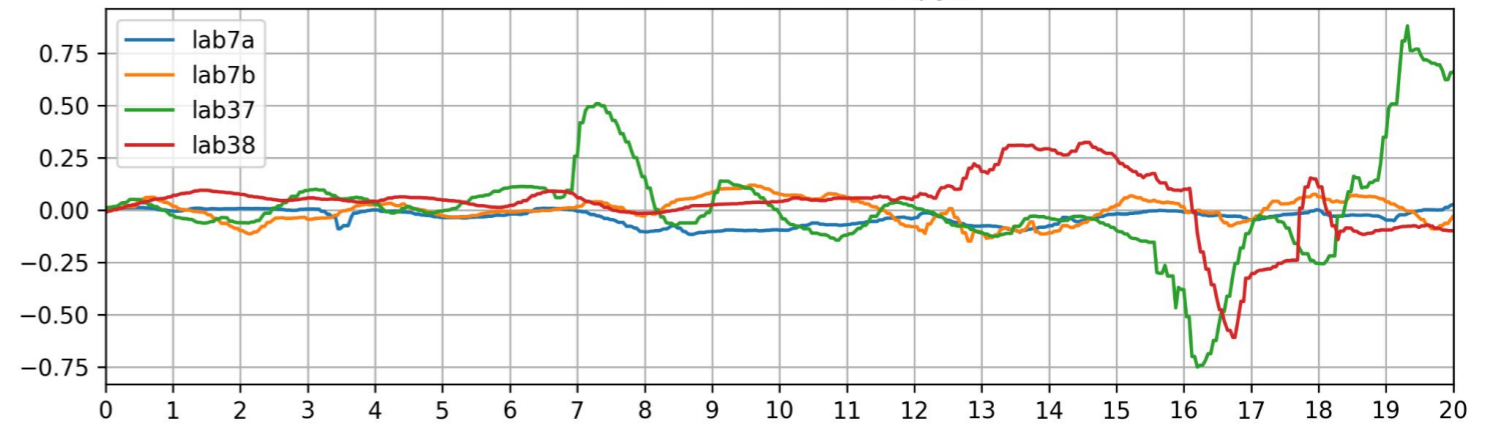
Ошибка по положению ( $p_x$ ), м



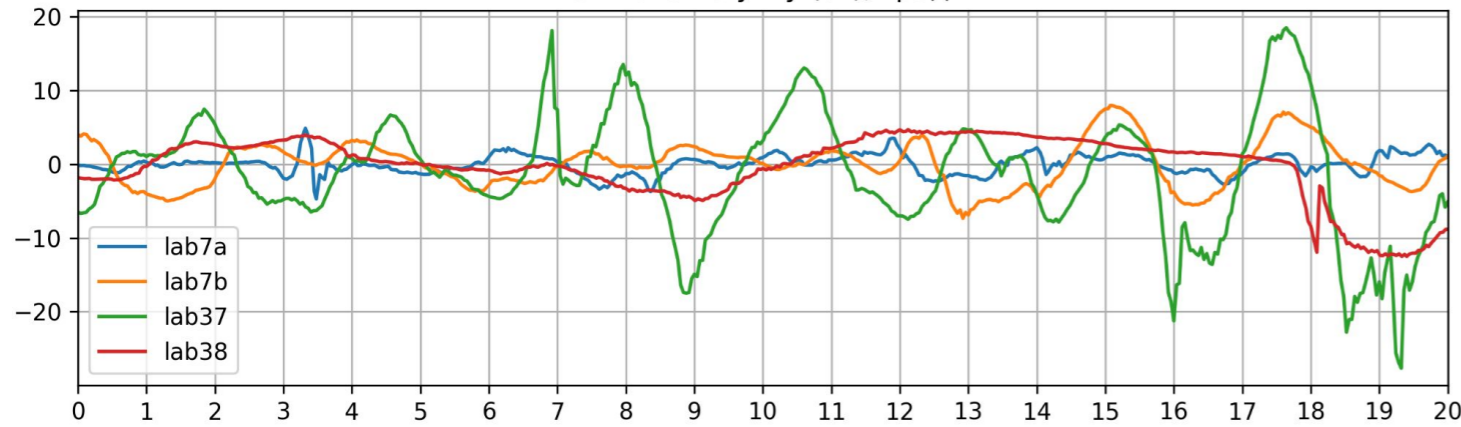
Ошибка по углу ( $\alpha_y$ ), град.



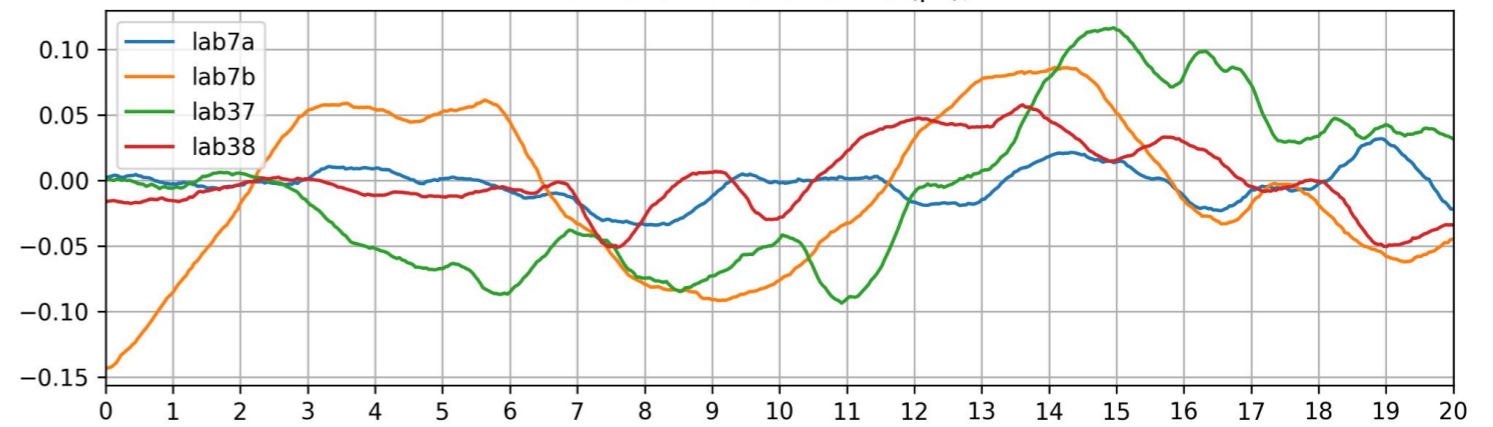
Ошибка по положению ( $p_y$ ), м



Ошибка по углу ( $\alpha_z$ ), град.



Ошибка по положению ( $p_z$ ), м



Время, сек

Время, сек

## Этап 2. Таблица результатов по испытаниям в бассейне

### Без возмущений (лучшая попытка)

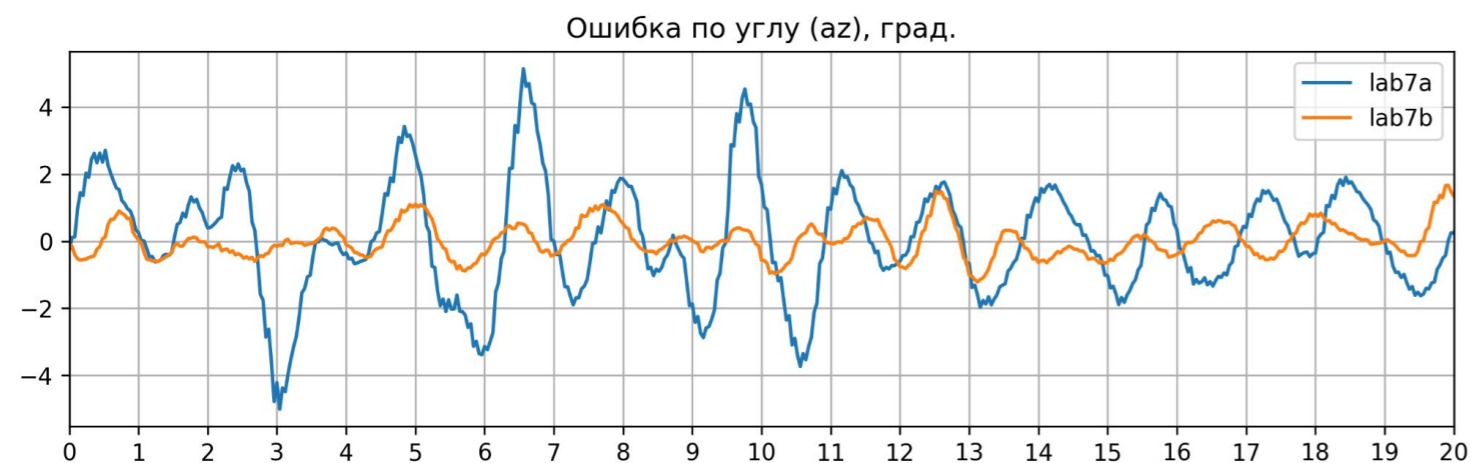
Команда	Попытка	Углы					Позиции				
		ax	ay	az	state	error	px	py	pz	state	error
lab7a	4	0.132	0.150	0.569	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.035	0.006	0.005	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab7b	1	0.100	0.131	0.506	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.008	0.012	0.005	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab38	3	0.600	0.267	1.137	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.005	0.026	0.005	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab37	5	0.292	0.712	1.349	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.105	0.018	0.012	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>

### С возмущениями (лучшая попытка)

Команда	Попытка	Углы					Позиции				
		ax	ay	az	state	error	px	py	pz	state	error
lab7a	1	0.454	0.645	1.305	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.048	0.050	0.015	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab7b	2	0.826	1.162	3.092	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.057	0.056	0.060	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab38	4	4.109	3.622	4.248	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.114	0.150	0.027	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab37	1	1.397	2.134	8.055	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.306	0.235	0.060	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>



