



# Методы и алгоритмы генерации решений в системах информационно-аналитической поддержки при проектировании и диагностике узлов и агрегатов летательных аппаратов

## **Руководитель МНШ:**

д.т.н. Лебедев Валентин Григорьевич

## **Участники МНШ:**

- Вересников Георгий Сергеевич, д.т.н., 02.05.1980, лаб. 46;
- Огородников Олег Викторович, 13.07.1992, лаб. 46;
- Голев Артем Владимирович, 15.08.1994, лаб. 46;
- Московцев Александр Михайлович, 19.01.1998, лаб. 46;
- Мартиросян Мария Пилосовна, 17.06.1999, лаб. 46.

## **Срок реализации проекта:**

2 года (июнь 2021 – май 2023)



## Цель:

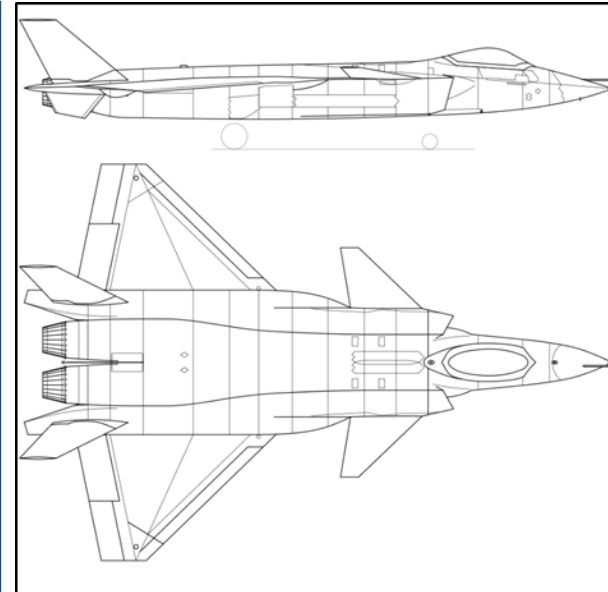
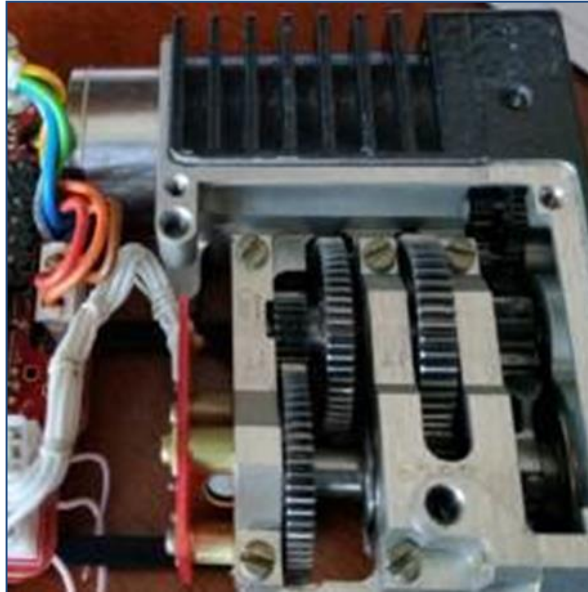
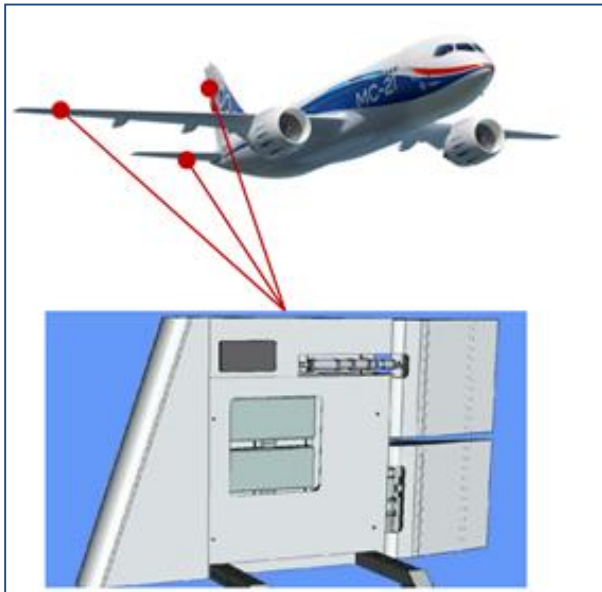
Разработка теории, методов и алгоритмов генерации решений для создания эффективных и безопасных летательных аппаратов.

## Задачи:

- Развитие методов и алгоритмов генерации решений, позволяющих обеспечить раннюю диагностику узлов и агрегатов летательных аппаратов с использованием методов интеллектуального анализа данных;
- Развитие методов и алгоритмов генерации решений, позволяющих обеспечить выполнение технических требований к летательным аппаратам на этапе предварительного проектирования в условиях параметрической неопределенности.

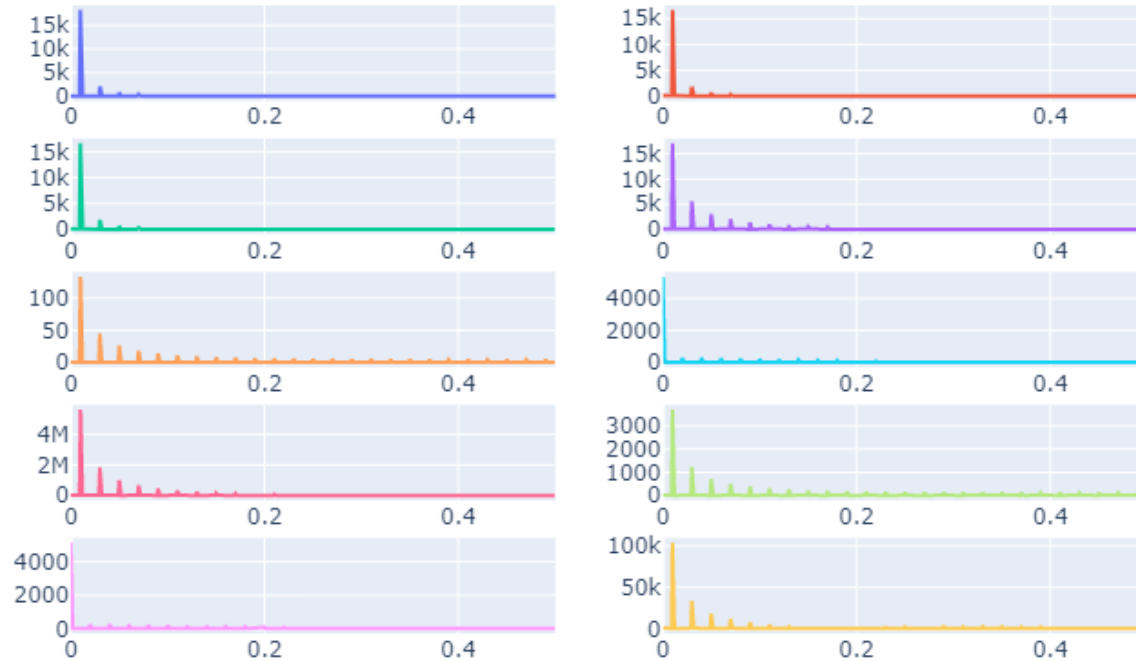
## № 1

Формализованы задачи генерации решений в системах информационно-аналитической поддержки при диагностике электромеханического привода (ЭМП) летательного аппарата и синтезе ряда параметров летательных аппаратов на этапе предварительного проектирования.



