

**СУЛИМОВ АЛЕКСАНДР СТАНИСЛАВОВИЧ**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ МАГНИТА ДЛЯ  
УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО  
ИНТЕЛЛЕКТА**

Выпускная квалификационная работа

Направление подготовки (специальность):  
14.05.04 Электроника и автоматика физических установок

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доц.

Старостенко А.А.



Москва

2025



# Цель выпускной квалификационной работы

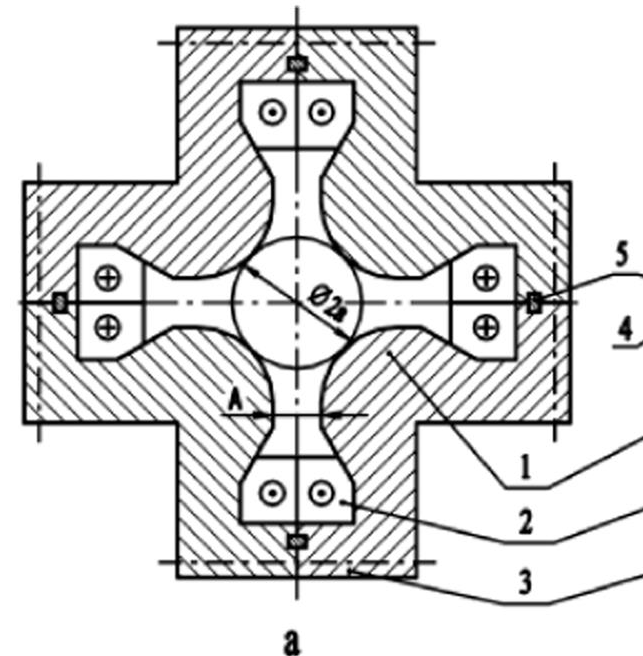
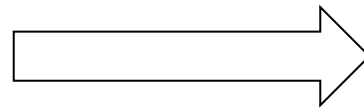
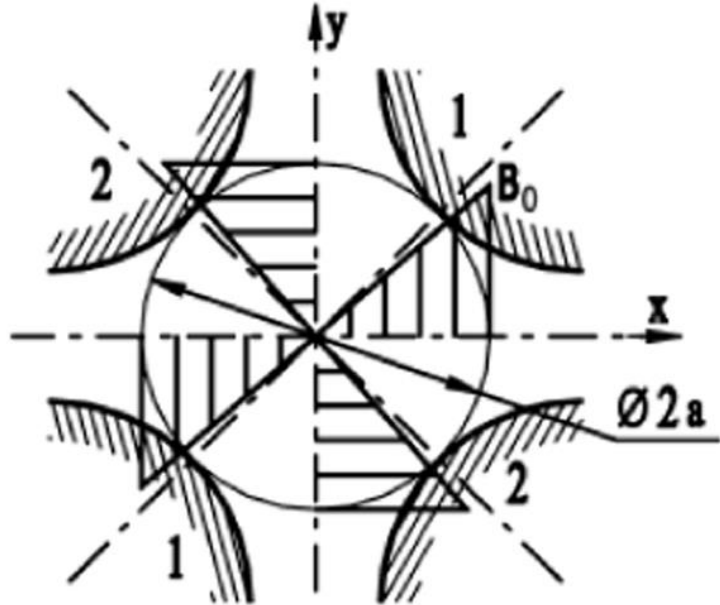
Оптимизация параметров формы полюсов квадрупольного магнита для максимального подавления всех гармоник, кроме основной, при разложении тангенсального магнитного поля в ряд Фурье в области хорошего поля (на окружности радиуса 0.8 от радиуса апертуры с центром в начале координат) методами искусственного интеллекта.

# Задачи выпускной квалификационной работы

- 1) Построение моделей квадрупольных магнитов с различными параметрами формы;
- 2) Выполнение расчетов магнитостатики для накопления данных;
- 3) Автоматизация процесса сбора информации;
- 4) Анализ полученных данных;
- 5) Обучение моделей искусственного интеллекта;
- 6) Подбор оптимальной формы.

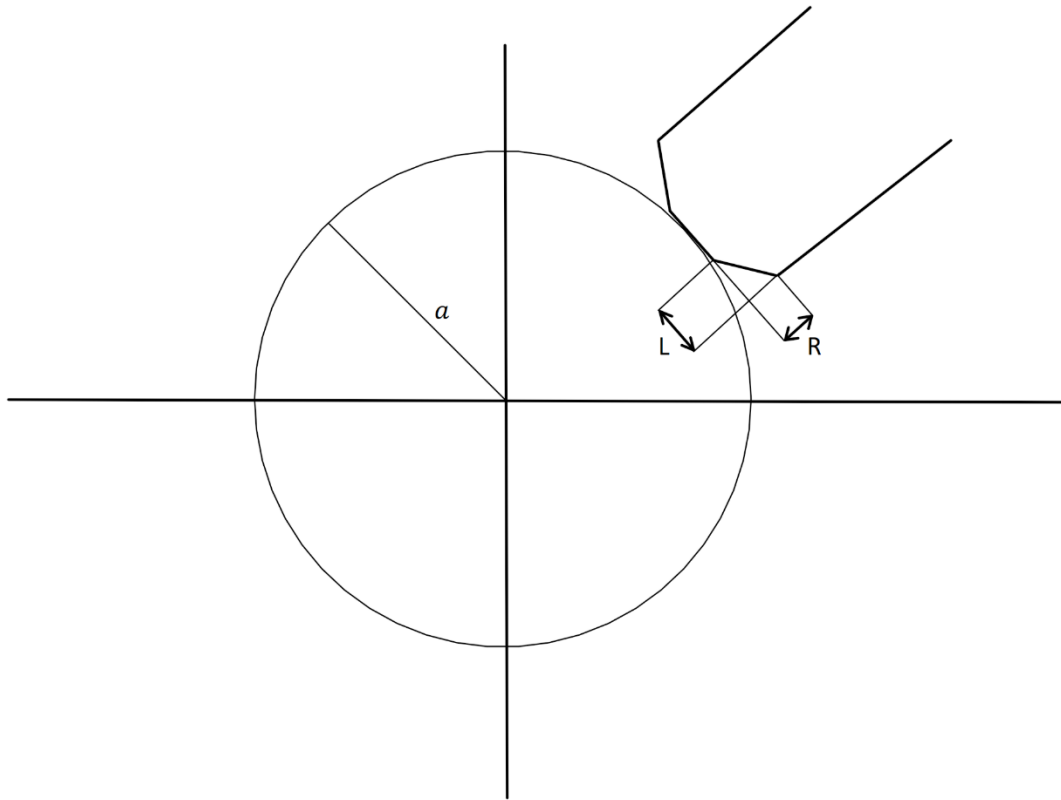
# Проблематика

Магнитное поле, создаваемое *квадрупольными* магнитами, можно разложить по гармоникам. Из них основной является 2я, а побочными: 6я, 10я и т.д. – они могут качественно менять характер движения частиц. Необходимо подобрать форму полюсов так, чтобы как можно сильнее подавить побочные гармоники.