# Этап 2. Удержание позиции в пруду без возмущений

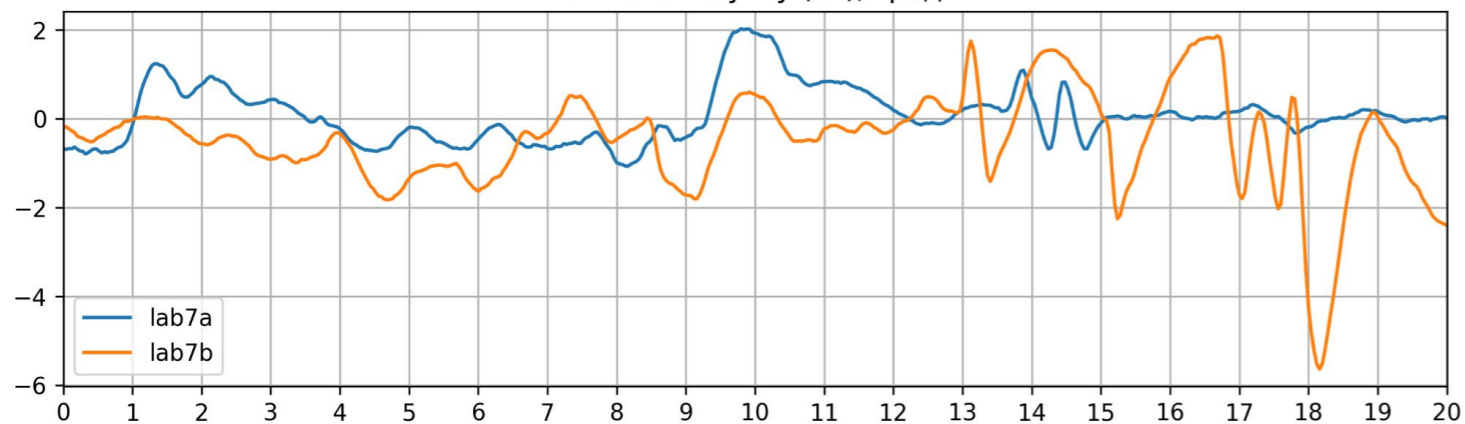


Время, сек

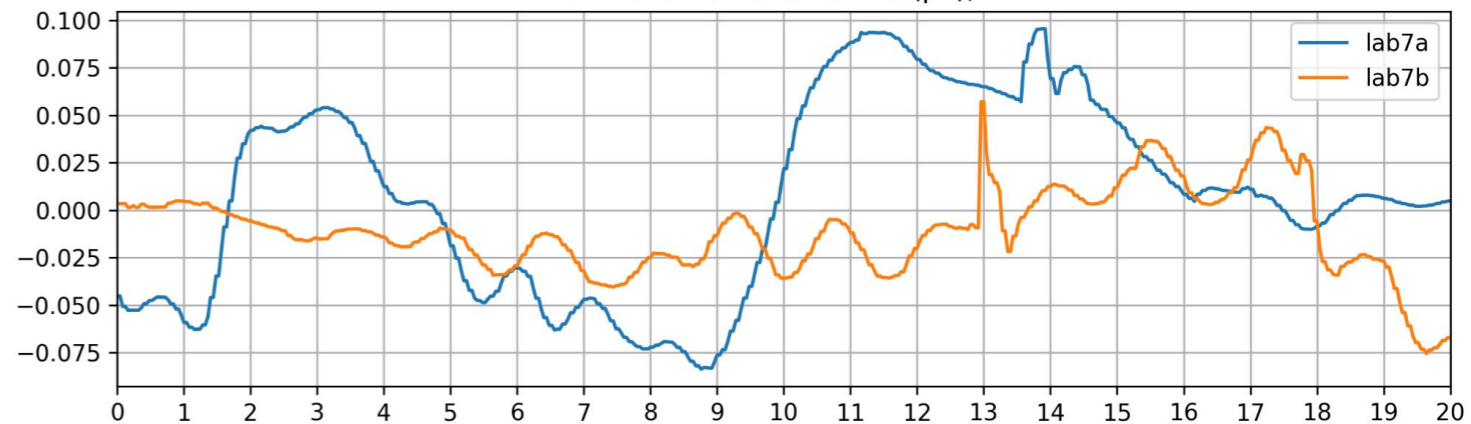
Время, сек

# Этап 2. Удержание позиции в пруду с возмущениями

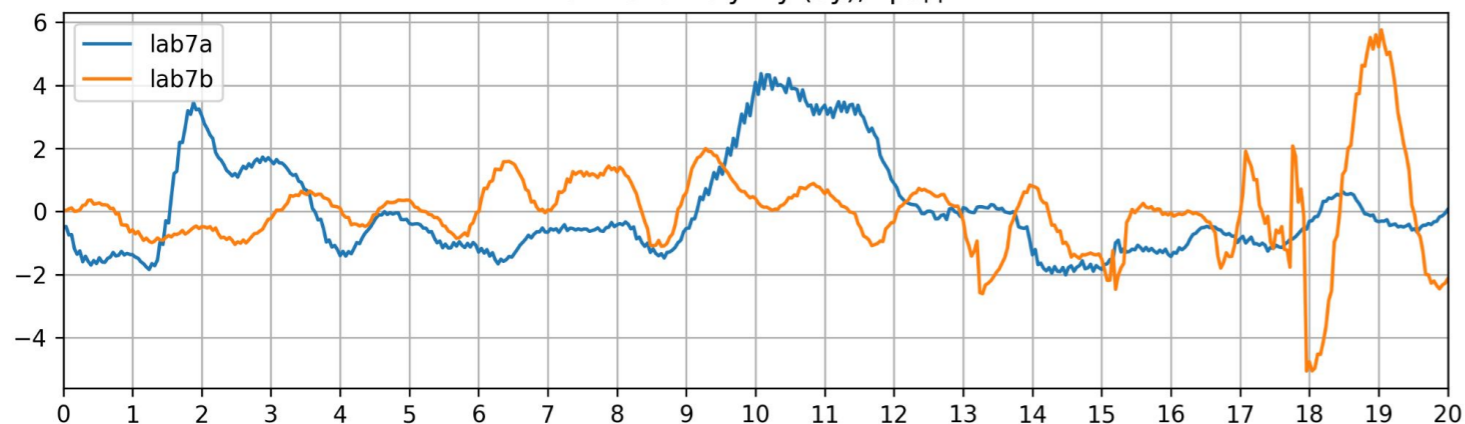
Ошибка по углу (ax), град.



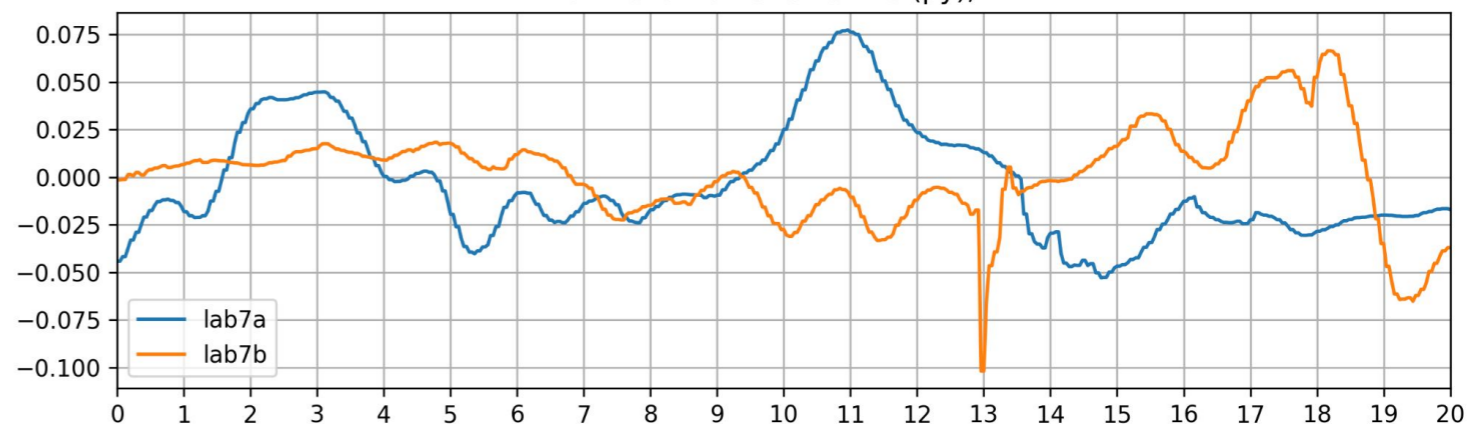
Ошибка по положению (px), м



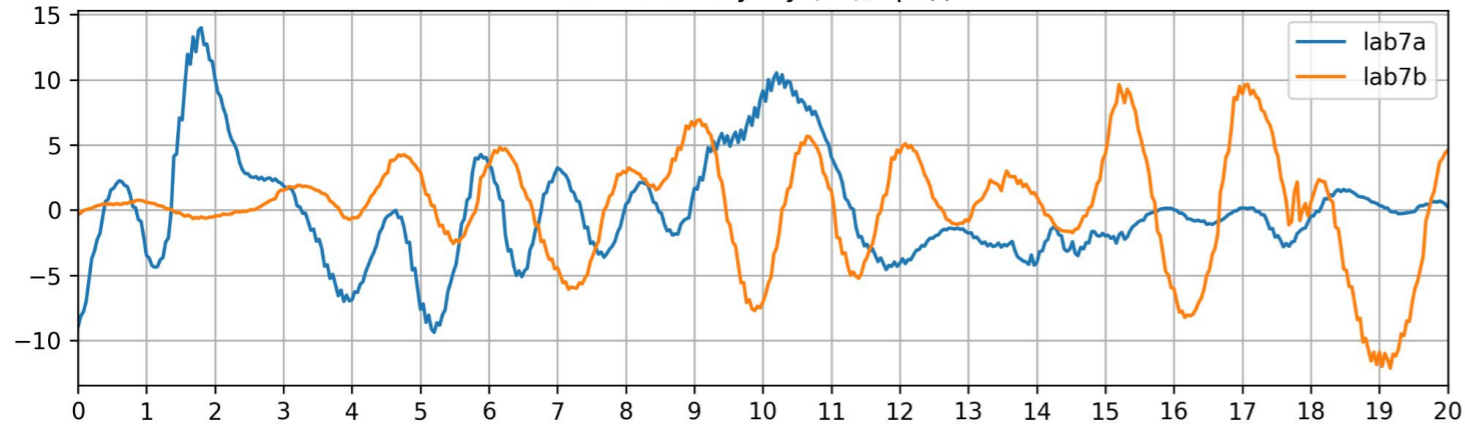
Ошибка по углу (ay), град.



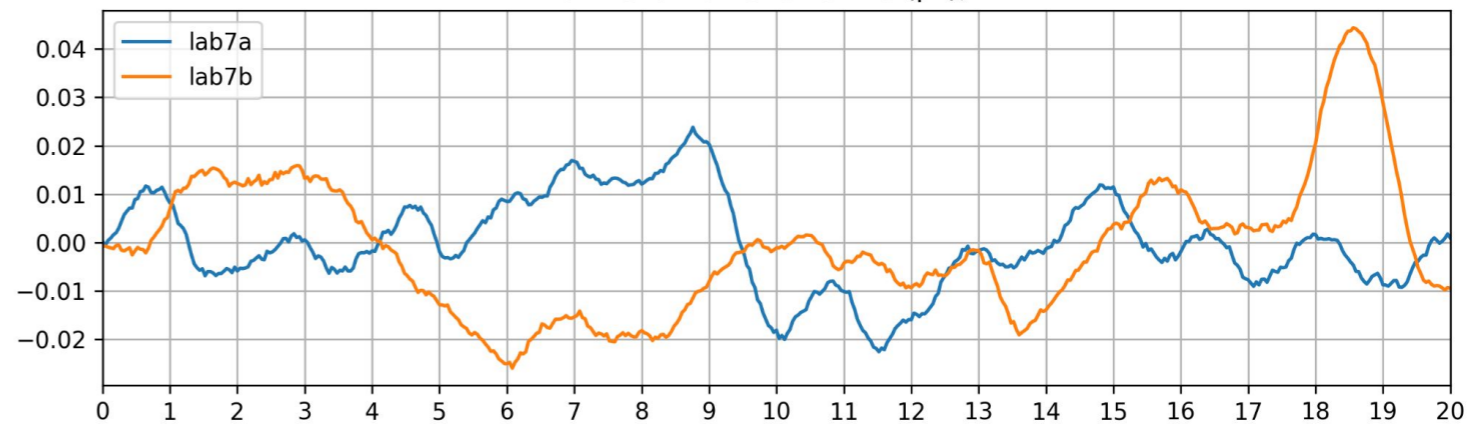
Ошибка по положению (py), м



Ошибка по углу (az), град.