## № 2

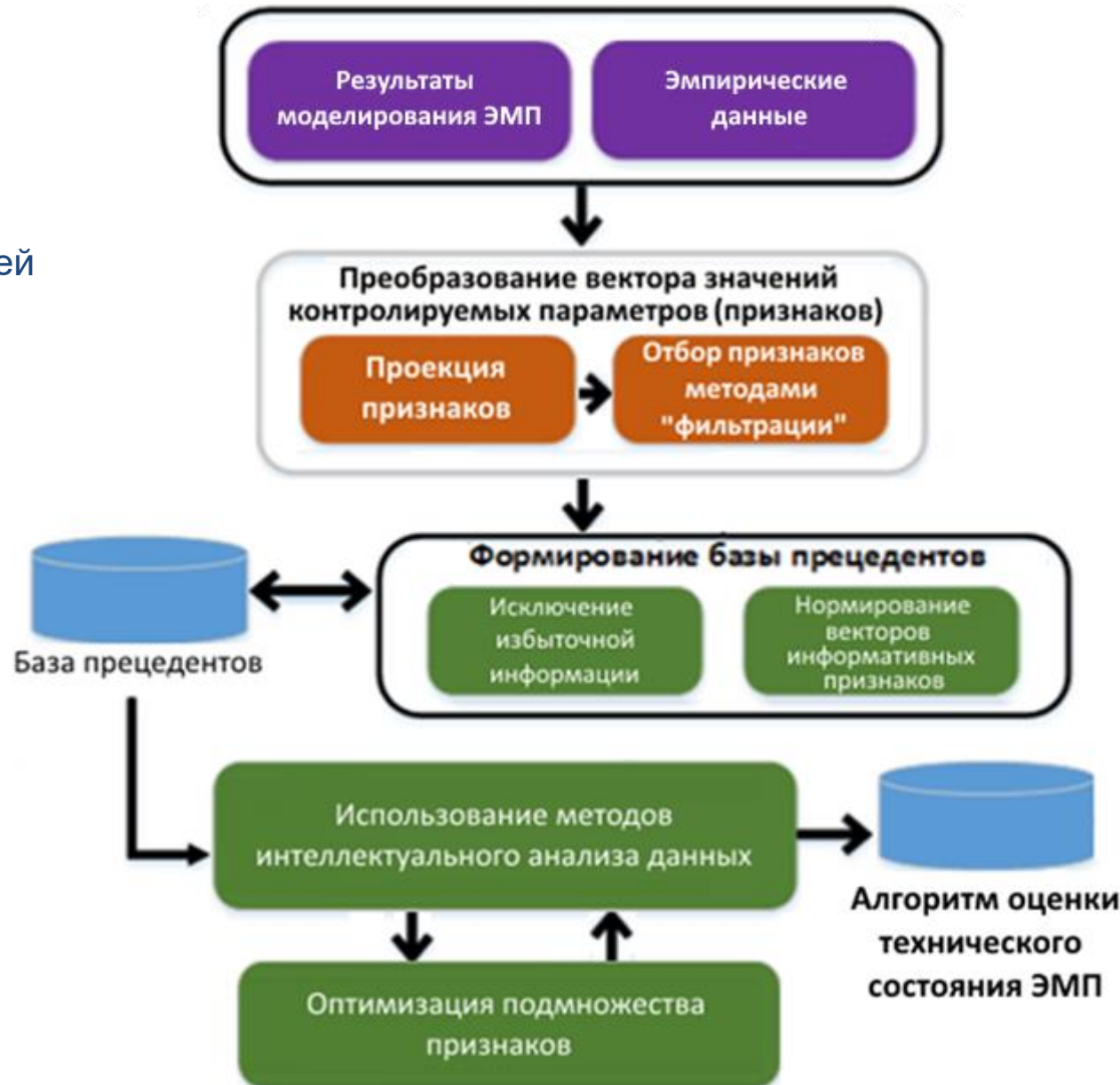
Сформирована база прецедентов с использованием математической модели ЭМП, в которой отражены данные по деградациям ЭМП, связанным с изменением момента сухого трения и люфта. Эта база прецедентов является основой для построения алгоритмов оценки и прогноза технического состояния ЭМП с использованием методов интеллектуального анализа данных (ИАД).



Амплитудные спектры контролируемых параметров

## № 3

Предложена схема анализа данных для поиска и формализации закономерностей в эмпирических данных по эксплуатации ЭМП, в которой интегрированы: методы формирования обучающей выборки; алгоритмы снижения размерности (выделения информативных признаков); методы ИАД, обеспечивающие возможность накопления опыта, формируемого в процессе эксплуатации ЭМП.

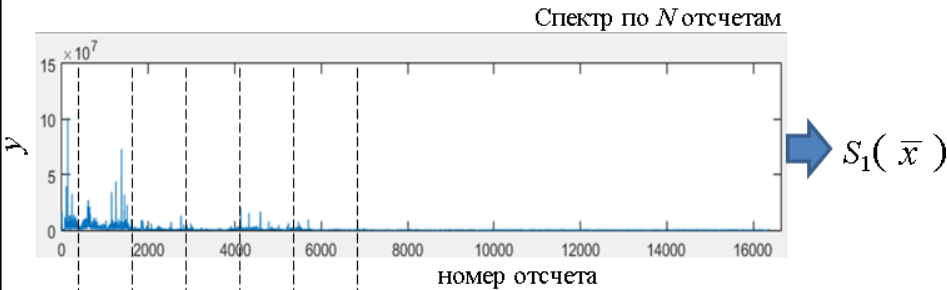


## № 4

Разработаны оптимизационные алгоритмы отбора информативных признаков на основе поиска диапазонов интегрирования спектра стационарного сигнала. Использование найденных диапазонов обеспечивает максимизацию показателей качества моделей оценки и прогнозирования технического состояния ЭМП.

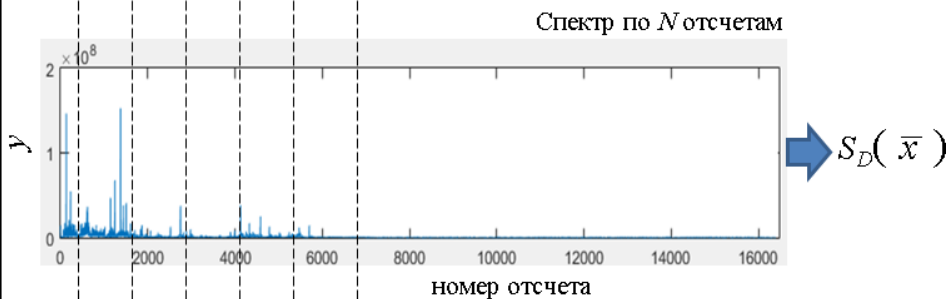
Номер измерения

1

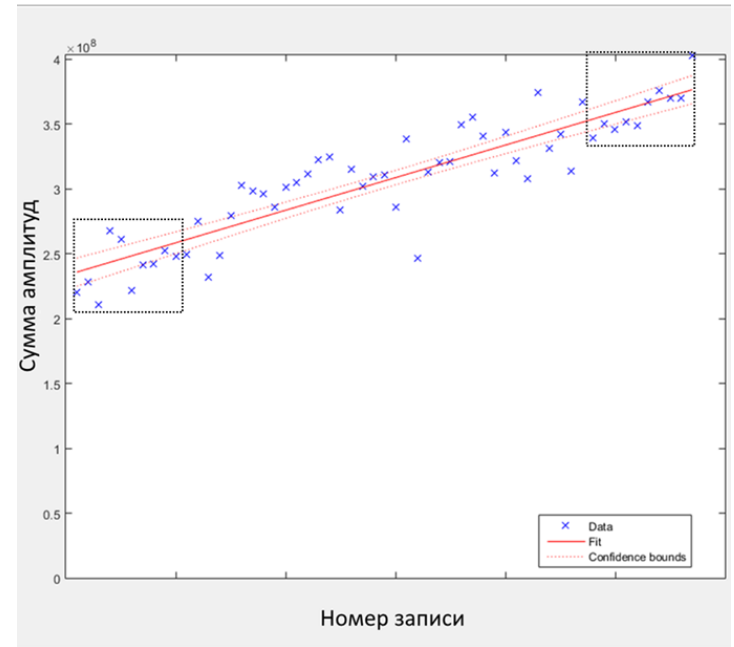


...