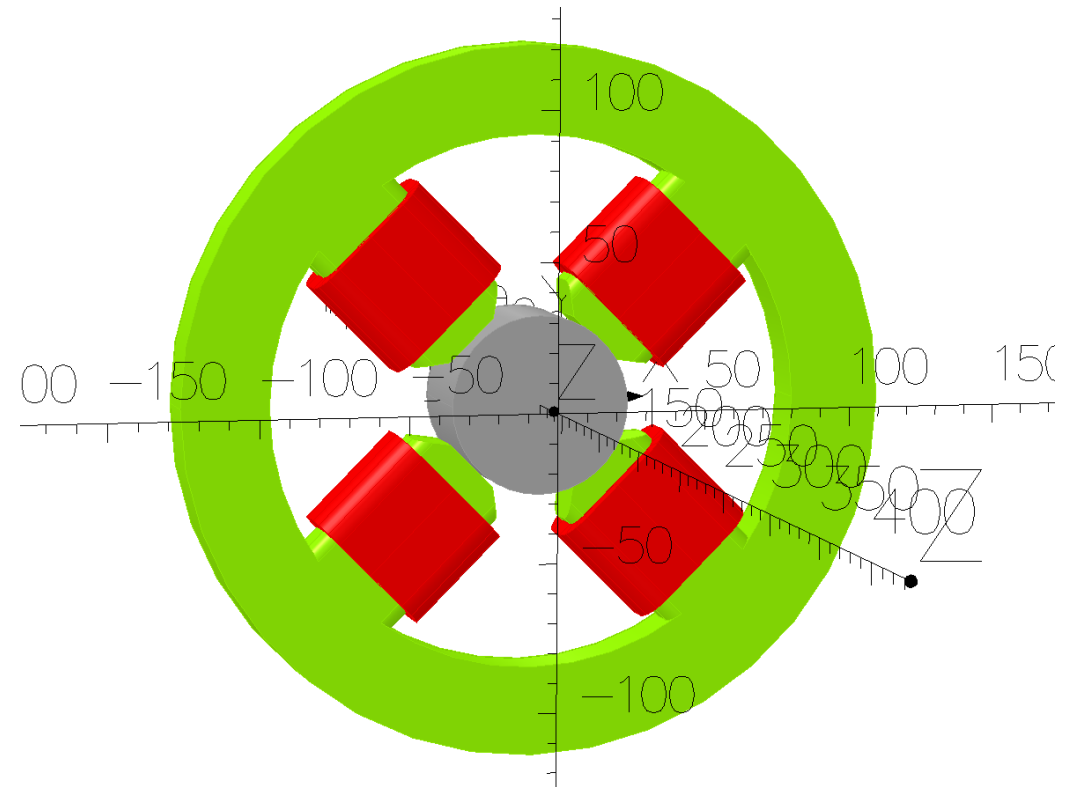


# Выбранная форма для оптимизации

Схематичный рисунок

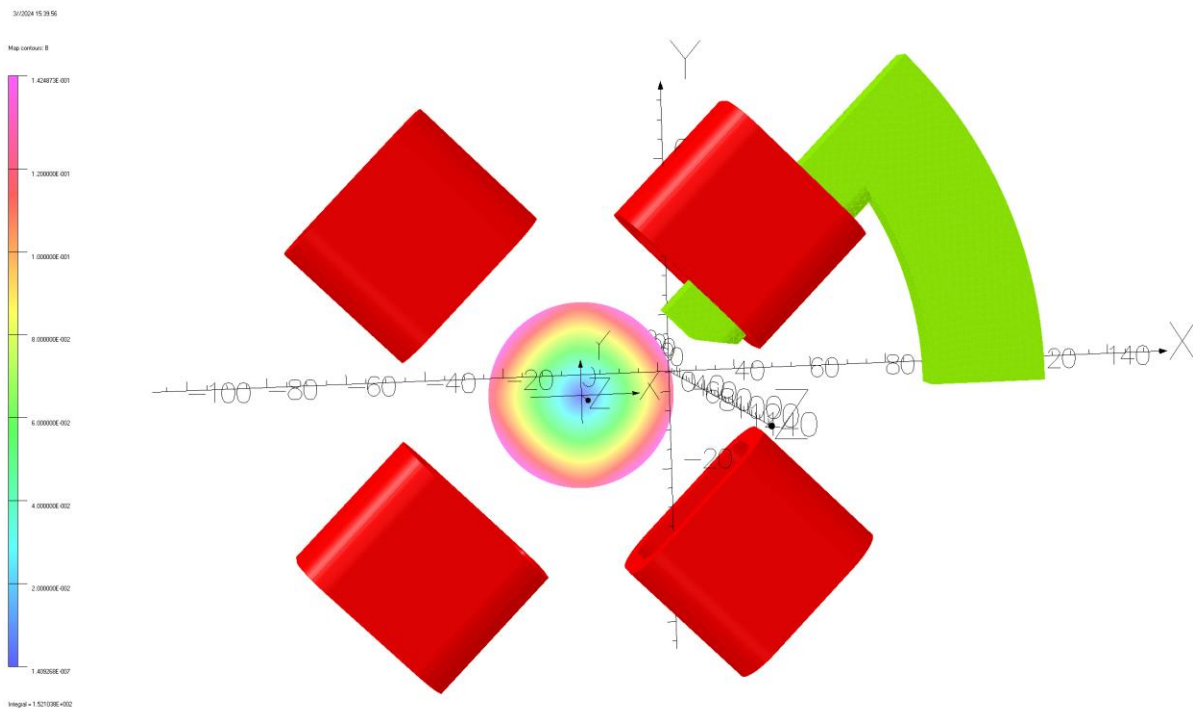


3d модель в Opera

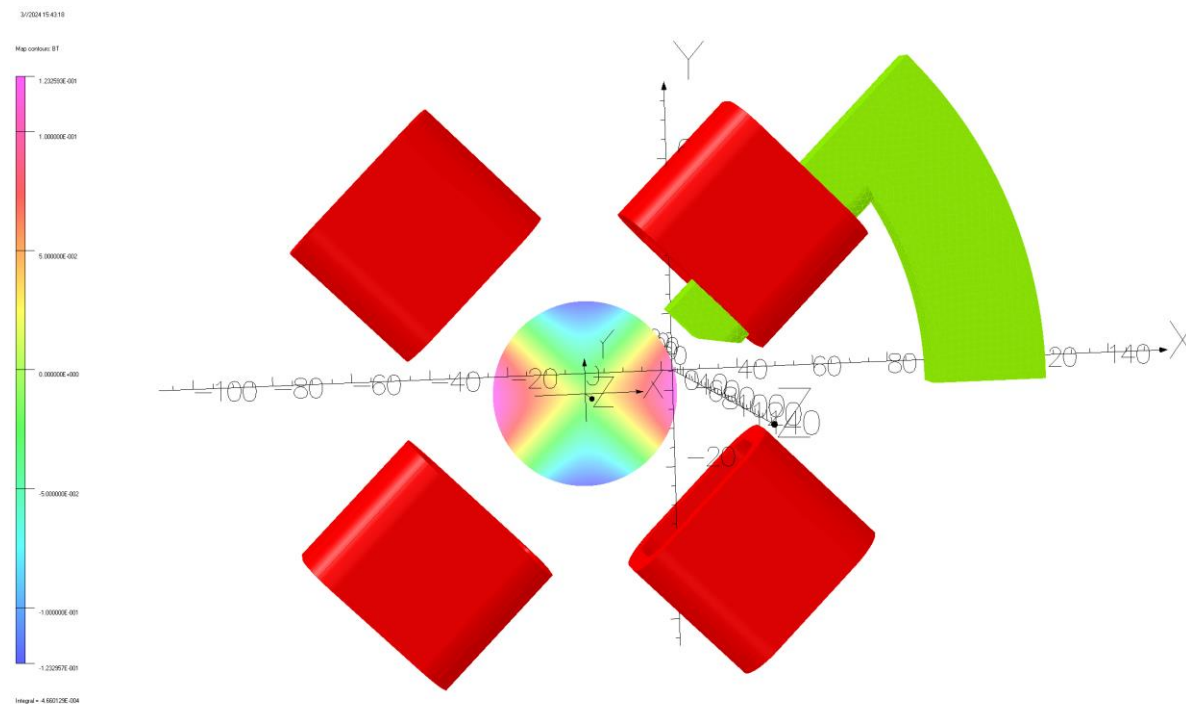


# Проверка на квадрупольность

Модуль полной магнитной индукции  $B$

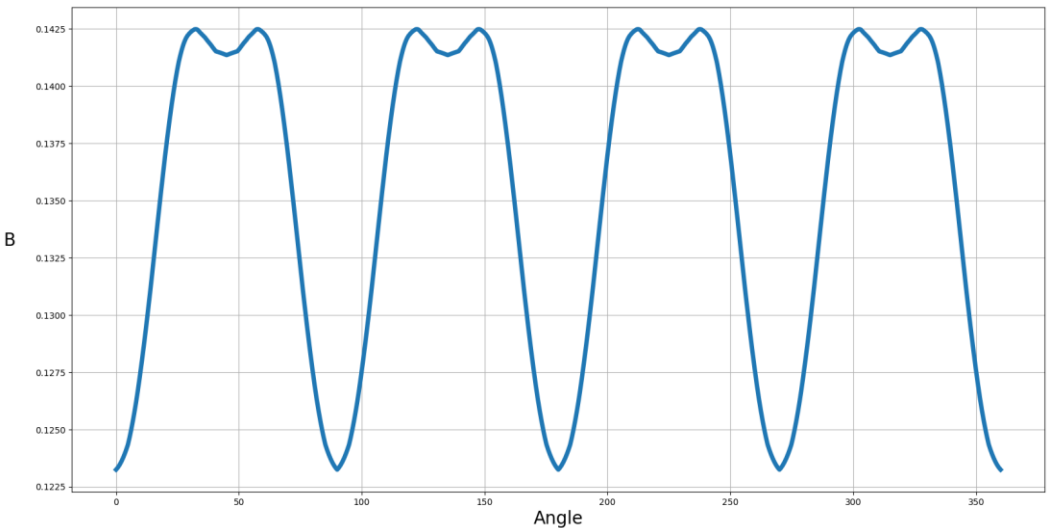


Модуль тангенсальной компоненты  $B_\theta$

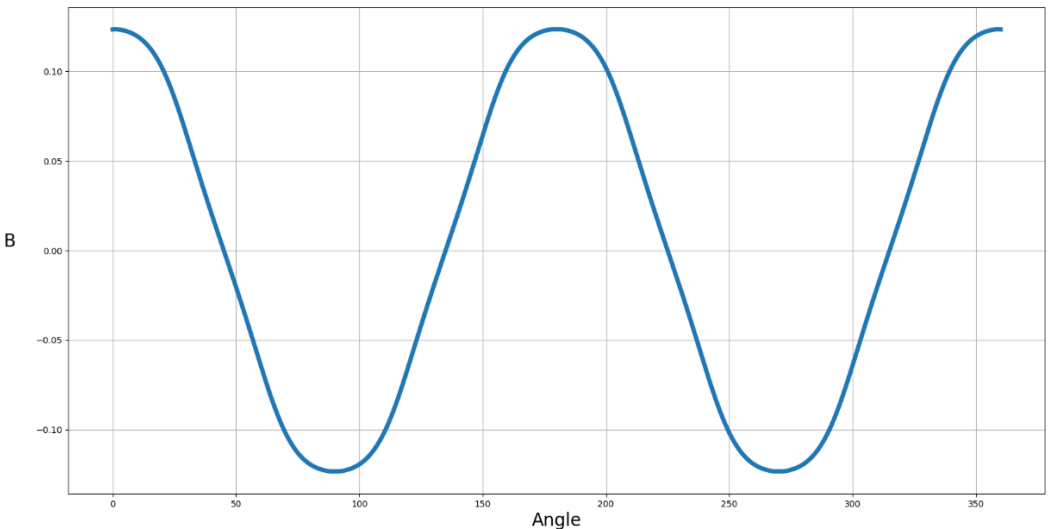


# Получение гармоник

Величина компоненты  $B$



Величина компоненты  $B_\theta$



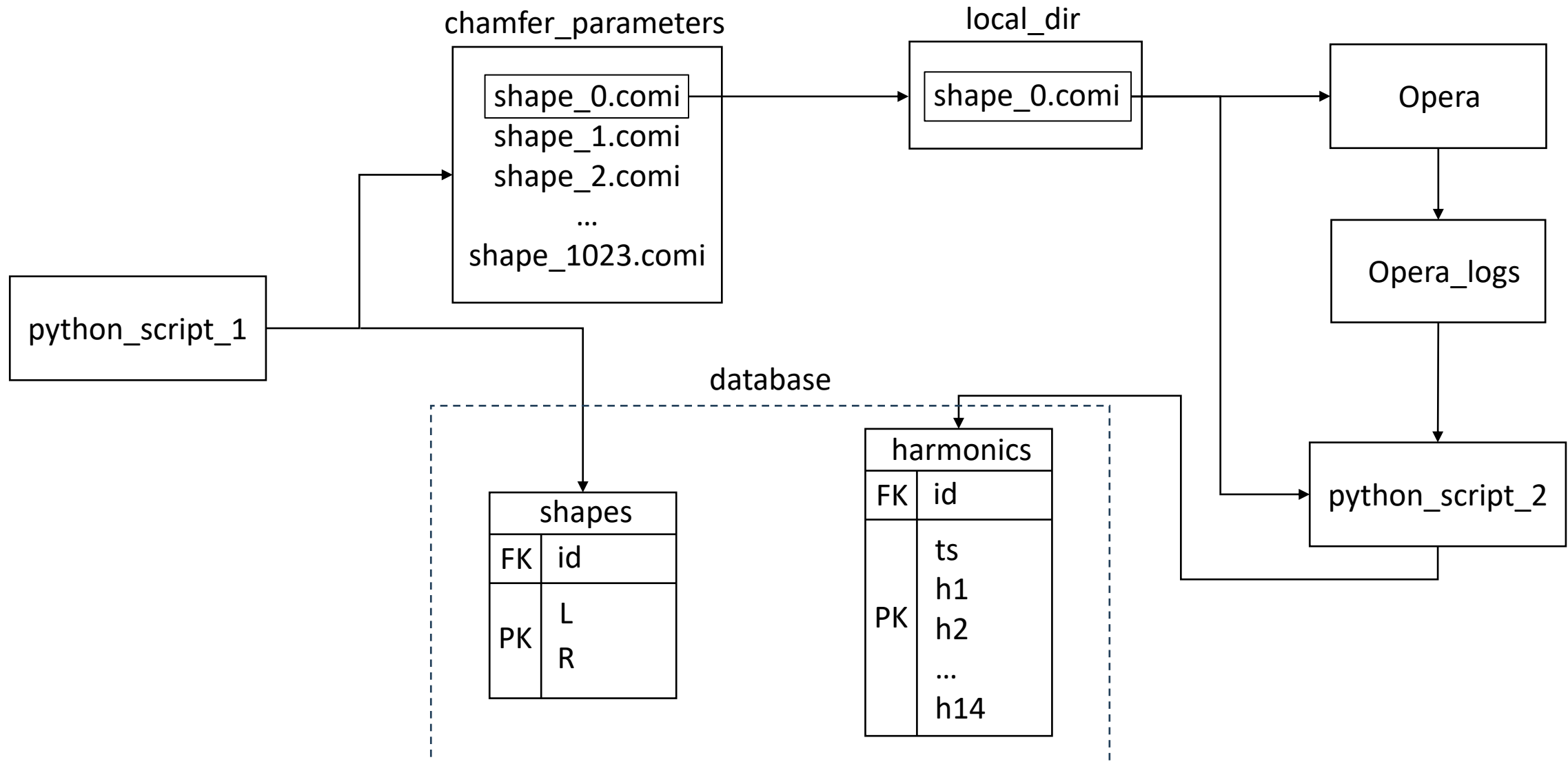
Информация о гармониках  $B_\theta$

Order n	Sine term A_n	Cosine term B_n	Amplitude	Phase
0	0.0	-5.09575021068187E-18	5.09575021068187E-18	180.0
1	-1.89679359804668E-17	-1.11130722679764E-17	2.19836978370872E-17	120.365494600491
2	3.70960005727468E-17	0.127737646025151	0.127737646025151	-1.66391376056419E-14
3	-2.98070122004986E-17	5.4752209710518E-18	3.03057093796287E-17	79.5914265766364
4	1.11752909686154E-17	1.66967134562768E-17	2.00914750198742E-17	-33.7948233557366
5	-1.39093611416619E-17	1.79977560632594E-17	2.2746198598486E-17	37.6982351675505
6	1.9670359055693E-17	-1.77193483125547E-03	1.77193483125547E-03	-180.0