Ошибка по положению (pz), м



Время, сек

Время, сек

## Этап 2. Таблица результатов по испытаниям в пруду

### Без возмущений (лучшая попытка)

Команда	Попытка	Углы					Позиции				
		ax	ay	az	state	error	px	py	pz	state	error
lab7a	1	0.167	0.849	1.661	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.007	0.009	0.008	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab7b	2	0.130	0.335	0.512	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.004	0.005	0.006	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>

### С возмущениями (лучшая попытка)

Команда	Попытка	Углы					Позиции				
		ax	ay	az	state	error	px	py	pz	state	error
lab7a	1	0.627	1.536	4.091	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.051	0.030	0.010	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>
lab7b	1	1.213	1.393	4.179	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>	0.025	0.025	0.015	<a href="#">plot</a>	<a href="#">plot</a>

# Кватернионный регулятор ориентации

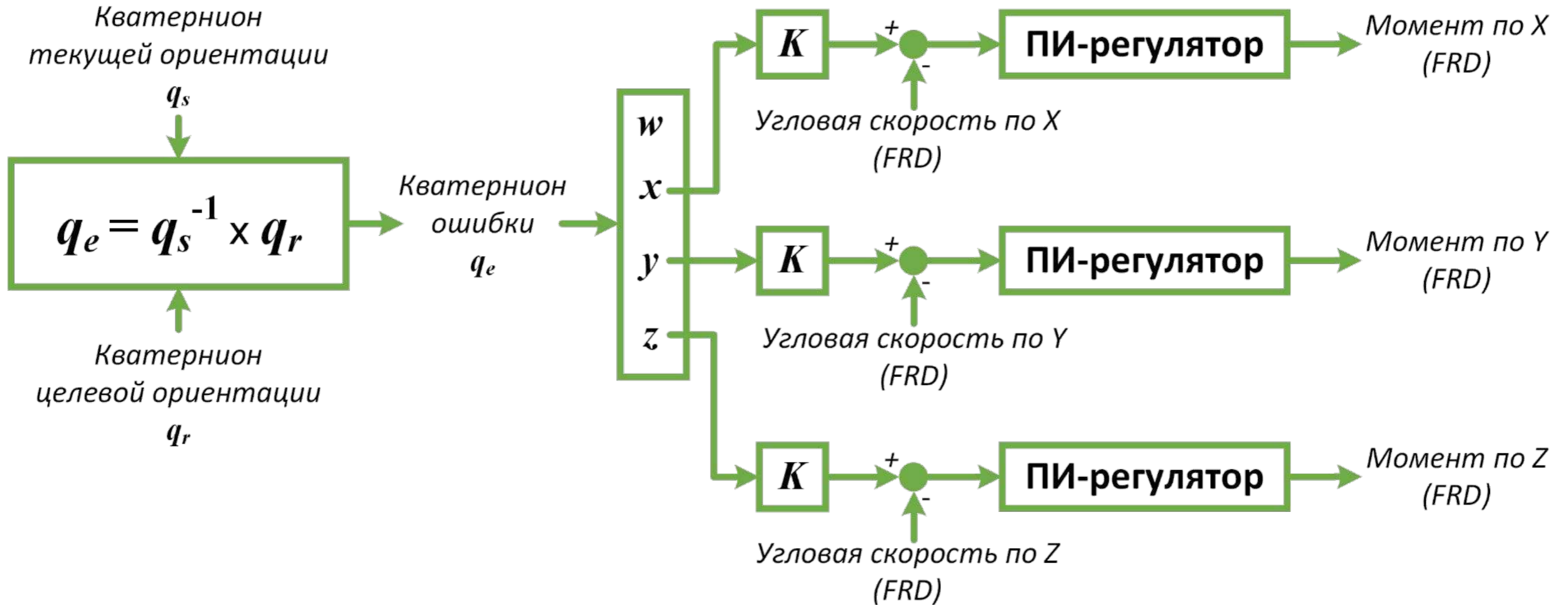
*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук*

*Лаборатория № 17*

*Абдулов А. В., Абраменков А. Н.*

2023

# Кватернионный регулятор ориентации



# Робастное управление необитаемым подводным аппаратом с оценкой и компенсацией согласованной неопределенности

А.И. Глущенко, К.А. Ласточкин

Лаборатория 7

Институт проблем управления им.В.А.Трапезникова Российской академии наук

*aiglush@ipu.ru*

26 октября 2023

# Синтез системы управления

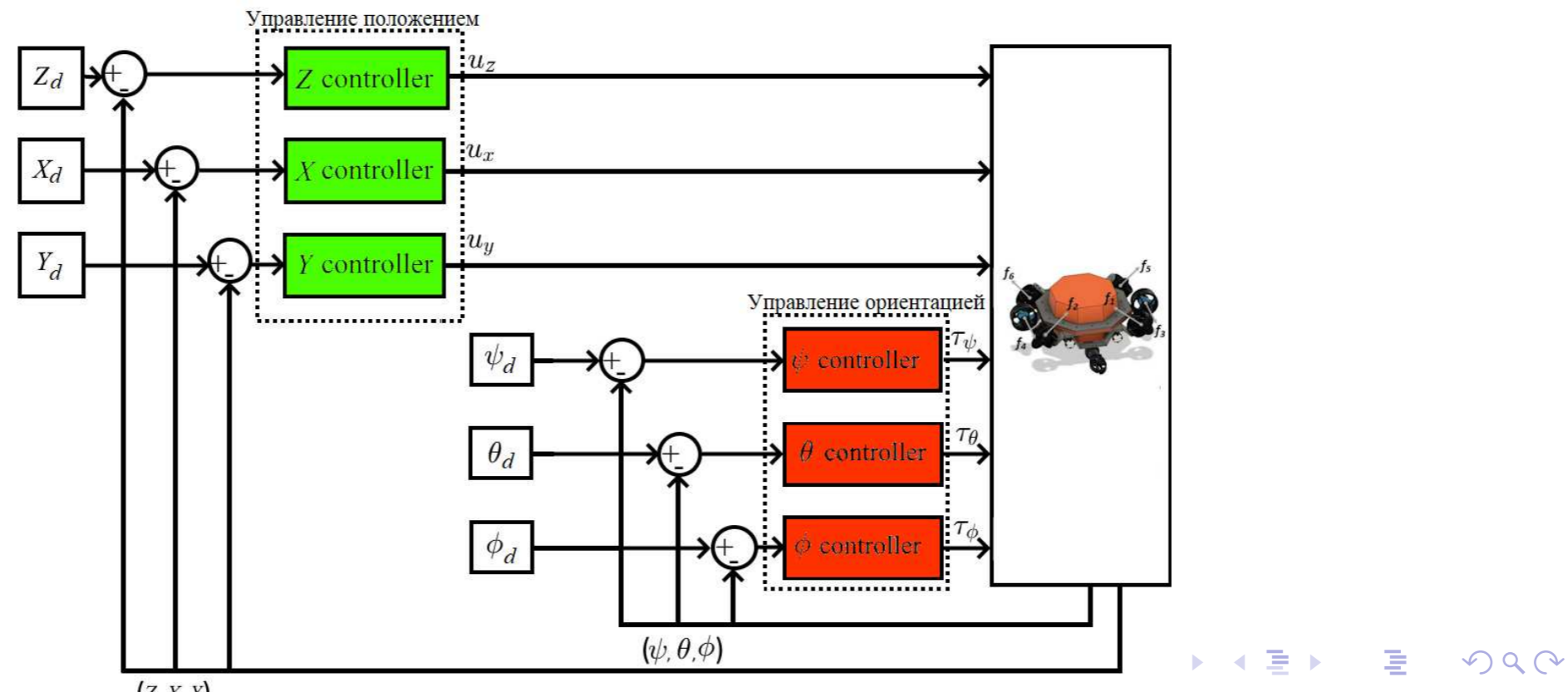
Для каждой из координат состояния аппарата можно записать:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_0b(u(t) + \Delta(t)),$$
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$x_1(t)$  - конкретная координата состояния ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \phi$ ),

$x_2(t)$  - скорость изменения координаты,  $u(t)$  - управляющий сигнал,

$b$  - неизвестный коэффициент усиления,  $\Delta$  - неопределенность.



Неизвестный коэффициент  $b$  записан как  $b = \Delta_b + \bar{b}$ , где  $\bar{b}$  - известное номинальное значение,  $\Delta_b$  - неизвестно.

Перепишем (1) как:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_0(\Delta_b + \bar{b})(u(t) + \Delta(t)) = \\ &= Ax(t) + B_0\bar{b}(u(t) + \Lambda(t)),\end{aligned}\tag{2}$$

где  $\Lambda(t) = \Delta(t) + \Delta_b\bar{b}^{-1}(u(t) + \Delta(t))$  - новая неопределенность.

Закон управления выбран как:

$$\begin{aligned}u(t) &= u_b(t) + u_{ad}(t), \\ u_b(t) &= k_x x(t) + k_r r(t), \\ k_x &= [k_{1x} \quad k_{2x}] \in \mathbb{R}^2, \quad k_r = -k_{1x},\end{aligned}\tag{3}$$

где  $A + B_0\bar{b}k_x$  - Гурвицева матрица и  $[1 \quad 0](A + B_0\bar{b}k_x)^{-1}B_0\bar{b}k_r = 1$ , и  $u_{ad}(t)$  будет определен далее.



Выражение (3) подставим в (2):

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_0\bar{b}(u_b(t) + u_{ad}(t) + \Lambda(t)) = \\ &= (A + B_0\bar{b}k_x)x(t) + B_0\bar{b}k_r r(t) + B_0\bar{b}(u_{ad}(t) + \Lambda(t)).\end{aligned}\quad (4)$$

Цель - оставить только  $(A + B_0\bar{b}k_x)x(t) + B_0\bar{b}k_r r(t)$  справа в (4), что соответствует эталонной динамике. Оценим неопределенность  $\Lambda(t)$ .

Введем следующие фильтры:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}(t) &= -l(\bar{x}(t) - x(t)), \\ \dot{\bar{r}}(t) &= -l(\bar{r}(t) - r(t)), \\ \dot{\bar{u}}_{ad}(t) &= -l(\bar{u}_{ad}(t) - u_{ad}(t)),\end{aligned}\quad (5)$$

где  $l > 0$  - параметр фильтра.

И следующую ошибку:  $\chi(t) = l(\bar{x}(t) - x(t))$ .