$D$

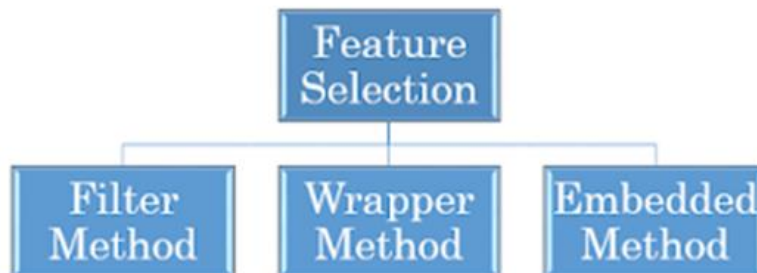


$\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \dots)$



## № 5

Для решения проблемы оценки технического состояния ЭМП с использованием методов машинного обучения разработаны и исследованы алгоритмы снижения размерности пространства признаков, основанные на методах «фильтрации» – filter methods, «оберточных» методах – wrapper methods, «встроенных» методах» – embedded methods.



## № 6

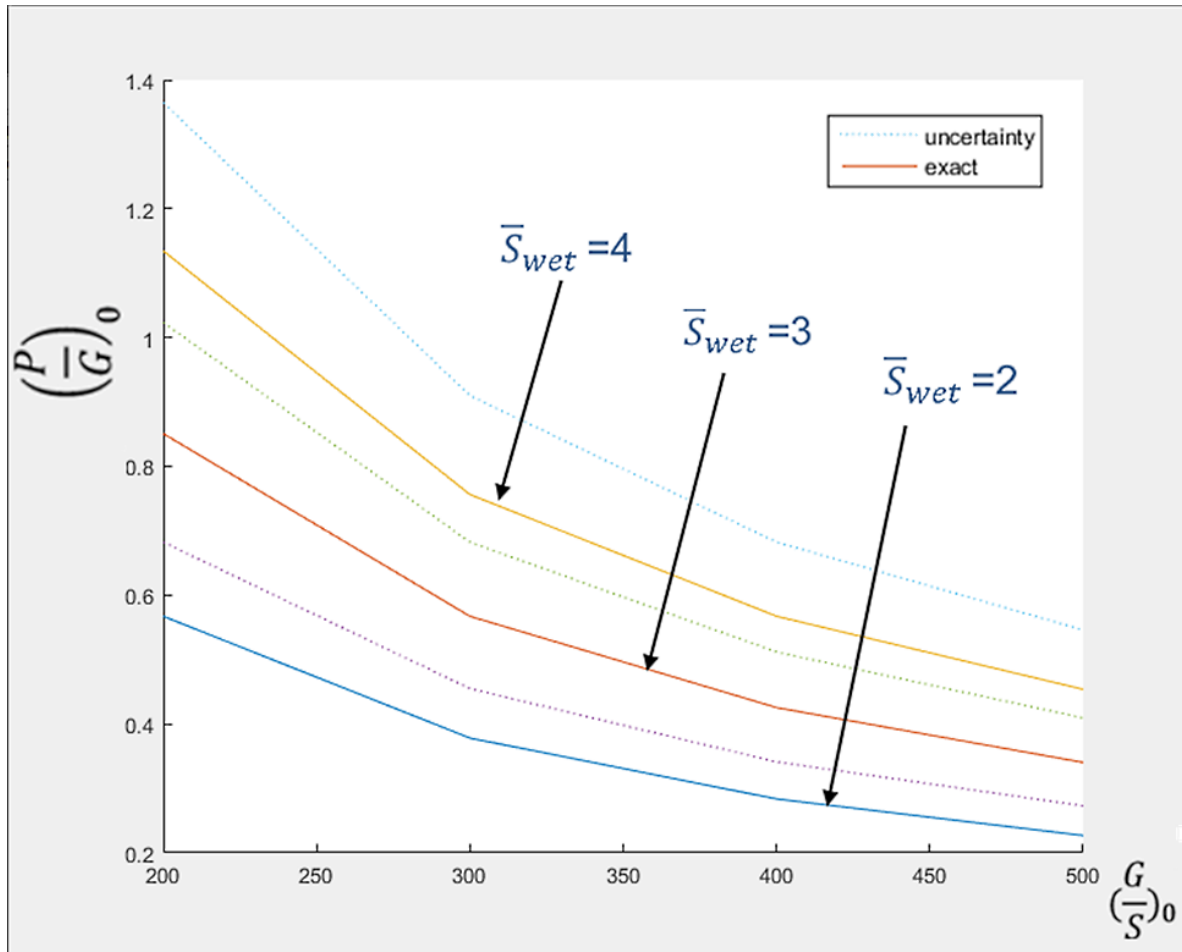
С использованием разработанных алгоритмов в результате анализа данных, полученных по математической модели ЭМП, выделены информативные признаки для оценки и прогнозирования технических состояний ЭМП.

Модель	Метод отбора	Ч.п.	Обучение	Валидация	F-мера	Точность	Полнота	Тест
Метод k-ближайших соседей 91	LGBC	5	0,987654	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,850617
Метод k-ближайших соседей 95	LGBC	9	0,975309	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,85679
Метод k-ближайших соседей 92	LGBC	6	0,962963	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,860494
Метод k-ближайших соседей 93	LGBC	7	0,975309	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,862963
Метод k-ближайших соседей 94	LGBC	8	0,975309	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,866667
Метод k-ближайших соседей 96	LGBC	10	0,998513	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,867901
Логистическая регрессия (по умолчанию) 4	Information Gain	3	0,925926	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,887654
Логистическая регрессия (L2) 37	MAD	2	0,975205	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,92716
Случайный лес 93	LGBC	7	0,982215	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,928395
Дерево решений 107	RandomForest	4	0,985142	0,888889	0,878307	0,916667	0,888889	0,944444
Дерево решений 11	Information Gain	10	0,972969	0,888889	0,883951	0,911111	0,888889	0,945679



## № 7

Разработана расчетная модель, определяющая зависимость взлетной тяговооруженности от взлетной нагрузки на крыло с учетом надежности проектных решений.



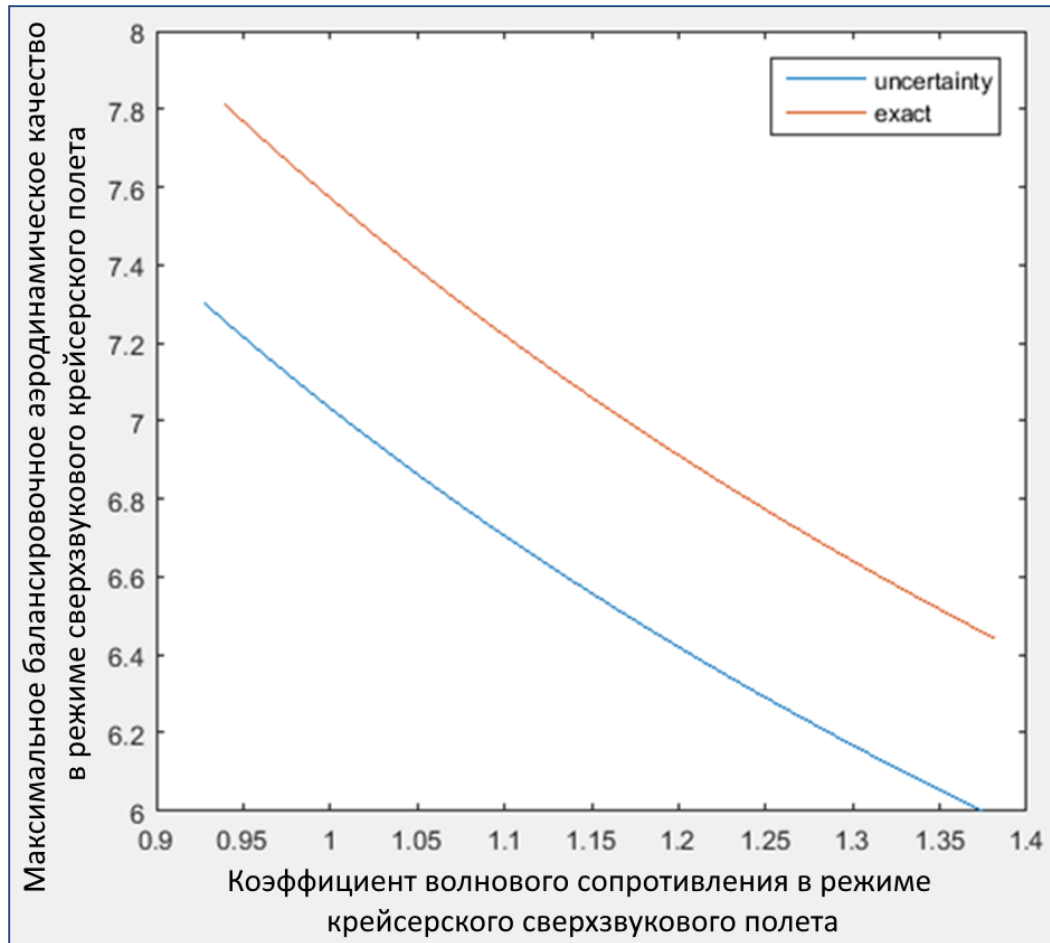
$$\left(\frac{P}{G}\right)_0 = \frac{2k_w \bar{S}_{OM} C_{feqv} q_{11}}{9,8 \left(\frac{G}{S}\right)_0 \bar{P}_{max} k_{др}}$$