7	-3.21164543601946E-18	2.75929452897561E-17	2.77792241718893E-17	6.6389954573779
8	-1.11275482700482E-18	9.37834879199961E-18	1.45525171900483E-17	49.8756567955579
9	-3.59282821638264E-17	3.05745012640912E-17	4.71771217940824E-17	-49.603078237069
10	-8.59357563811401E-19	-3.0502673794183E-03	3.0502673794183E-03	180.0
11	2.12928268190832E-18	-2.71050543121376E-18	3.44683687344121E-18	-141.848003761046
12	-1.07603977083976E-17	-1.14925430283463E-17	1.57437195129131E-17	136.884412082337
13	-1.171255663746E-18	-1.25225350922076E-17	1.49527022393235E-17	-146.874584287341
14	-2.74716770095526E-18	3.52575971862453E-04	3.52575971862453E-04	4.46431769153002E-13

Относительные гармоники  $B_\theta$

$$\frac{h_6}{h_2} = 1,38 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{h_{10}}{h_2} = 2,39 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{h_{14}}{h_2} = 2,76 \cdot 10^{-3}$$

# Сбор данных





# Анализ данных

Результат объединения таблиц

	321	199	11
id	3.210000000000000e+02	1.990000000000000e+02	1.100000000000000e+01
Rightchamfer	3.225874193548387e+00	1.935564516129032e+00	1.000000000000000e-04