## Theorem

Пусть существуют  $c_1 > 0$ ,  $c_2 > 0$  такие, что следующее неравенство выполняется:

$$|\dot{\Lambda}(t)| \leq c_1 \|x(t)\| + c_2. \quad (6)$$

Тогда существует  $l_0 > 0$  такое, что для любого  $l \geq l_0 > 0$  закон управления

$$\begin{aligned} u(t) &= u_b(t) + u_{ad}(t), \\ u_b(t) &= k_x x(t) + k_r r(t), \\ u_{ad}(t) &= -\bar{\Lambda}(t) = [0 \quad \bar{b}^{-1}] (\chi(t) + (A + B_0 \bar{b} k_x) \bar{x}(t)) + k_r \bar{r}(t) + \bar{u}_{ad}(t). \\ k_x &= [k_{1x} \quad k_{2x}] \in \mathbb{R}^2, \quad k_r = -k_{1x}, \end{aligned} \quad (7)$$

обеспечивает выполнение следующих предельных равенств:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - x_{ref}(t)\| = \varepsilon_{UB}(l), \quad \lim_{l \rightarrow \infty} \|\varepsilon_{UB}(l)\| = 0. \quad (8)$$

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

*Лаборатория 7 (команда 7b)*

В.А. Александров, Д.В. Шатов

**Управление положением необитаемого подводного аппарата:  
идентификация модели в форме передаточных функций и  
синтез ПИД-регуляторов на их основе**

26 октября 2023

# Модель динамики ROV

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = F$$

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix},$$

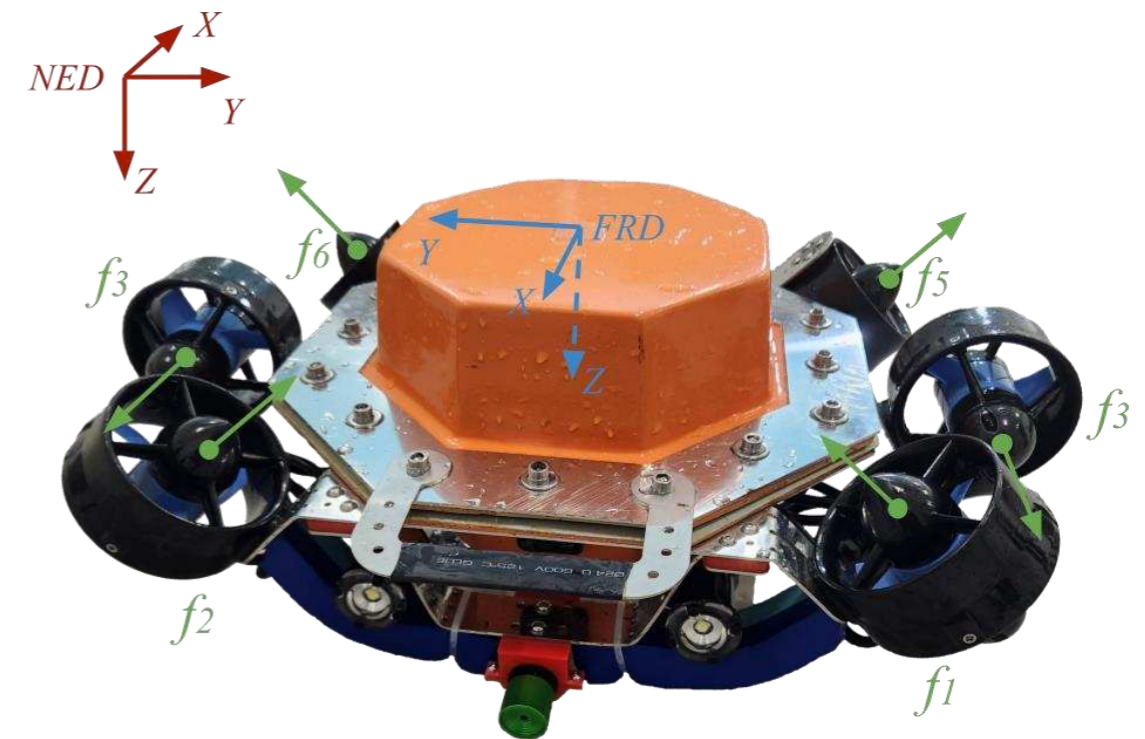
$T \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$

$$f_i = K_f \Omega_i |\Omega_i|$$

$$J_i \dot{\Omega}_i + K_{1i} \Omega_i + K_{2i} \Omega_i |\Omega_i| = K_{3i} u_i$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{x_1} \\ \dots \\ B_{x_6} \end{bmatrix} u_x + \dots + \begin{bmatrix} B_{\psi_1} \\ \dots \\ B_{\psi_6} \end{bmatrix} u_\psi$$

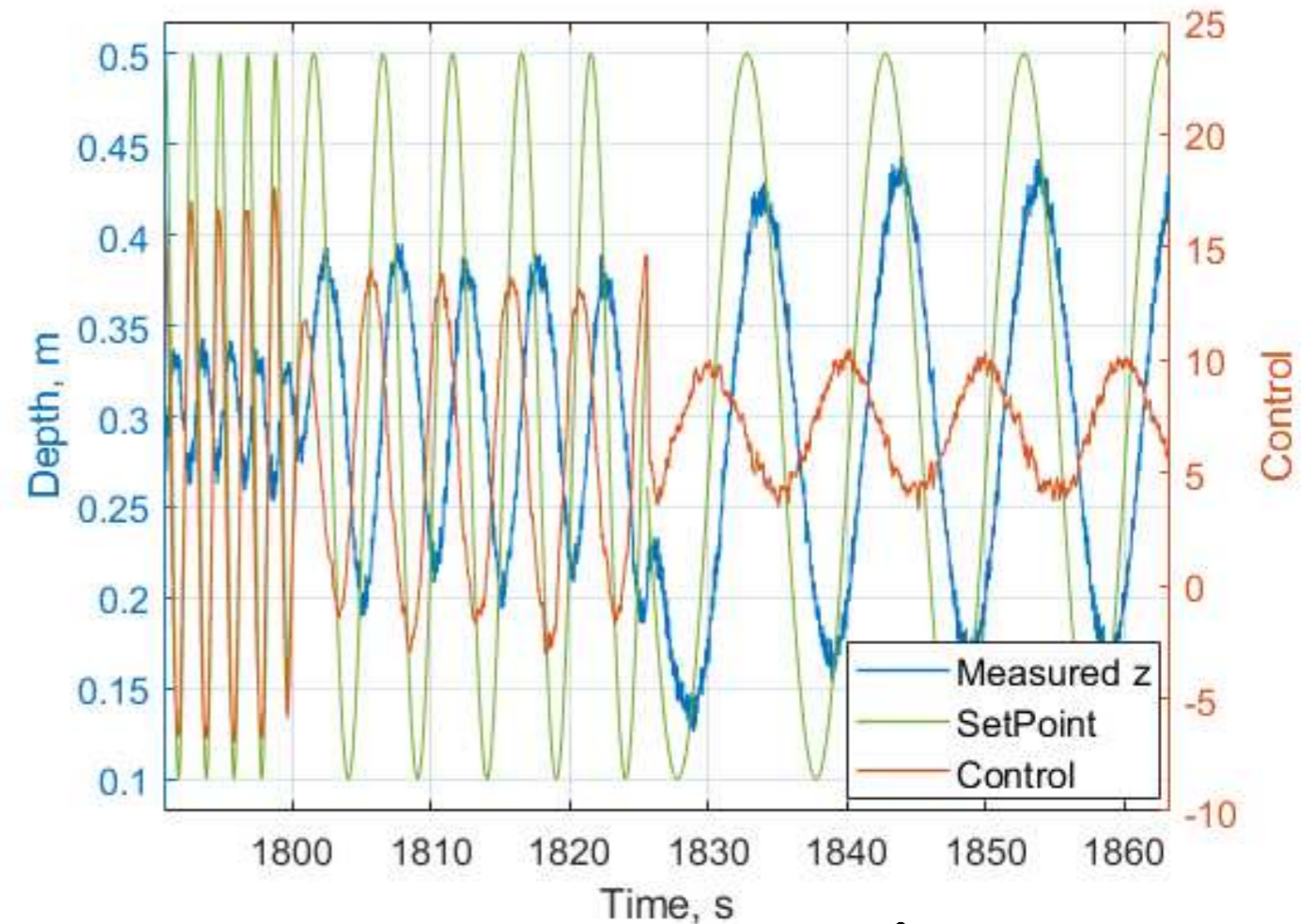
6 независимых контуров управления:  $u_x \rightarrow x, \dots, u_\psi \rightarrow \psi$



Ориентация описывается углами Эйлера или кватернионом

# Конечно-частотная идентификация

Ось	Поступательное движение	Вращательное движение
$x$	$P_x = \frac{0.031}{s(0.81s + 1)}$	$P_{roll} = \frac{3.8045}{s^2 + 1.494s + 1.257}$
$y$	$P_y = \frac{0.048}{s(1.17s + 1)}$	$P_{pitch} = \frac{3.8045}{s^2 + 1.494s + 1.257}$
$z$	$P_z = \frac{0.018}{s(0.98s + 1)}$	$P_{yaw} = \frac{0.65}{s(0.33s + 1)}$



Частотные параметры:

$$\hat{\alpha}_{ki} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} k \sin(\omega_i(t - t_0)) dt$$

$$\hat{\beta}_{ki} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{T+t_0} k \cos(\omega_i(t - t_0)) dt, \quad k = \{y, u\}, \quad i = \overline{1, n}$$

$$\hat{P}(j\omega_i) = \hat{\alpha}_i + j\hat{\beta}_i = \frac{\hat{\alpha}_{y_i} + j\hat{\beta}_{y_i}}{\hat{\alpha}_{u_i} + j\hat{\beta}_{u_i}}$$

$$\frac{b_{n-1}(j\omega_i)^{n-1} + \dots + b_0}{(j\omega_i)^n + a_{n-1}(j\omega_i)^{n-1} + \dots + a_0} = \hat{\alpha}_i + j\hat{\beta}_i$$

# ПИД-регуляторы (оптимизация размещения полюсов)

А. Для поступательного движения

ПИД-регулятор с 2 степенями свободы и с фильтром:

$$C(s) = \left( K_p(p_1 \cdot r - y) + \frac{K_i}{s}(r - y) + K_d s(p_2 \cdot r - y) \right) / (T_f s + 1)$$

В. Для вращательного движения каскадный регулятор:

1) П-регулятор для кватерниона формирует уставку для угловой скорости;

2) а) ПИД-регулятор с 2 степенями свободы и с фильтром для угловой скорости контуров крена и тангажа,

б) ПИ-регулятор для угловой скорости контура рыскания.