$$\inf_{\alpha} \left(\frac{P}{G}\right)_0 = \frac{2\Phi_{k_w}^{-1}(\alpha)\Phi_{\bar{S}_{OM}}^{-1}(\alpha)\Phi_{C_f}^{-1}(\alpha)q_{11}}{9,8\left(\frac{G}{S}\right)_0 \Phi_{\bar{P}_{max}}^{-1}(1-\alpha)k_{др}}$$

$C_f, \bar{S}_{OM}, \bar{P}_{max}, k_w$  -  
неопределенные

## № 8

Разработаны модели и алгоритмы оптимизации режима сверхзвукового крейсерского полета пассажирского самолета в условиях параметрической эпистемической неопределенности на этапе предварительного проектирования.



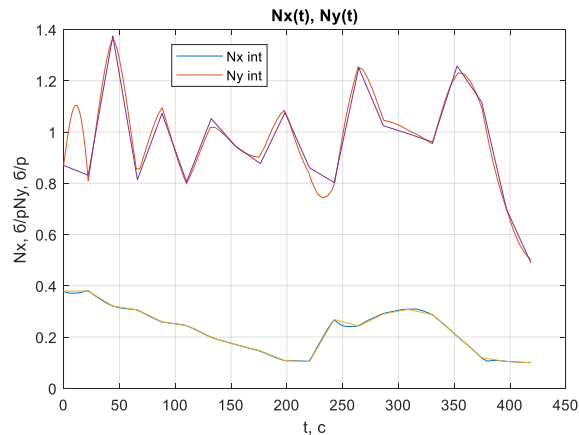
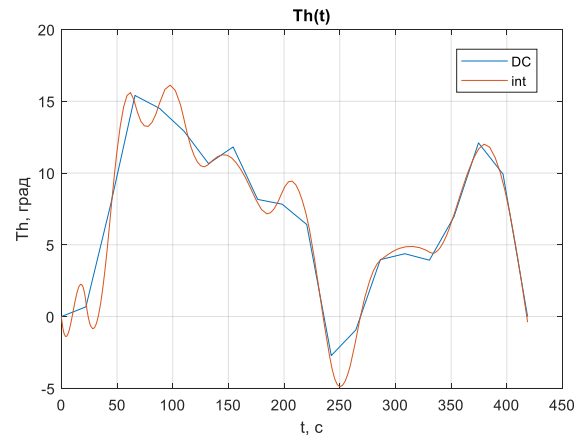
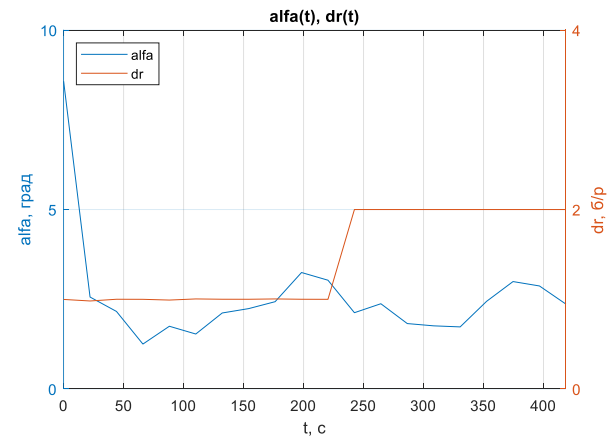
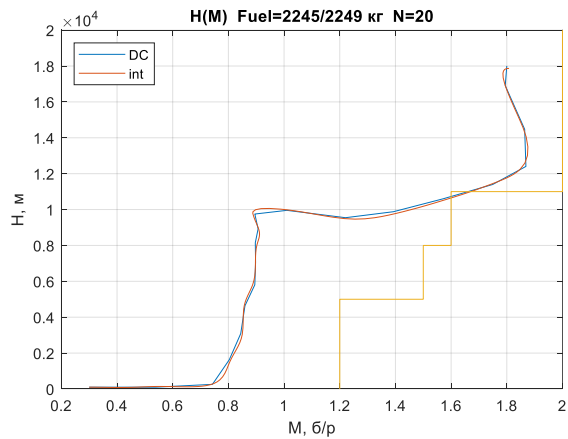
$$\max_{\bar{x}} \{ \sup_{\alpha} (K_{max}), \sup_{\alpha} (k_w) \},$$

$$K_{max} \approx 0,5 \sqrt{\frac{C_y^{\alpha}}{C_f \bar{S}_{OM} k_w}},$$

$$k_w = \frac{\left(\frac{P}{G}\right)_0 \left(\frac{G}{S}\right)_0 \bar{P}_{max} K_{др}}{2 \bar{S}_{OM} C_f q_{11}},$$

## № 9

Завершена разработка детерминированного алгоритма оптимизации траектории набора высоты и скорости летательного аппарата. Этот алгоритм основан на методе direct collocation и в рамках дальнейших исследований будет использоваться для перехода к задаче неопределенного программирования.



# Участие в научных мероприятиях по тематике проекта

## Доклады на конференциях:

1. 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Москва, 27-29 сентября 2021 г.
2. 24th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM-2021, St Petersburg). Санкт-Петербург, 26-28 мая 2021 г.
3. 32th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Шанхай. Китай, 2021, 6-10 сентября 2021 г.
4. 11th EASN International Conference on "Innovation in Aviation & Space for opening New Horizons", Италия, 1-3 сентября 2021 г.
5. 17-ая Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021), Москва, 6-9 сентября 2021 г.
6. 9th World Congress "Aviation in the XXI Century", 22 сентября 2021 г.

# Список публикаций

Список публикаций всех участников МНШ за период выполнения проекта, предшествующий данному отчету и результаты выполнения своих обязательств по числу публикаций в высокорейтинговых научных журналах (число статей в WOS, Scopus, РИНЦ).