Leftchamfer	6.452580645161290e-01	4.516206451612903e+00	7.096838709677419e+00
h0	9.446111427779959e-18	9.581636699340650e-18	6.857578740970819e-18
h1	2.032957819033580e-17	1.667567931388580e-17	3.333899244911680e-17
h2	1.338204564286490e-01	1.330293763509570e-01	1.338992916839650e-01
h3	2.895492201978110e-17	4.150024995633950e-17	2.795815852076480e-17
h4	1.446945391704250e-17	1.398960474999270e-17	8.654669323130510e-18
h5	4.533892175044330e-18	1.285681892171420e-17	2.146240968116860e-17
h6	1.117054406612580e-02	9.101818953198710e-03	1.150053845489950e-02
h7	3.941103534392750e-17	3.718962872312400e-17	3.109212921129420e-17
h8	1.484586506055100e-17	1.081510555352500e-17	1.222002192040060e-17
h9	3.117048148529790e-17	2.836491676036450e-17	4.884705901169670e-17
h10	7.283561354229580e-05	9.758515857899120e-04	1.181119158387660e-04
h11	1.698155776464340e-17	3.651331292913090e-18	9.603207329607590e-18
h12	2.190002215005180e-17	2.194906555553400e-17	1.716311520608190e-17
h13	1.366056724796640e-17	1.722953260144730e-17	1.153506302935730e-17
h14	2.727755796173380e-04	3.805530588712320e-04	2.231782603975640e-04