Критерии синтеза регулятора:

Задача оптимизации: минимизация действия возмущения  $\left( \min \|G_{yf}(j\omega)\|_{\infty} \right)$  при ограничениях

• Функция чувствительности  $\|S(j\omega)\|_{\infty} \leq 1.7$

• Чувствительность к помехам А:  $\|CS(j\omega)\|_{\infty} \leq 150$ , В:  $\|CS(j\omega)\|_{\infty} \leq 2$

• Границы полюсов замкнутой системы А:  $[-20, -0.6]$ , В:  $[-50, -5]$

• Демпфирование  $\zeta \geq 0.8$

• Желаемая передаточная функция замкнутой системы А:  $P_m(s) = \frac{1}{(0.5s + 1)(T_{id}s + 1)}$

Методы робастного управления с  
информационной поддержкой от  
наблюдателя скоростей и  
возмущений

Коллектив лаб. 37

Антипов А.С.

Кокунько Ю.Г.

## Математическая модель объекта управления

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= R(\eta_2)v, \\ \dot{v} &= \Delta f(\eta, v, t) + M_0^{-1}T_0u.\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \in R^6$  – вектор положения и ориентации,

$$\eta_1 = [x \ y \ z]^T, \eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T,$$

$v = [\bar{\dot{x}} \ \bar{\dot{y}} \ \bar{\dot{z}} \ \bar{\dot{\phi}} \ \bar{\dot{\theta}} \ \bar{\dot{\psi}}]^T \in R^6$  – вектор линейных и угловых скоростей,

$$v_1 = [\dot{\bar{x}} \ \dot{\bar{y}} \ \dot{\bar{z}}]^T, \ v_2 = [\dot{\bar{\phi}} \ \dot{\bar{\theta}} \ \dot{\bar{\psi}}]^T,$$

$u \in R^6$  – вектор управляющих сигналов,

$M = M_0 + \Delta M$  – матрица инерции,

$T = T_0 + \Delta T$  – матрица пересчета усилий моторов в силы и моменты,

$$\Delta f(\eta, v, t) = (M_0^{-1}\Delta T - M_0^{-1}\Delta M M^{-1}T)u - M^{-1}(C(v)v + D(v)v + g(\eta) + f(t))$$

– вектор параметрических неопределенностей и внешних возмущений,

$C(v), D(v), g(\eta)$  – матрицы и векторы в механической системе (Fossen),

$f \in R^6$  – вектор внешних возмущений.



## Постановка задачи

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= R(\eta_2)\nu, \\ \dot{\nu} &= \Delta f(\eta, \nu, t) + M_0^{-1}T_0 u.\end{aligned}\tag{1}$$

### Предположения:

- 1)  $|\eta_i(t)| \leq H_i, |\nu_i(t)| \leq V_i, i = \overline{1,6}, t \geq 0$ ;
- 2)  $\det B(\eta_2) \neq 0, B(\eta_2) = R(\eta_2)M^{-1}T$ ;
- 3)  $B(\eta_2) = B_0 + \Delta B, B_0$  – известна;
- 4) измерения:  $\eta, \nu_2(t), \eta_d, \dot{\eta}_d(t)$ .

### Цель управления:

$$\begin{aligned}|e_{1i}(t)| &\leq \delta_{1i}, t \geq t_{1i}, \\ e_{1i}(t) &= \eta_i(t) - \eta_{i,d}(t), i = \overline{1,6}.\end{aligned}\tag{2}$$

## Схема управления 1 (линейное управление)

$$\dot{\eta} = R(\eta_2)v, \quad (1)$$

$$\dot{v} = \Delta f(\eta, v, t) + M_0^{-1}T_0 u.$$

**Замена переменных:**

$$e_1 = \eta - \eta_d, e_2 = R(\eta_2)v - \dot{\eta}_d. \quad (3)$$

**Преобразованная система:**

$$\dot{e}_1 = e_2, \dot{e}_2 = B_0(\eta_2)u + e_3(\eta, v, t), \quad (4)$$

где  $e_3(\eta, v, t) = \dot{R}(\eta_2)v + R(\eta_2)\Delta f(\eta, v, t) - \ddot{\eta}_d(t)$ .

**Закон управления:**

$$u = -(B_0(\eta_2))^{-1}[e_3 + K_1 e_1 + K_2 e_2], \quad (5)$$

где  $K_1 = \text{diag}(K_{1i}), K_2 = \text{diag}(K_{2i})$ .

**Замкнутая система:**

$$\dot{e}_1 = e_2, \dot{e}_2 = -K_1 e_1 - K_2 e_2. \quad (6)$$

## Синтез наблюдателя скоростей и возмущений

$$\dot{e}_1 = e_2, \dot{e}_2 = B_0(\eta_2)u + e_3(\eta, \nu, t). \quad (4)$$

**Наблюдатель:**

$$\dot{z}_1 = [z_{21} \ z_{22} \ z_{23}]^T + v_1, \dot{z}_2 = z_3 + B_0(\eta_2)u + v_2, \dot{z}_3 = v_3, \quad (7)$$

где  $v_1 = M_1 \text{sat}(L_1 \varepsilon_1) = (m_{11} \text{sat}(l_{11} \varepsilon_{11}), \dots, m_{13} \text{sat}(l_{13} \varepsilon_{13}))^T$ ,

$v_i = M_i \text{sat}(L_i \hat{\varepsilon}_i) = (m_{i1} \text{sat}(l_{i1} \hat{\varepsilon}_{i1}), \dots, m_{i6} \text{sat}(l_{i6} \hat{\varepsilon}_{i6}))^T$ ,  $i = 2, 3$ ;  $\hat{\varepsilon}_{2p} = v_1$ ,  $\hat{\varepsilon}_3 = v_2$ ;

$\varepsilon_{1p} = e_{1p} - z_1 \in R^{3 \times 1}$ ,  $\varepsilon_2 = e_2 - z_2 \in R^{6 \times 1}$ ,  $\varepsilon_{2p} = [\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{23}]^T \in R^{3 \times 1}$ ,

$\varepsilon_3 = e_3 - z_3 \in R^{6 \times 1}$ ,  $e_{1p} = [e_{11} \ e_{12} \ e_{13}]^T$ ,  $e_{2p} = [e_{21} \ e_{22} \ e_{23}]^T$ .

**Система относительно ошибок наблюдения:**

$$\dot{\varepsilon}_{1p} = \varepsilon_{2p} - v_1, \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_3 - v_2, \dot{\varepsilon}_3 = \dot{e}_3 - v_3. \quad (8)$$

**Выбор  $L_1, L_2, M_1, M_2$ :**

$$|e_{2i}(t) - z_{2i}(t)| \leq \Delta_{2i}, |e_{3i}(t) - z_{3i}(t)| \leq \Delta_{3i}. \quad (9)$$

## Схема управления 2 (нелинейное управление)

$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= R(\eta_2)v, \\ \dot{v} &= \Delta f(\eta, v, t) + M_0^{-1}T_0u.\end{aligned}\tag{1}$$

**Замена переменных:**

$$e_1 = \eta - \eta_d, e_2 = R(\eta_2)v + \tilde{M}_1\sigma(\tilde{K}_1e_1).\tag{10}$$

**Преобразованная система:**

$$\dot{e}_1 = e_2 - \tilde{M}_1\sigma(\tilde{K}_1e_1) - \dot{\eta}_d, \dot{e}_2 = B_0(\eta_2)u + e_3(\eta, v, t),\tag{11}$$

где  $e_3(\eta, v, t) = \dot{R}(\eta_2)v + R(\eta_2)\Delta f(\eta, v, t) + (\tilde{M}_1\sigma(\tilde{K}_1e_1))'$ .