## Scopus/WOS

1. Вересников Г.С., Лебедев В.Г., Огородников О.В., Голев А.В. Fault Detection Technique for Electromechanical Actuator of the Aircraft Using Neural Networks / Safety in Aviation and Space Technologies (Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century"). Люксембург: Springer, 2021. С. 519-528.
2. Вересников Г.С. Multi-Variant Simulation in the Preliminary Design of Technical Objects under Parametric Uncertainty / Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). М.: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600113>.
3. Вересников Г.С., Скрыбин А.В. Feature Selection Algorithms for Forecasting Technical Condition of Electromechanical Actuator / Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). М.: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600182/>.
4. Вересников Г.С., Скрыбин А.В. Methods for Mechanical Failures Assessment to Determine the Technical State of Aircraft Control Surface Electromechanical Actuator / Proceedings of 24th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM-2021, St Petersburg). Санкт - Петербург: IEEE, 2021. С. 60-62 <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9507174>.
5. Вересников Г.С., Скрыбин А.В., Баженов С.Г. The development of algorithms for EMA fault early detection system / Proceedings of the 32th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Shanghai, China, 2021). Shanghai, China: ICAS, 2021. С. [https://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2020/data/preview/ICAS2020\\_0239.htm](https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/preview/ICAS2020_0239.htm).

# Список публикаций

6. Вересников Г.С., Башкиров И.Г. Synthesis of design solutions for preliminary aerodynamic design of an advanced supersonic transport under parametric epistemic uncertainty // Proceedings of the 11th EASN Virtual Conference, in print, выйдет в первом квартале.
7. Голев А.В., Огородников О.В. Algorithms for Informative Features Extraction in the Problem of Data Mining on Item Related State Evaluation / Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600186>.
8. Огородников О.В. Multi-Criterion Optimisation in a Problem of Preliminary Calculation of Maneuverable Aircraft Characteristics in the Presence of the Parameters with Epistemic Uncertainty / Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600259>.

## РИНЦ

9. Голев А.В., Московцев А.М., Огородников О.В. Оценка технического состояния объекта: выделение информативных признаков и интеллектуальный анализ данных / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). М.: Институт проблем управления, 2021. С. 678-689.
10. Мартиросян М.П., Огородников О.В. Синтез алгоритма решения оптимизационной задачи с неопределенными параметрами в предварительном проектировании самолета / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2021. С. 722-733.

## Патенты/Свидетельства

11. Вересников Г.С., Огородников О.В., Крюкова И.П. Программа расчета распределения неопределенности и детерминированных эквивалентов для монотонных и немонотонных функций с использованием теории неопределенности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613761 РФ; Зарег. 15.03.2022.

1. Развитие оптимизационных алгоритмов предварительного проектирования ЛА в условиях параметрической неопределенности.
2. Анализ эффективности разработанных оптимизационных алгоритмов предварительного проектирования ЛА.
3. Алгоритмы для оценки и прогноза технического состояния электромеханических приводов ЛА;
4. Анализ эффективности разработанных алгоритмов для оценки и прогноза технического состояния электромеханических приводов ЛА.

# Голев Артем Владимирович (участник МНШ)



## **Образование:**

Высшее, Московский педагогический государственный университет, Математика.

Аспирант ИПУ РАН 4-го года обучения.

## **Работает в ИПУ РАН:**

с 2020 г.

## **Должность:**

младший научный сотрудник.

## **Количество научных работ:**

7.

## **Область научных интересов:**

- анализ и обработка многомерных данных с использованием математических и статистических методов;
- методы интеллектуального анализа данных.





# **Анализ и сравнение алгоритмов выделения информативных признаков для оценки и прогноза технического состояния электромеханического привода летательного аппарата**

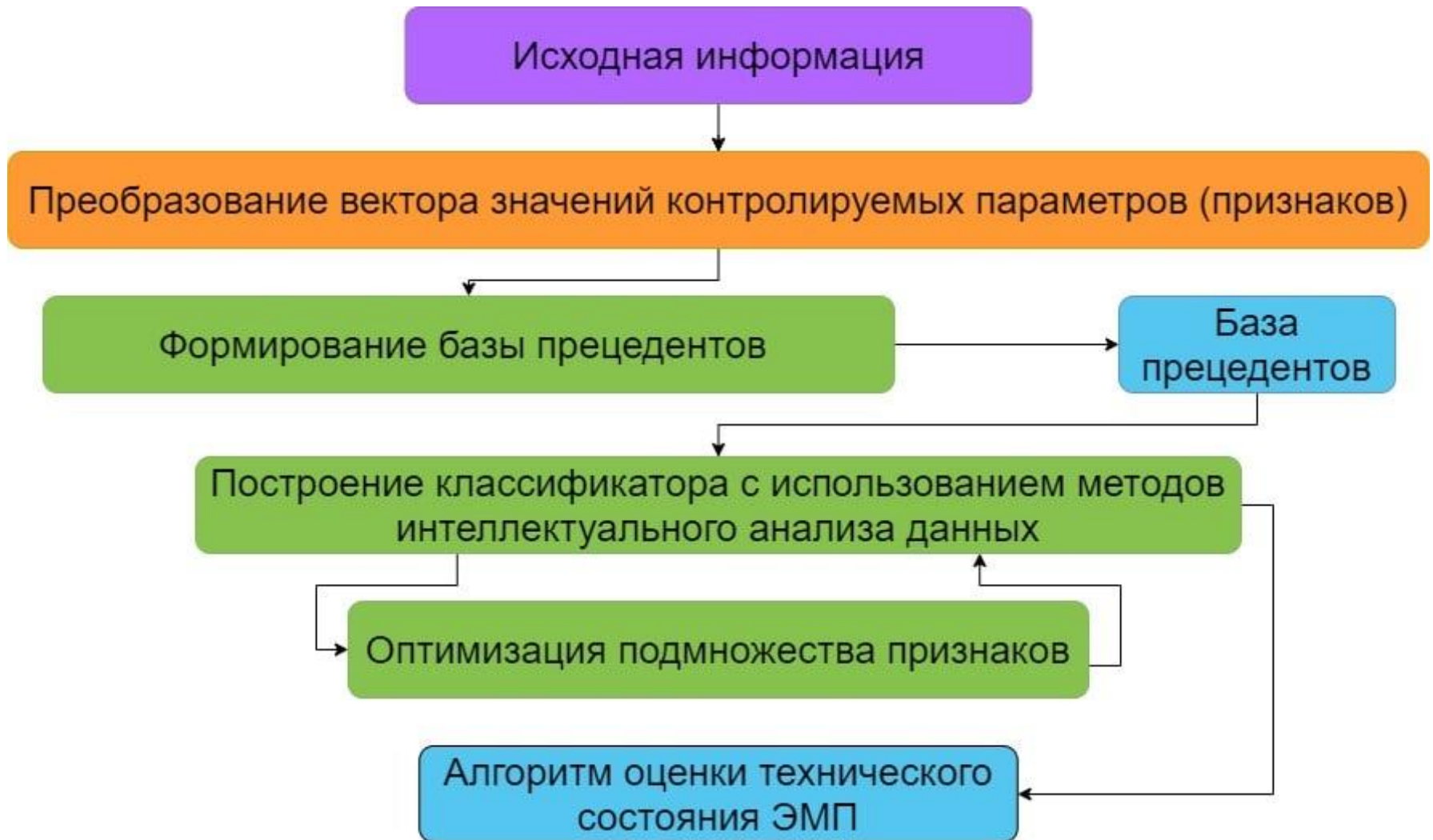
Голев Артём Владимирович  
младший научный сотрудник  
Лаборатория № 46