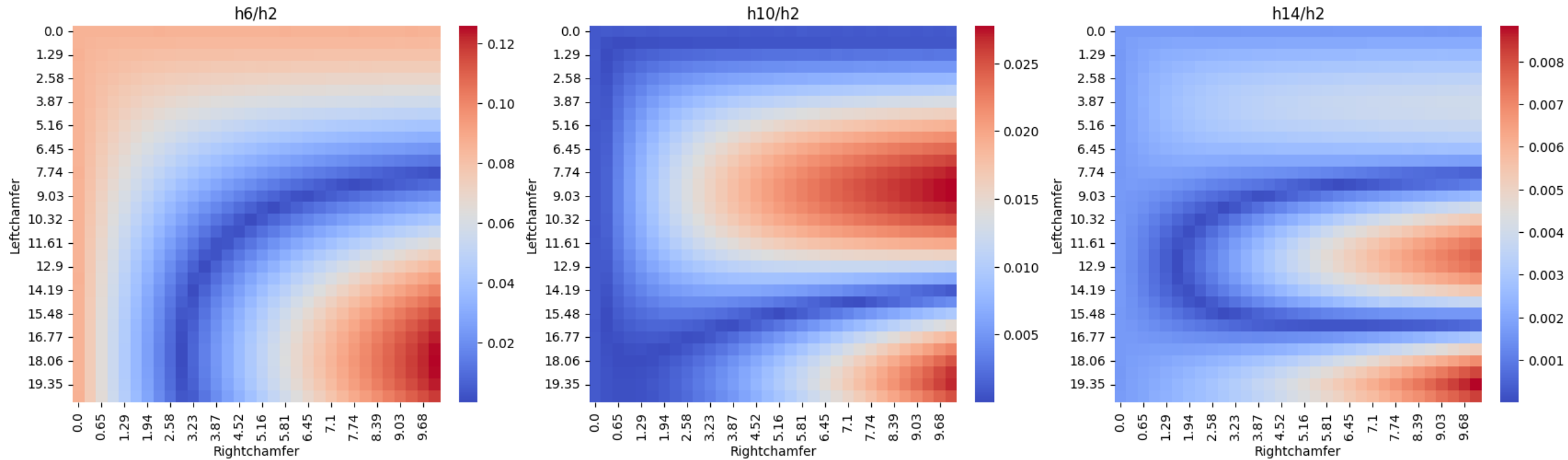
Пример 15 рассматриваемых сэмплов

	Rightchamfer	Leftchamfer	h6/h2	h10/h2	h14/h2
501	4.838761290322580	13.548419354838709	0.027578451469595	0.008749976226714	0.003292303444092
39	0.322677419354839	4.516206451612903	0.082204256593007	0.000875048345646	0.001946816062154
846	8.387112903225805	9.032312903225806	0.012595241264076	0.026106065720266	0.002019140719783
344	3.225874193548387	15.483893548387096	0.004383789307303	0.002459327183563	0.000142414454666
683	6.774225806451613	7.096838709677419	0.022359874698505	0.022352850986659	0.001965748075040
453	4.516183870967741	3.225890322580645	0.067450380579613	0.008406547260938	0.003413667365825
492	4.838761290322580	7.741996774193548	0.025735859825430	0.019914700737117	0.001354907237562
691	6.774225806451613	12.258103225806453	0.043417672729237	0.015167894666399	0.005445182260837
332	3.225874193548387	7.741996774193548	0.039541779010420	0.015539730772001	0.001560288584346
381	3.548451612903226	18.709683870967741	0.014866681949153	0.004366017532441	0.003137647072763
279	2.580719354838710	14.838735483870966	0.012694595575171	0.004256586038606	0.000300463720194
748	7.419380645161290	7.741996774193548	0.010971015578054	0.024392111265237	0.000849704375564
682	6.774225806451613	6.451680645161289	0.030260459810126	0.020914971667239	0.002674430466215
932	9.354845161290324	2.580732258064516	0.069501859326500	0.007644297602316	0.003444064836199
849	8.387112903225805	10.967787096774194	0.042012863817271	0.021892745548176	0.005647821429236



# Визуализация данных

Тепловые карты зависимостей относительных гармоник от параметров формы



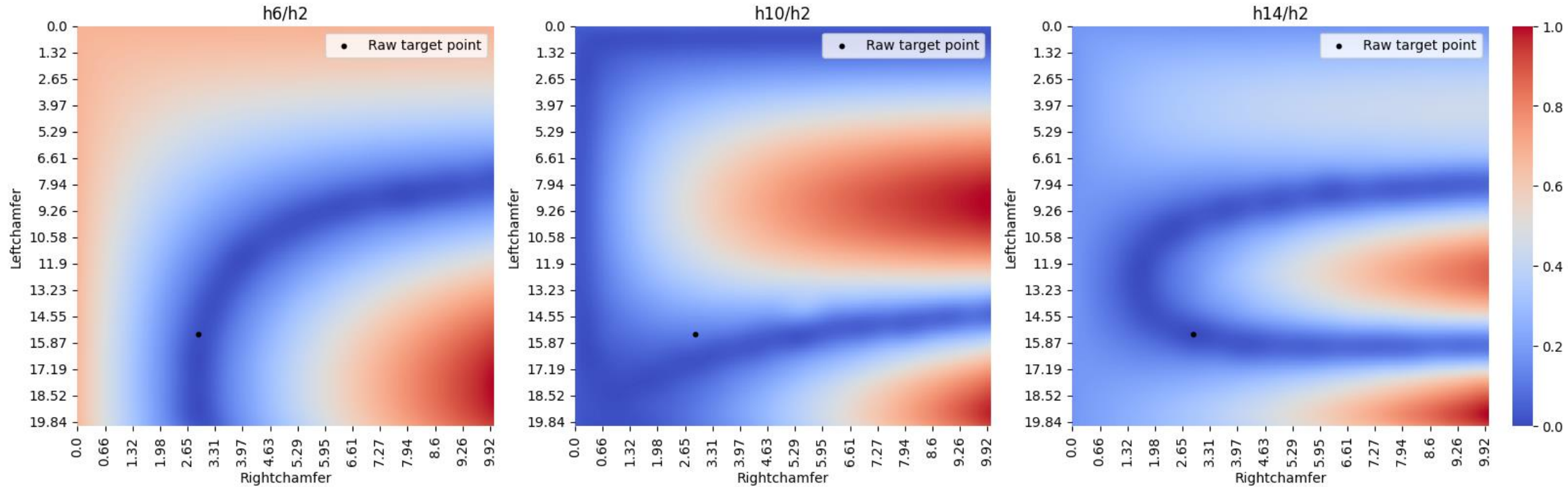
# Обучение моделей искусственного интеллекта