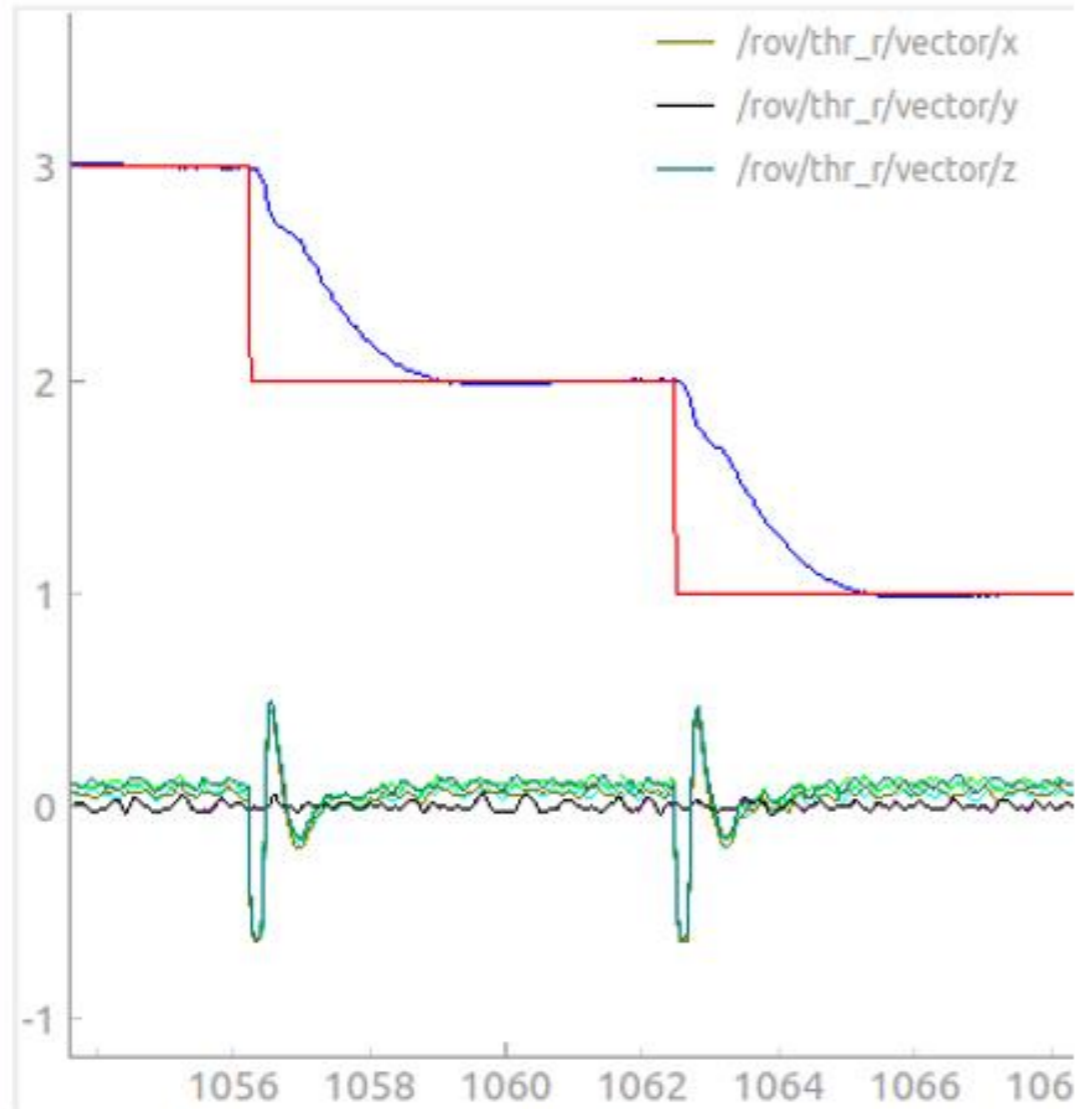
**Закон управления:**

$$u = -(B_0(\eta_2))^{-1}[e_3 + \tilde{M}_2\sigma(\tilde{K}_2e_2)],\tag{12}$$

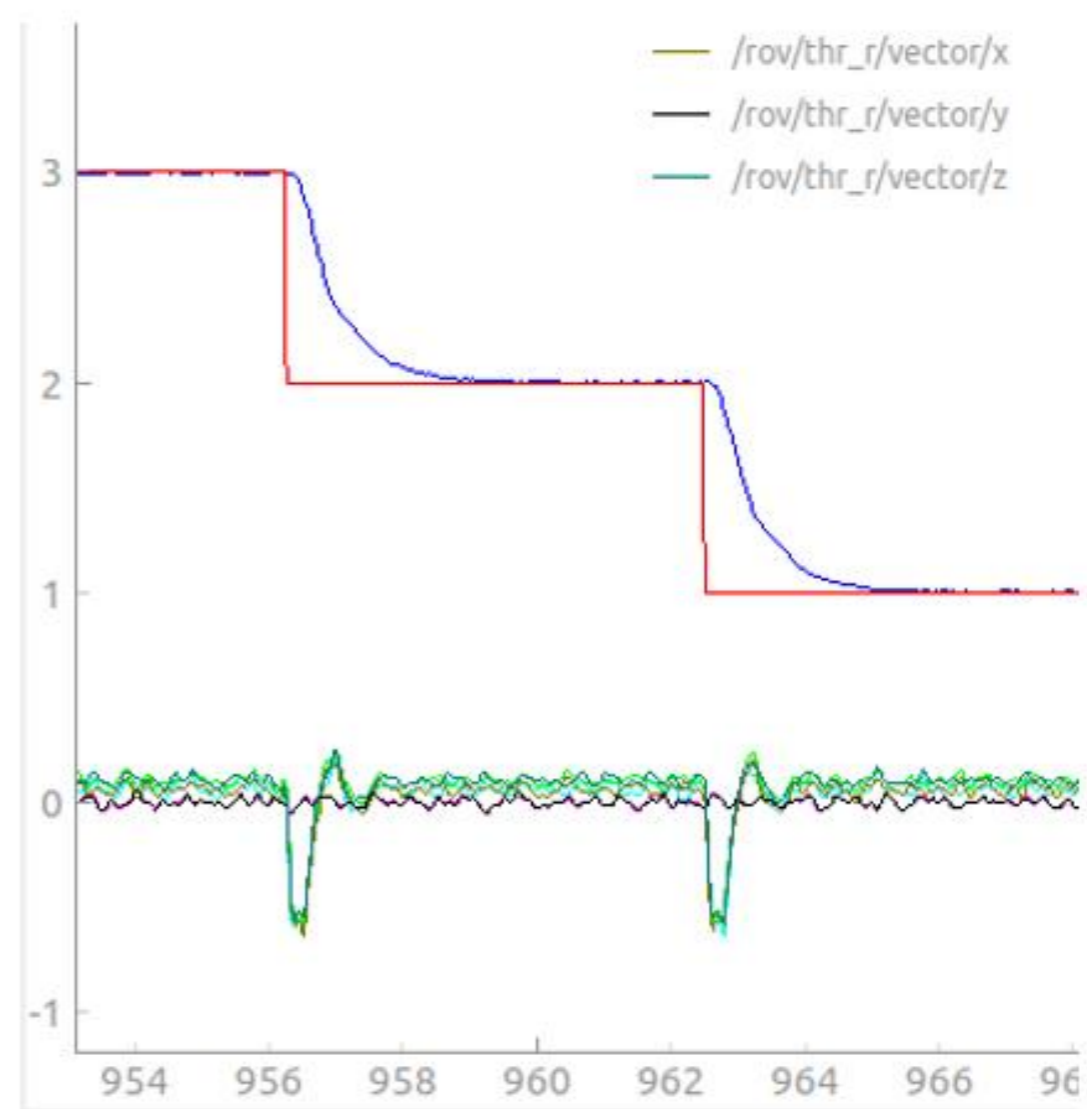
где  $\tilde{K}_1 = \text{diag}(\tilde{K}_{1i}), \tilde{K}_2 = \text{diag}(\tilde{K}_{2i}), \tilde{M}_1 = \text{diag}(\tilde{M}_{1i}), \tilde{M}_2 = \text{diag}(\tilde{M}_{2i})$ .

**Замкнутая система:**

$$\dot{e}_1 = e_2 - \tilde{M}_1\sigma(\tilde{K}_1e_1) - \dot{\eta}_d, \dot{e}_2 = -\tilde{M}_2\sigma(\tilde{K}_2e_2).\tag{13}$$



**Схема 1**  
(линейное управление)



**Схема 2**  
(нелинейное управление)

## Заключение

- 1) Предложены методы с линейной и нелинейной обратной связью, позволяющие компенсировать комплекс неопределенностей;
- 2) Разработан наблюдатель скоростей и возмущений, обеспечивающий информационную поддержку закона управления.

# Разработка системы управления НПА

Работа в рамках конкурса

Команда лабораторий 38 и 82



Рис. 1: Потапов А.П., лаб. 38

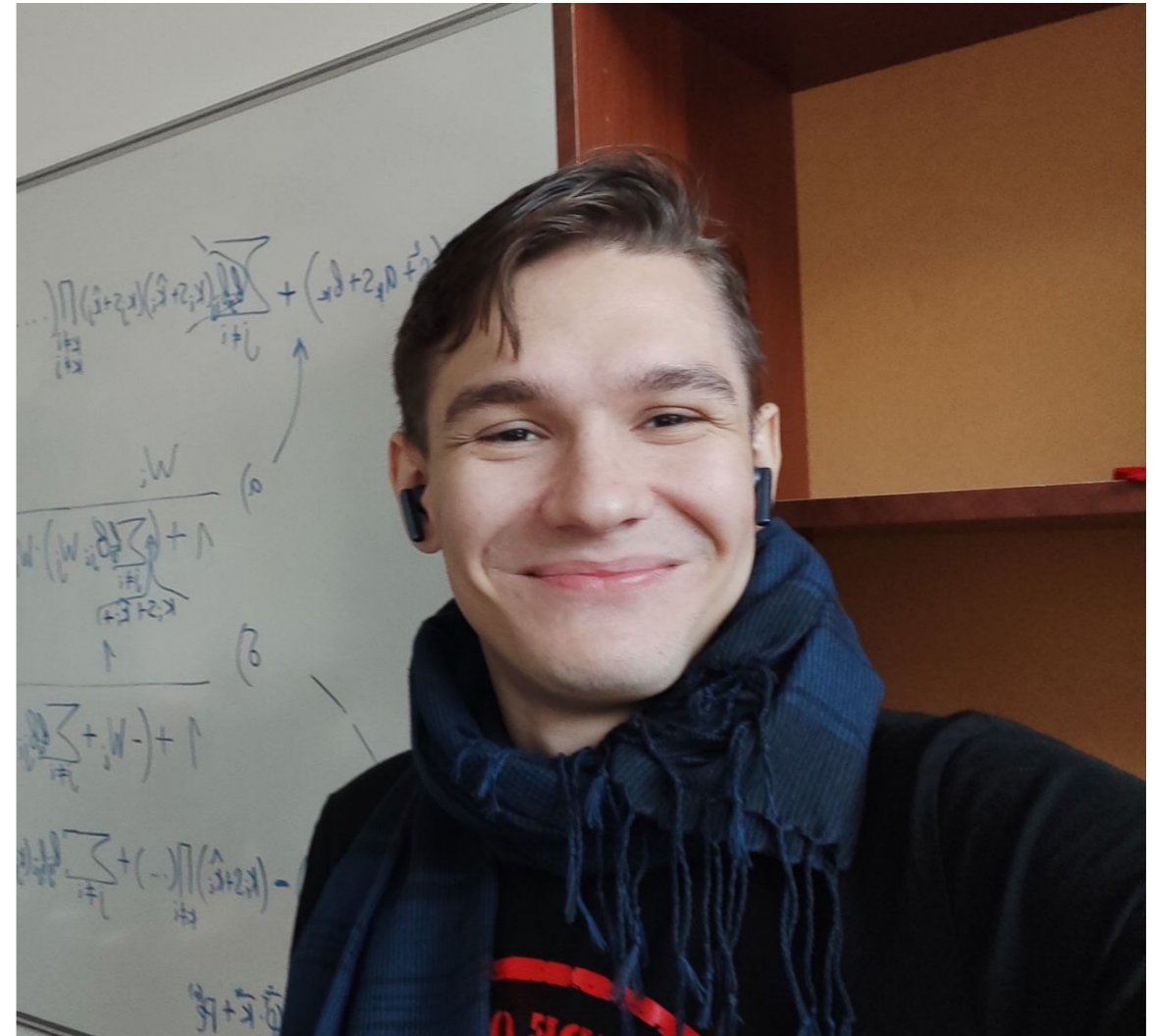


Рис. 2: Галеев И.А., лаб. 82

# Уравнения движения твердого тела

## Уравнения движения в локальной системе координат

$$(M_m + M_a) \frac{du}{dt} = F_{\text{Arc}} + F_{\text{grav}} - \omega \times [(M + M_a) \cdot u] + \tau + F_N$$

$$(J_m + J_a) \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{Arc}} + M_{\text{grav}} - \omega \times [(J_m + J_a) \cdot \omega] - u \times [(M + M_a) \cdot u] + M_\tau + M_N$$

где (все векторы записаны в связанной с аппаратом системе координат):

- $F_{\text{Arc}}, M_{\text{Arc}}$  — сила Архимеда и ее момент соответственно,
- $\tau, M_\tau$  — управляющая сила и ее момент,
- $F_N, M_N$  — сила и момент внешних сил.