**Цель** - построение классификатора технического состояния электромеханического привода (ЭМП) летательного аппарата.

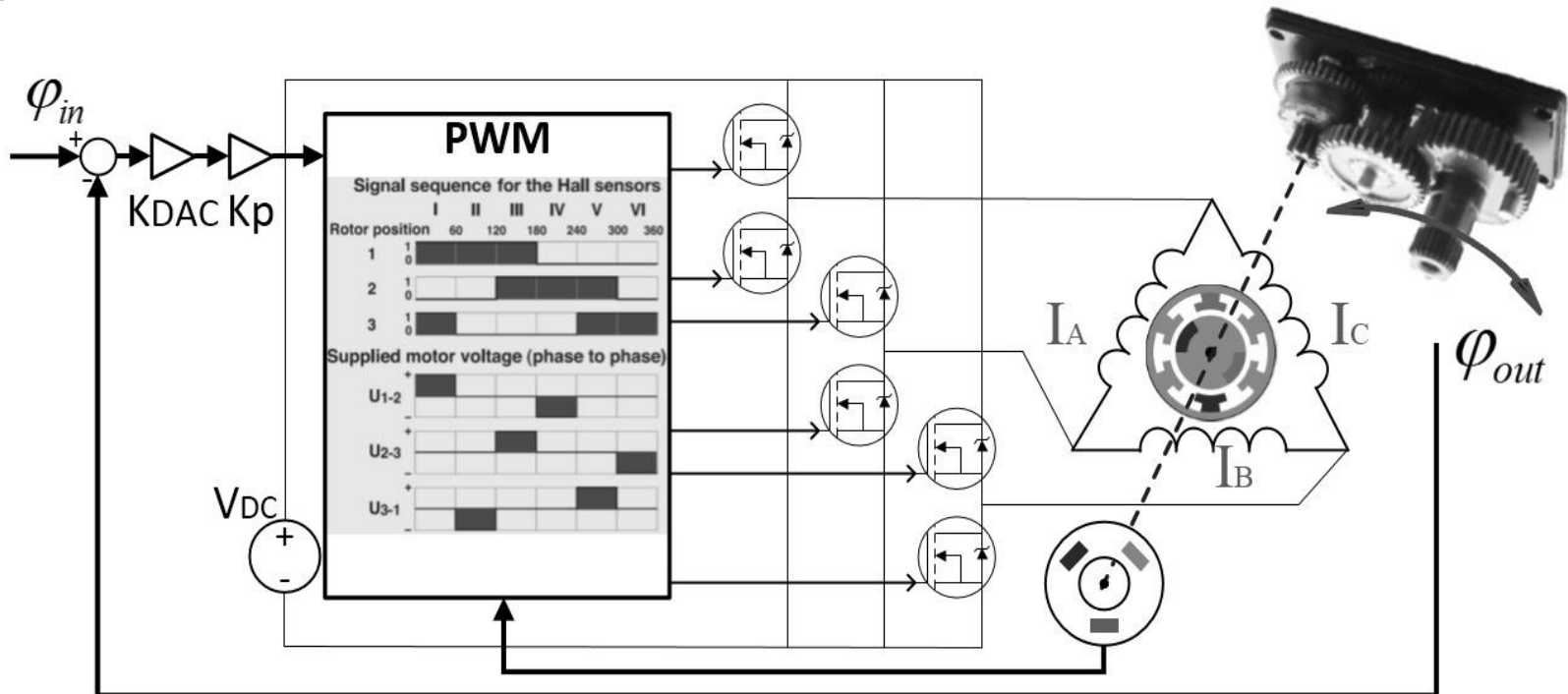
## **Задачи:**

- 1) Исследование влияния параметров алгоритмов выделения информативных признаков на эффективность классификации технического состояния ЭМП;
- 2) Анализ и сравнение алгоритмов выделения информативных признаков на данных с использованием критериев оценки качества моделей классификации;
- 3) Анализ и сравнение методов классификации технического состояния на данных, полученных с использованием математической модели ЭМП.

# Схема анализа данных для построения алгоритма оценки технического состояния ЭМП с использованием методов ИАД



# Функциональная схема электромеханического привода



$\phi_{in}$  – входной сигнал управления положением вала,  
 $\phi_{out}$  – сигнал датчика обратной связи выходного вала,  
 $V_{DC}$  – источник питания постоянного тока,  
 $I_A, I_B, I_C$  – токи в обмотках электродвигателя,  
 $K_{DAC}, K_p$  – коэффициенты усиления

Набор исходных данных представляет собой результат обработки управляющего сигнала по различным параметрам:

- управляющий сигнал,
- положение ротора,
- положение выходного вала,
- напряжение,
- сила тока,
- потребляемая мощность,
- угловая скорость,
- момент ротора,
- мощность на валу.



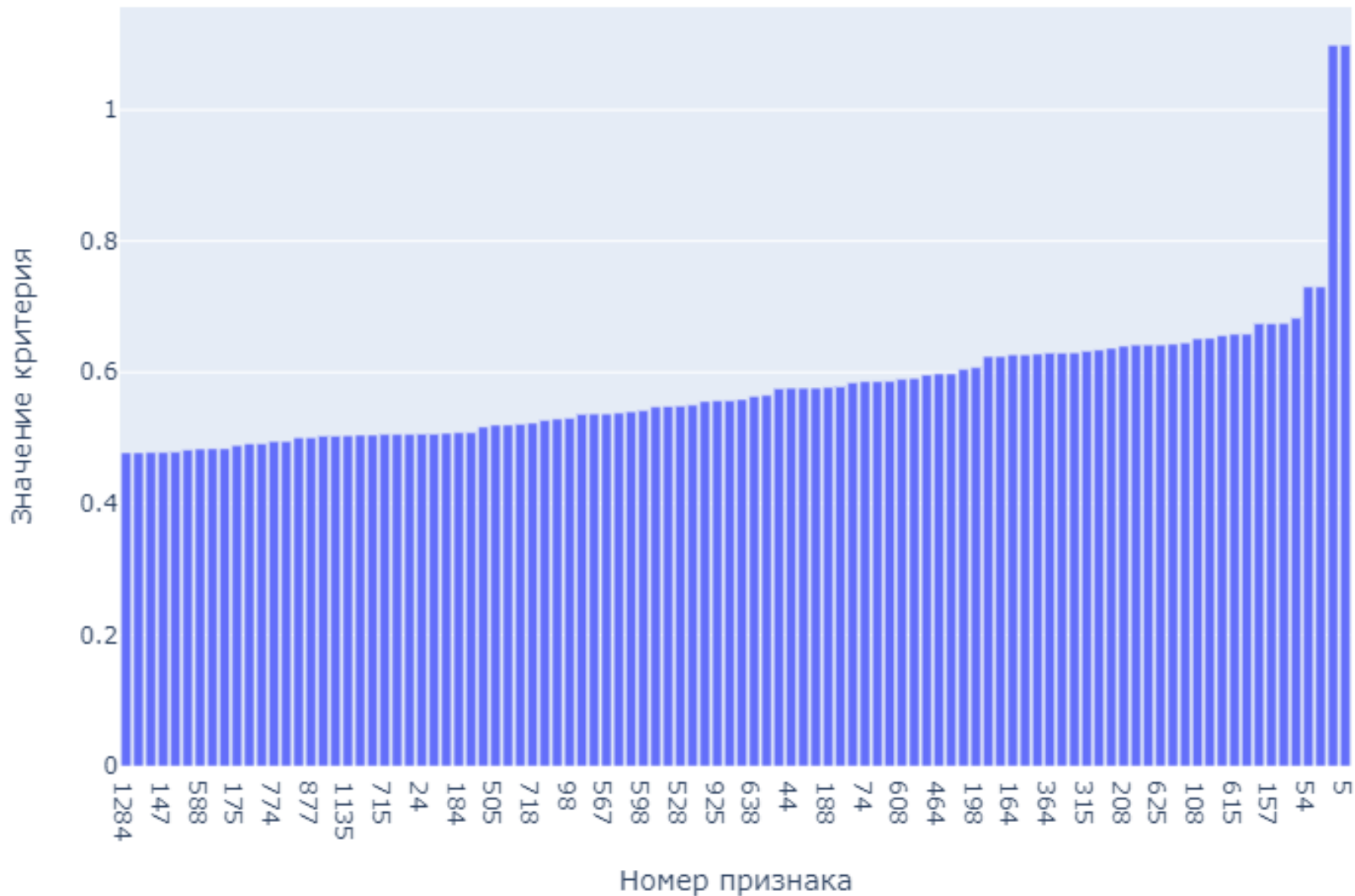
# Методы отбора информативных признаков

- Метод Information gain
- Метод хи-квадрат
- Метод абсолютного отклонения
- Метод SHAP
- Метод случайного леса
- Метод ансамблей деревьев решений