*LinearRegression*  
 $R^2 \approx 0,001$

*PolinomialRegression*  
 $R^2 \approx 0,34$

*SupportVectorRegression*  
 $R^2 \approx 0,99$

*FullyConnectedNeuralNetwork*  
 $R^2 \approx -301$



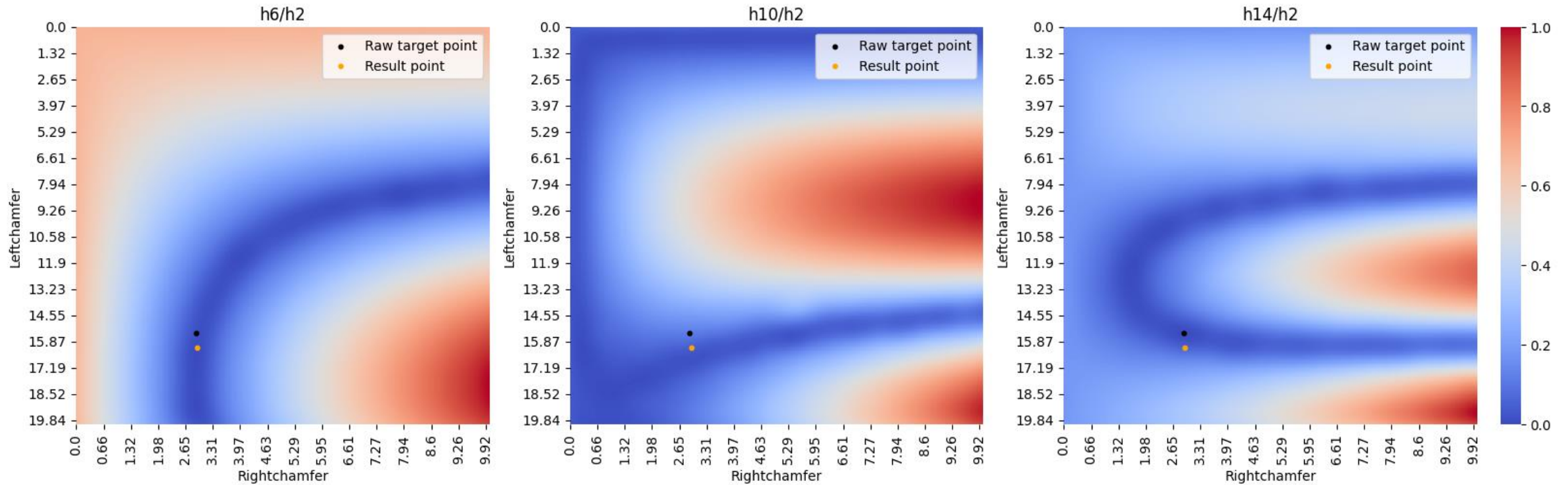
# Подбор оптимальной формы

$$F(R, L) = model_1(R, L) + model_2(R, L) + model_3(R, L);$$

$$R_0 = 3, L_0 = 16;$$

$$R_N = 2.938, L_N = 16.196 \text{ - конечная форма}$$

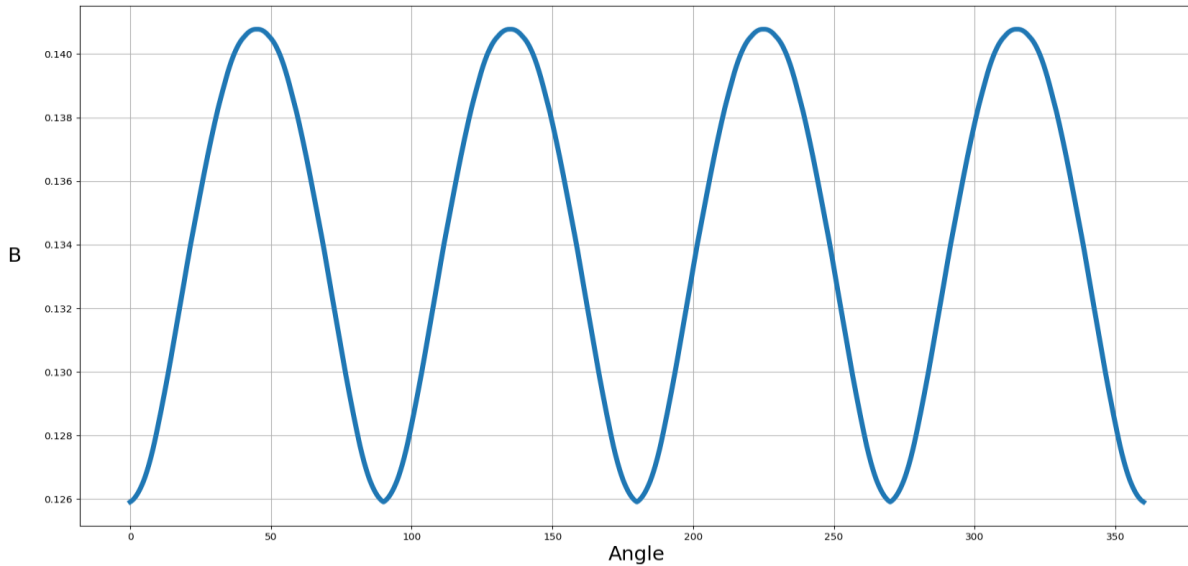
$$\begin{cases} R_{i+1} = R_i - l \cdot \frac{\partial F(R, L)}{\partial R} \\ L_{i+1} = L_i - l \cdot \frac{\partial F(R, L)}{\partial L} \end{cases} \bigg|_{(R_i, L_i)}$$