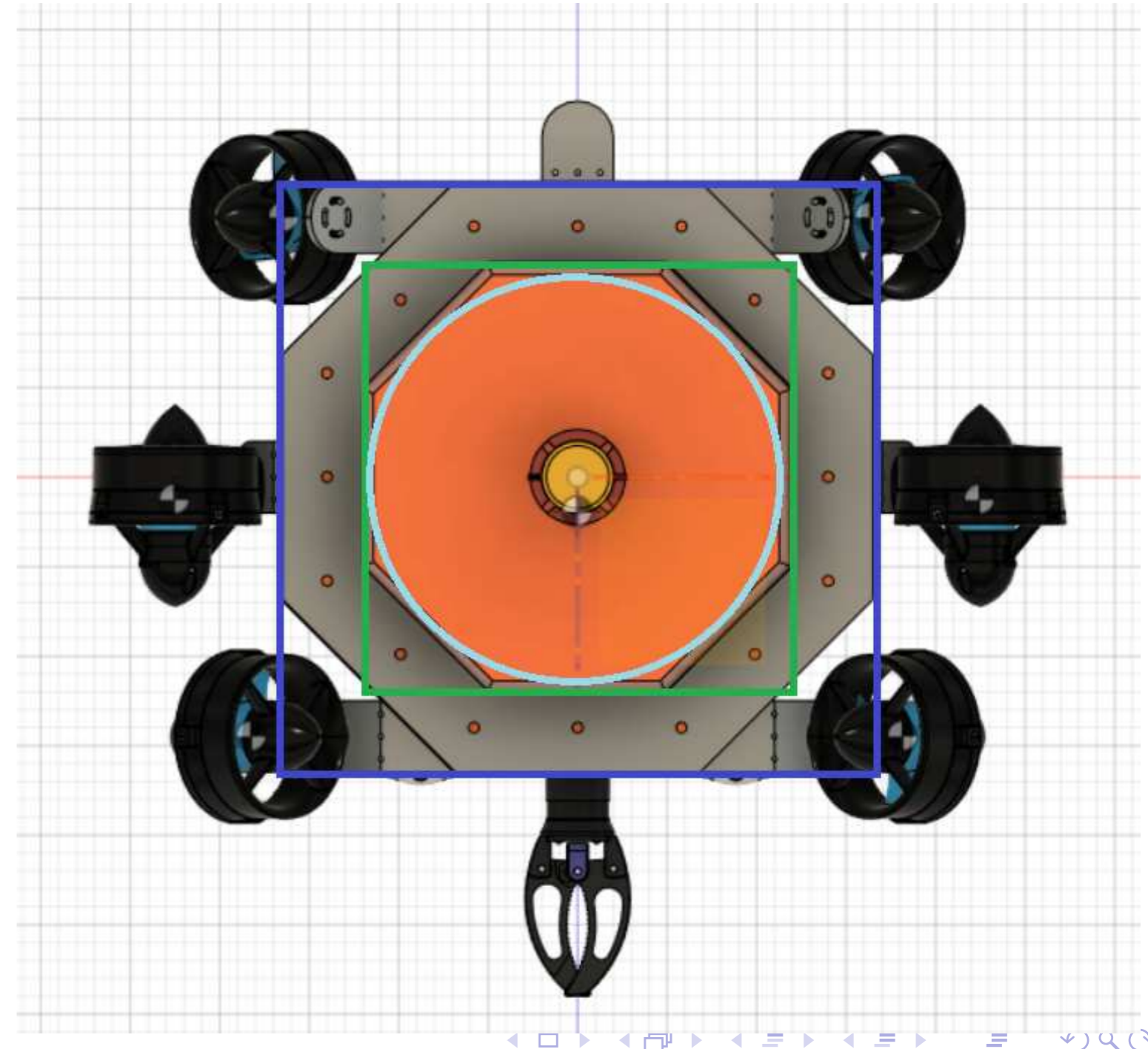
## Утверждение 1

*Если тело имеет три взаимно перпендикулярные оси симметрии, то матрицы присоединенных масс и моментов импульса имеют диагональный вид.*



# Допущения модели

- 1 Принимаем, что форма дрона — цилиндр с высотой 17см и радиусом 15см (серый круг на рис. справа);
- 2 Металлическую восьмиугольную рамку вокруг аппарата аппроксимируем плоской квадратной рамкой (между синей и зеленой чертой на рис. справа);
- 3 Считаем, что захват и 6 двигателей не оказывают сопротивления жидкости;
- 4 Угловые двигатели находятся под углом 45 градусов.



# Вычисленные теоретически присоединенные массы и моменты

В условиях модели присоединенные массы и моменты инерции равны

$$M_a = \begin{pmatrix} \pi \rho r^2 h & 0 & 0 \\ 0 & \pi \rho r^2 h & 0 \\ 0 & 0 & 2.377 \rho r^2 h \end{pmatrix},$$

$$M_a = \begin{pmatrix} 12.02 & 0 & 0 \\ 0 & 12.02 & 0 \\ 0 & 0 & 17.78 \end{pmatrix},$$

$$J_a = \begin{pmatrix} 0.725 \rho r^3 \frac{h^2}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0.725 \rho r^3 \frac{h^2}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$J_a = \begin{pmatrix} 1.15 & 0 & 0 \\ 0 & 1.15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

При этом собственная масса и момент инерции равны

$$M_m = \begin{pmatrix} 8.4 & 0 & 0 \\ 0 & 8.4 & 0 \\ 0 & 0 & 8.4 \end{pmatrix}, \quad J_m = \begin{pmatrix} 0.0675 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0675 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0945 \end{pmatrix}$$

## Уравнения движения

$$(M_m + M_a) \frac{du}{dt} = F_{\text{Arc}} + F_{\text{grav}} - \omega \times [(M + M_a) \cdot u] + \tau + F_N$$

$$(J_m + J_a) \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{Arc}} + M_{\text{grav}} - \omega \times [(J_m + J_a) \cdot \omega] - u \times [(M + M_a) \cdot u] + M_\tau + M_N$$

При движении только вдоль оси  $Ox_1$  без вращения  $\omega = 0$ ,  $u_{y_1} = u_{z_1} = 0$ :

$$(M_{m, x_1} + M_{a, x_1}) \frac{du_{x_1}}{dt} = F_{\text{Arc}, x_1} + F_{\text{grav}, x_1} + \tau_{x_1}$$

Следовательно

$$\frac{du_{x_1}}{dt} = \frac{\tau_{x_1}}{M_{m, x_1} + M_{a, x_1}} + \text{const.}$$

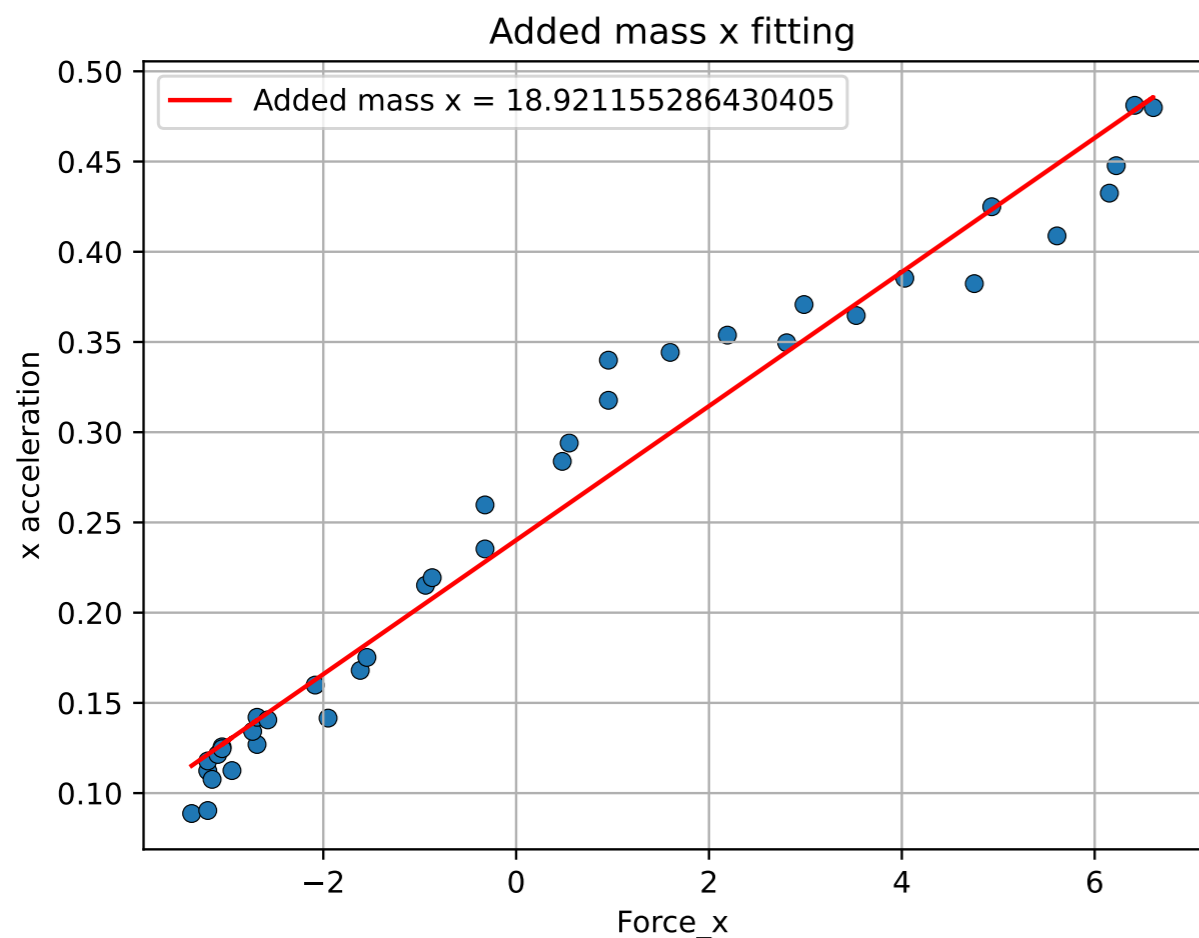


Рис. 3: Аппроксимация зависимости ускорения от управляющей силы вдоль оси  $Ox_1$

$$(M_a)_{33}^{\text{exp}} = 18.92 \text{ кг}$$

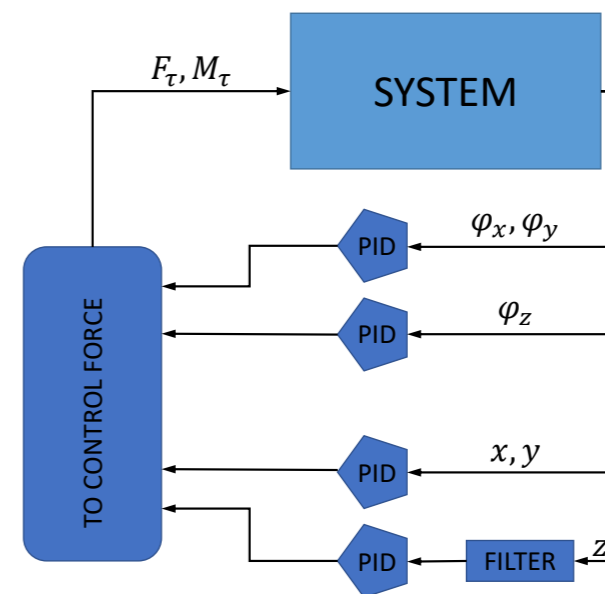


Рис. 4: Блок-схема системы управления  
Полученные коэффициенты PID-регуляторов:

$$\begin{array}{lll}
 P_x = 1.5, & P_y = 1.5, & P_z = 5 \\
 I_x = 0.25, & I_y = 0.25, & I_z = 1.3 \\
 D_x = 2.2, & D_y = 1.6, & D_z = 2.2 \\
 P_{\varphi_x} = 18, & P_{\varphi_y} = 18, & P_{\varphi_z} = 18 \\
 I_{\varphi_x} = 15, & I_{\varphi_y} = 15, & I_{\varphi_z} = 15 \\
 D_{\varphi_x} = 3.5, & D_{\varphi_y} = 3.5, & D_{\varphi_z} = 3.5
 \end{array}$$