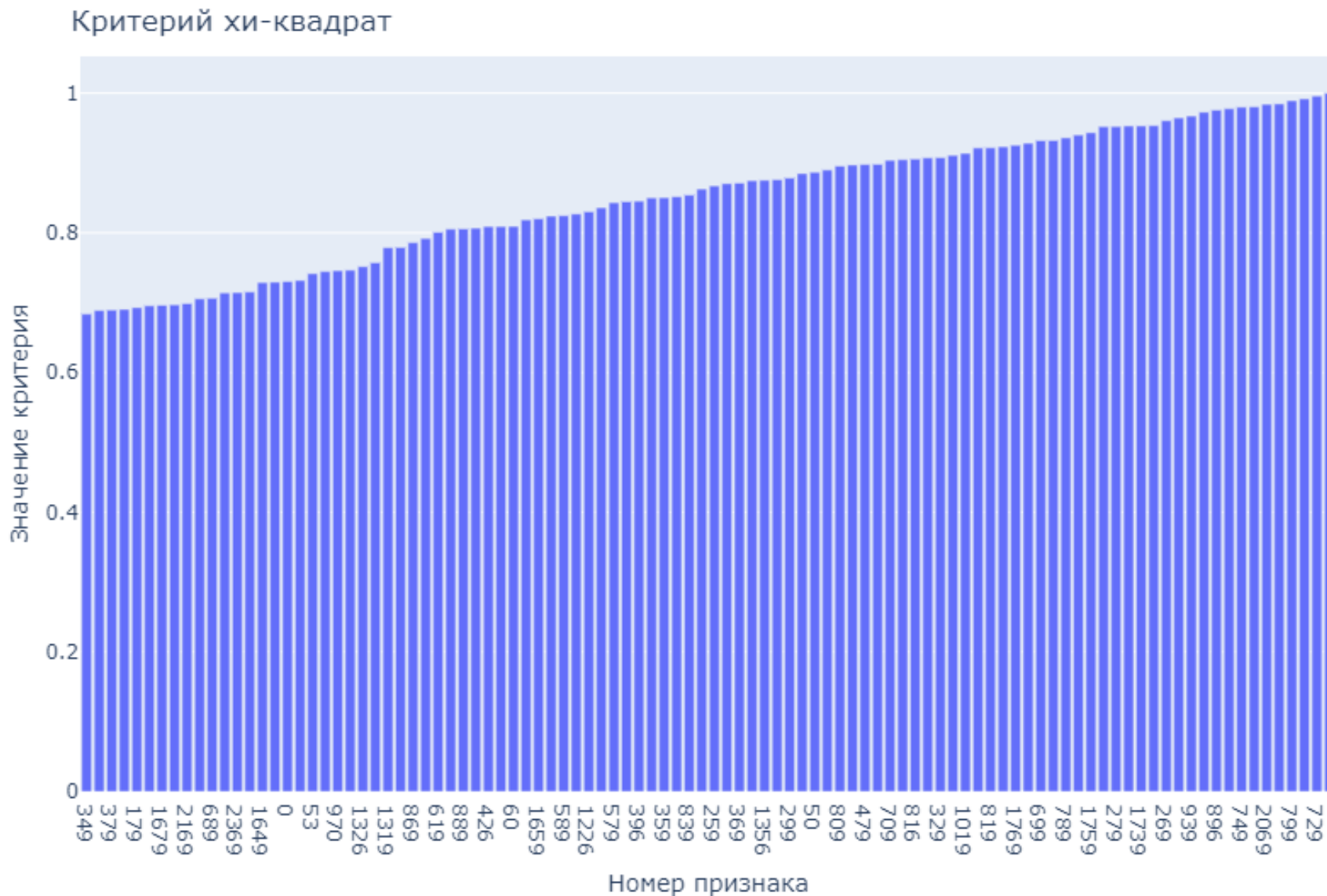


# Диаграмма уровня значимости признаков с использованием метода Information gain

Information Gain



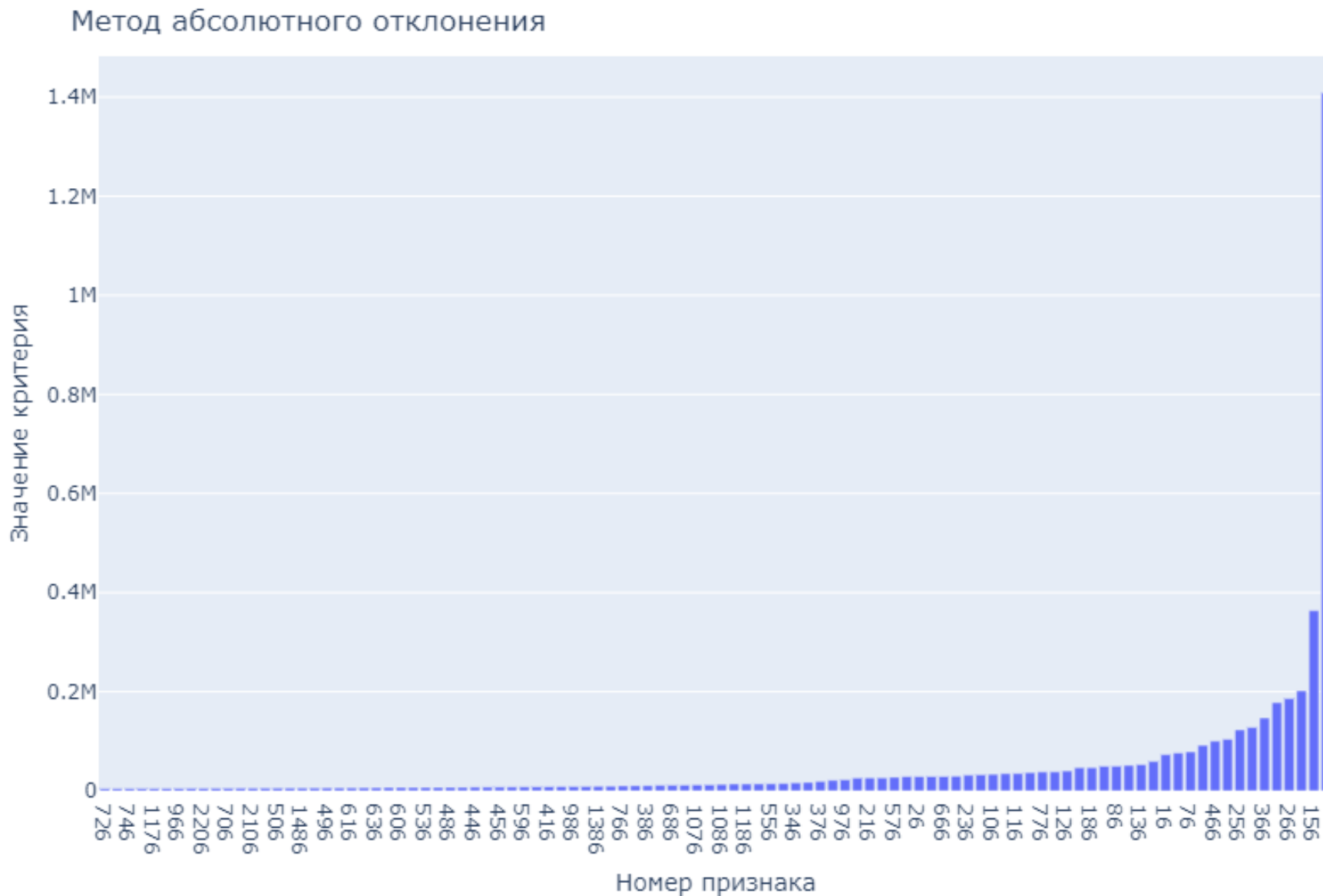
# Диаграмма уровня значимости признаков с использованием метода хи-квадрат