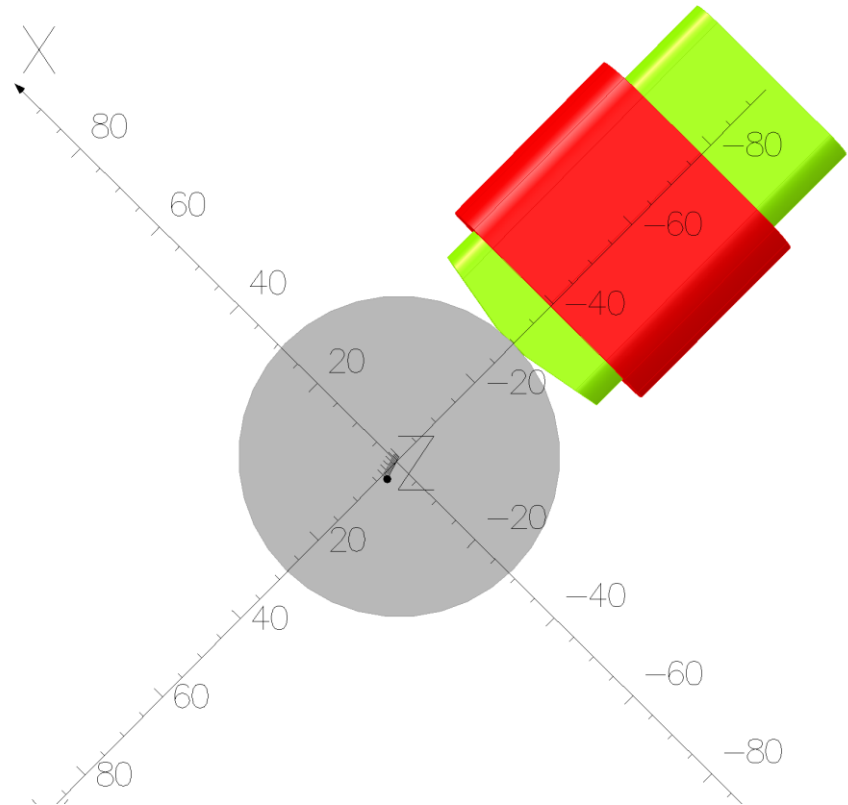
# Результаты

Величина компоненты  $B$



Информация о гармониках  $B_\theta$

Order n	Sine term A_n	Cosine term B_n	Amplitude	Phase
0	0.0	-1.96511643762998E-18	1.96511643762998E-18	180.0
1	1.18674349790486E-17	-1.90548531814327E-17	2.24482391903664E-17	-148.085192745348
2	4.55607914264724E-17	0.126107866787626	0.126107866787626	-2.07000651625393E-14
3	-1.68934090018867E-17	-6.23416249179165E-19	1.69049080306509E-17	92.1134229793513
4	-2.27755494325519E-17	1.38506827535023E-17	2.66564638444934E-17	58.6946157857161
5	7.47425108209082E-18	1.68322387278375E-17	1.84170760390744E-17	-23.9433168499931
6	2.13923742107051E-18	1.06235810983472E-04	1.06235810983472E-04	-1.15374725781366E-12
7	2.083102630183E-18	2.91921434941722E-17	2.9266372483658E-17	-4.08161269334356
8	-3.91434730987151E-18	1.15196480826585E-17	1.21665281329801E-17	18.7676310614024
9	2.26736732595096E-17	2.55058561077215E-17	3.41268831695306E-17	-41.6357994889207
10	1.05608714974044E-17	-1.1800238425559E-04	1.1800238425559E-04	-179.999999999995
11	-2.24999844180107E-18	7.94178091345632E-18	8.2543550363094E-18	15.8180398081267
12	-1.53523607434246E-17	-1.26580603637683E-17	1.98977755683656E-17	129.505667606347
13	3.1390397549684E-19	-1.09775469964157E-17	1.09820341360036E-17	-178.362068202619
14	1.68948092259442E-18	-9.23917676122024E-05	9.23917676122024E-05	-179.999999999999



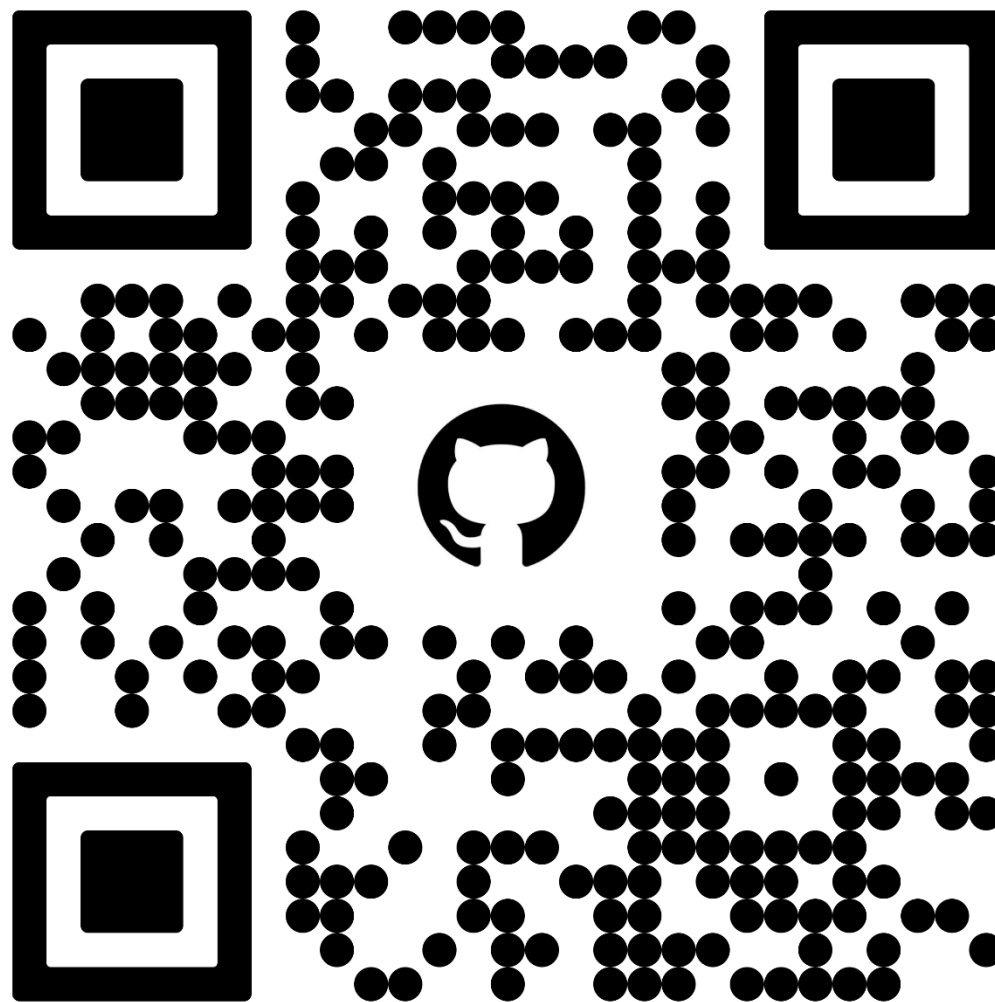
Относительные гармоники  $B_\theta$

$$\frac{h6}{h2} = 8,42 \cdot 10^{-4}; \quad \frac{h10}{h2} = 9,36 \cdot 10^{-4}; \quad \frac{h14}{h2} = 7,33 \cdot 10^{-4}$$