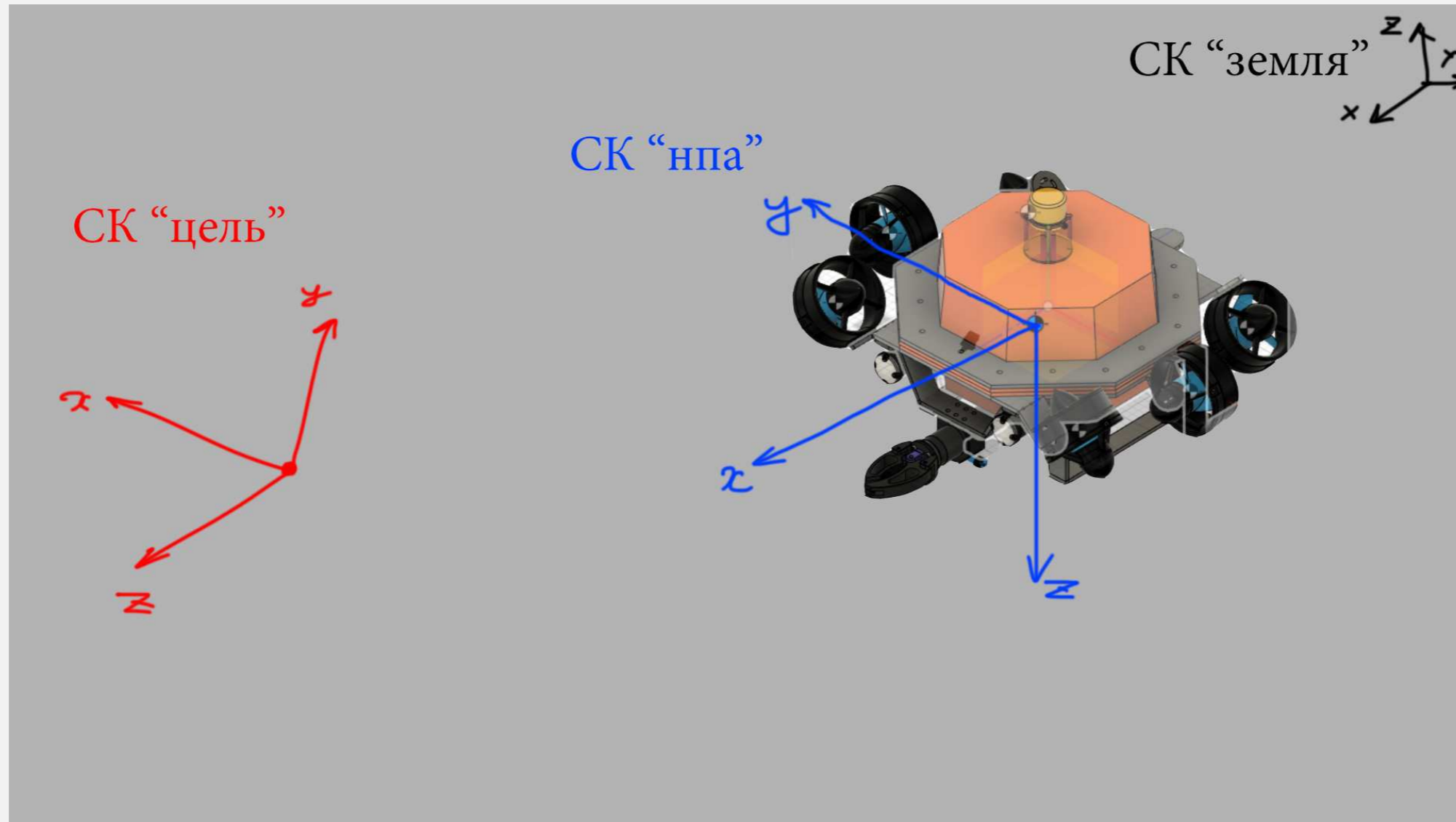
# О предлагаемом подходе к управлению НПА “Водяной”

Кустов А.Ю., Юрченков А.В., Белов И.Р.

лаборатория №1

# Основная идея

— решение задачи совмещения систем координат НПА и условной цели



# Преимущество предлагаемого подхода

## Все задачи

- стабилизации (целевая СК неподвижна)
- наведения (целевая СК неподвижна в координатах  $(x, y, z)$ , но может быть подвижной по углам  $(\varphi, \vartheta, \psi)$ )
- преследования/перехвата (целевая СК “запаздывает” от реальной цели/“опережает” положение реальной цели)

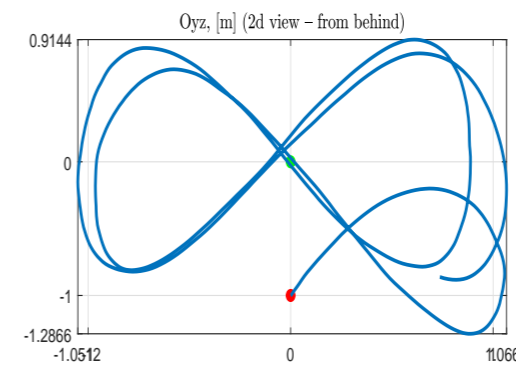
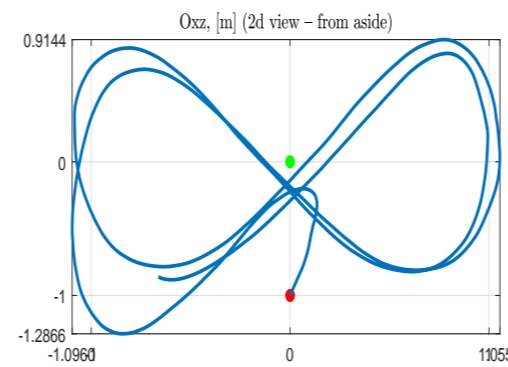
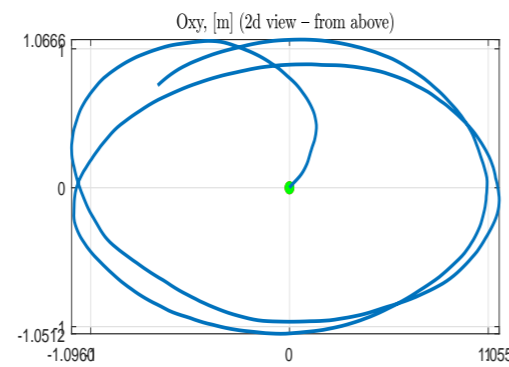
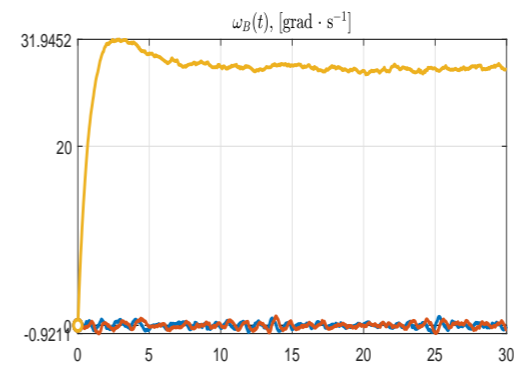
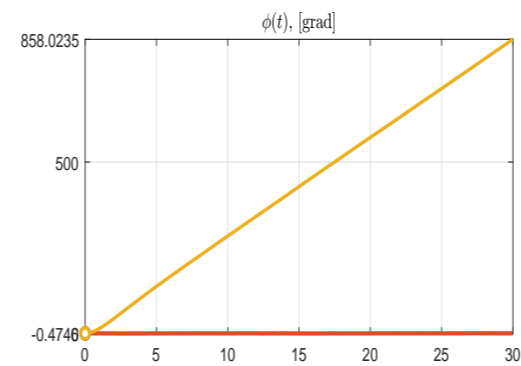
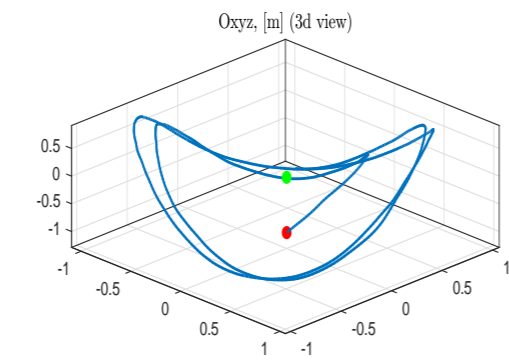
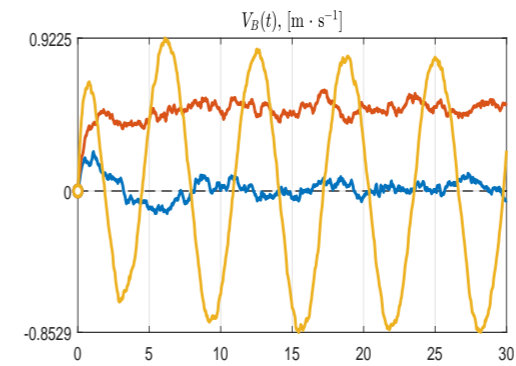
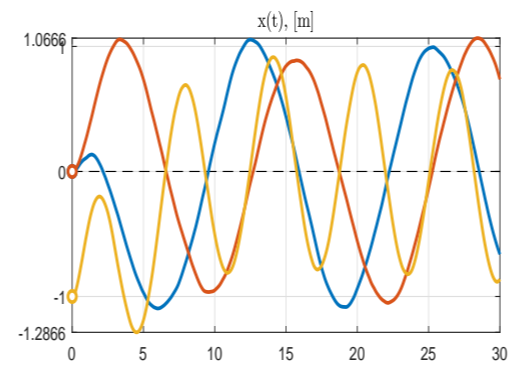
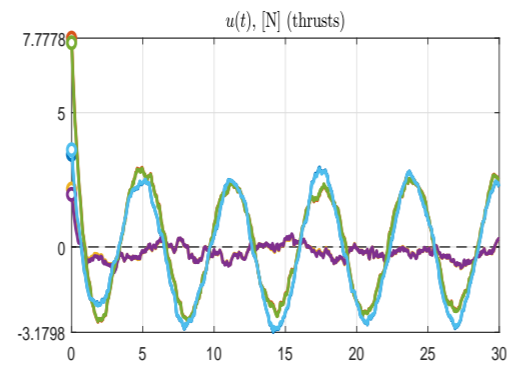
формулируются в общих терминах и могут быть решены с применением одинаковых математических инструментов.

# Кратко про решение

- 1 шаг. Составление математической модели (ММ)
- 2 шаг. Анализ ММ и возможности решения задач управления
- 3 шаг. Решения задачи управления для полученной ММ
  - 3.1. Решение задачи в “приведенных” координатах (асимптотический выход на целевую траекторию)
  - 3.2. Обратная замена (решение в физических переменных)
  - 3.3. Учет ограничений (anti-windup)
- 4 шаг. Численное моделирование
- 5 шаг. ~~Реализация на реальном объекте~~



# Пример



Спасибо за внимание!