# Заключение

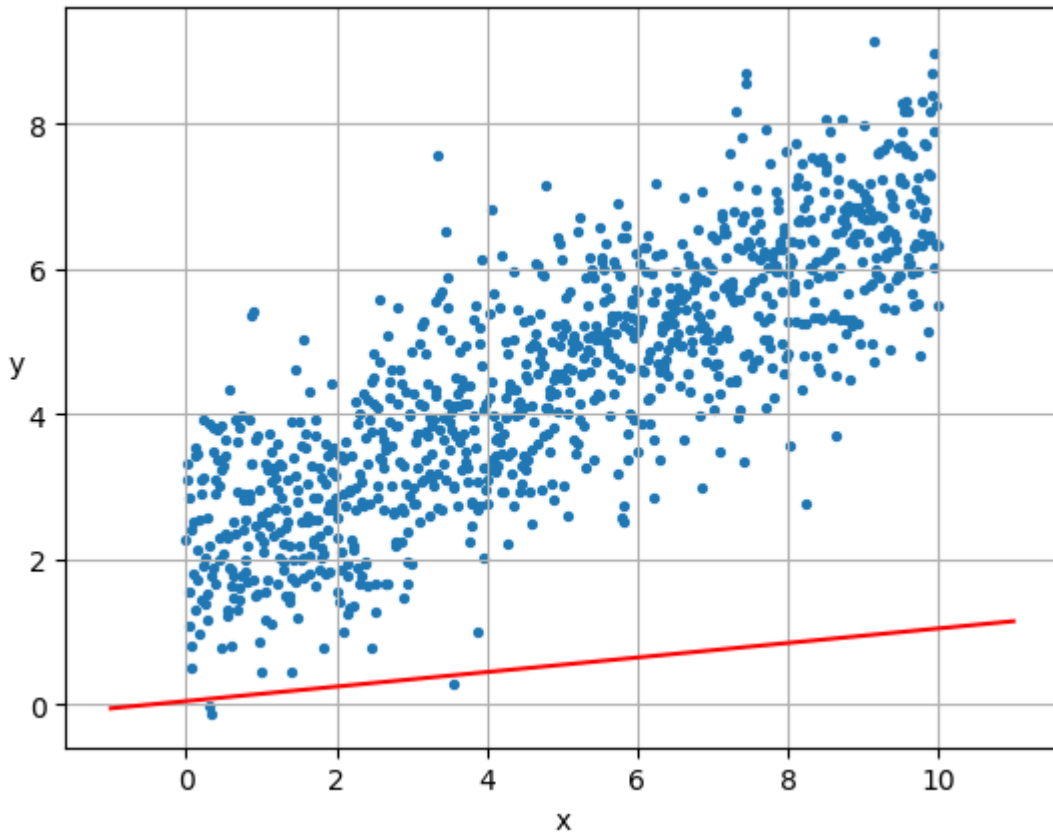
- 1) Сделаны построения моделей квадрупольных магнитов с различными параметрами формы полюсного наконечника;
- 2) Выполнены расчеты магнитостатики для накопления данных;
- 3) Автоматизирован процесс сбора информации;
- 4) Произведен анализ полученных данных;
- 5) Обучены модели искусственного интеллекта;
- 6) Подобрана оптимальная форма полюса для данной геометрии.

*Спасибо за внимание!*

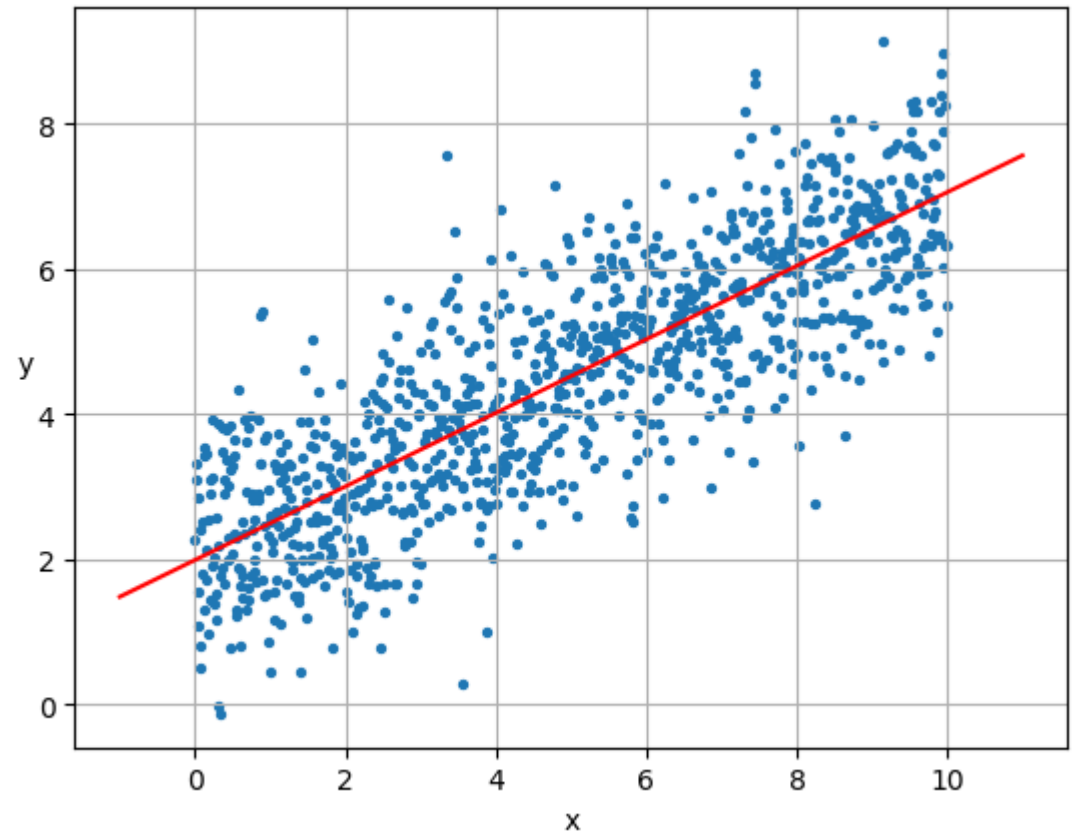


# Дополнительный слайд 1

**Обучение модели искусственного интеллекта** — это процесс (настройка параметров), при котором алгоритм "учится" находить закономерности в данных, чтобы выполнять определенную задачу (например, классификацию, регрессию, кластеризацию и т.д.).



обучение





# Дополнительный слайд 2

Другой подход к решению задачи – использование **генетических алгоритмов**.

**Генетический алгоритм** - это эвристический метод оптимизации и поиска решений, вдохновленный биологической эволюцией. В его основе лежат *селекция*, *скрещивание* и *мутация* – популяция стремится со временем максимизировать **функцию приспособленности** (fitness-function).

**Популяция** – набор особей, **ген** – внутренность особи, **функция приспособленности** – мера адаптации особи.