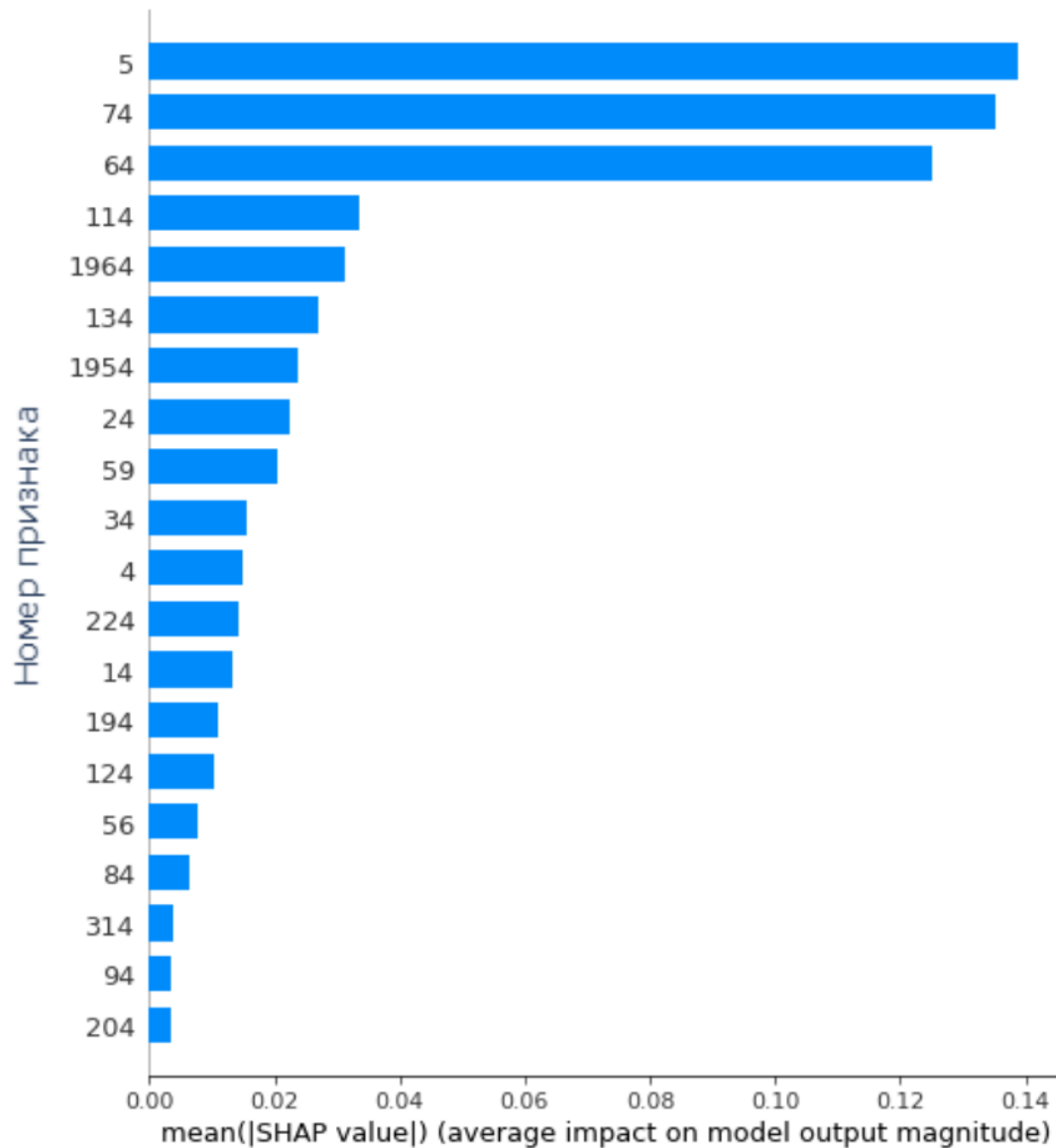




# График уровня значимости признаков с использованием метода абсолютного отклонения

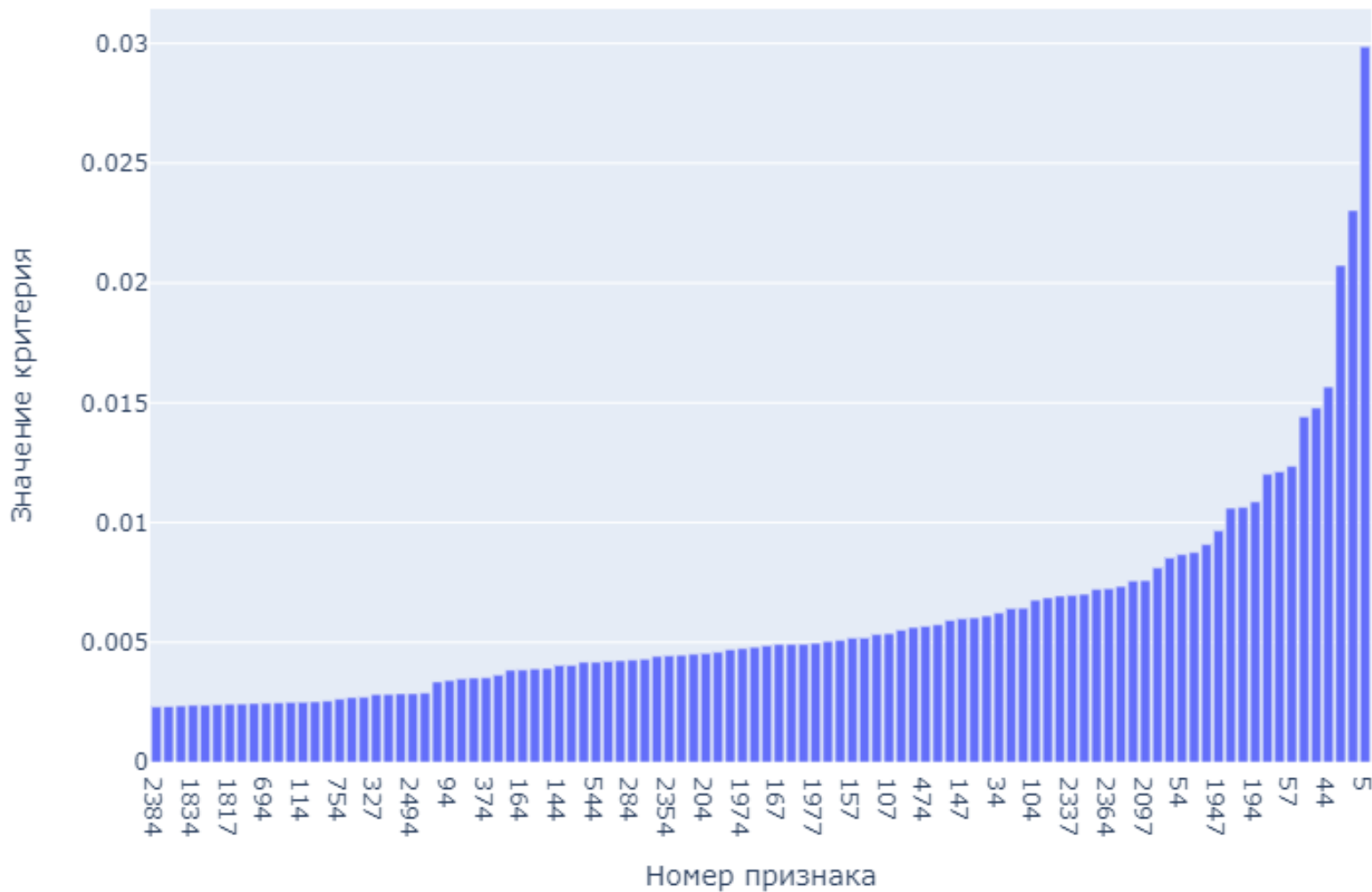


# Диаграмма значимости признаков с использованием метода SHAP



# График уровня значимости признаков с использованием метода случайного леса

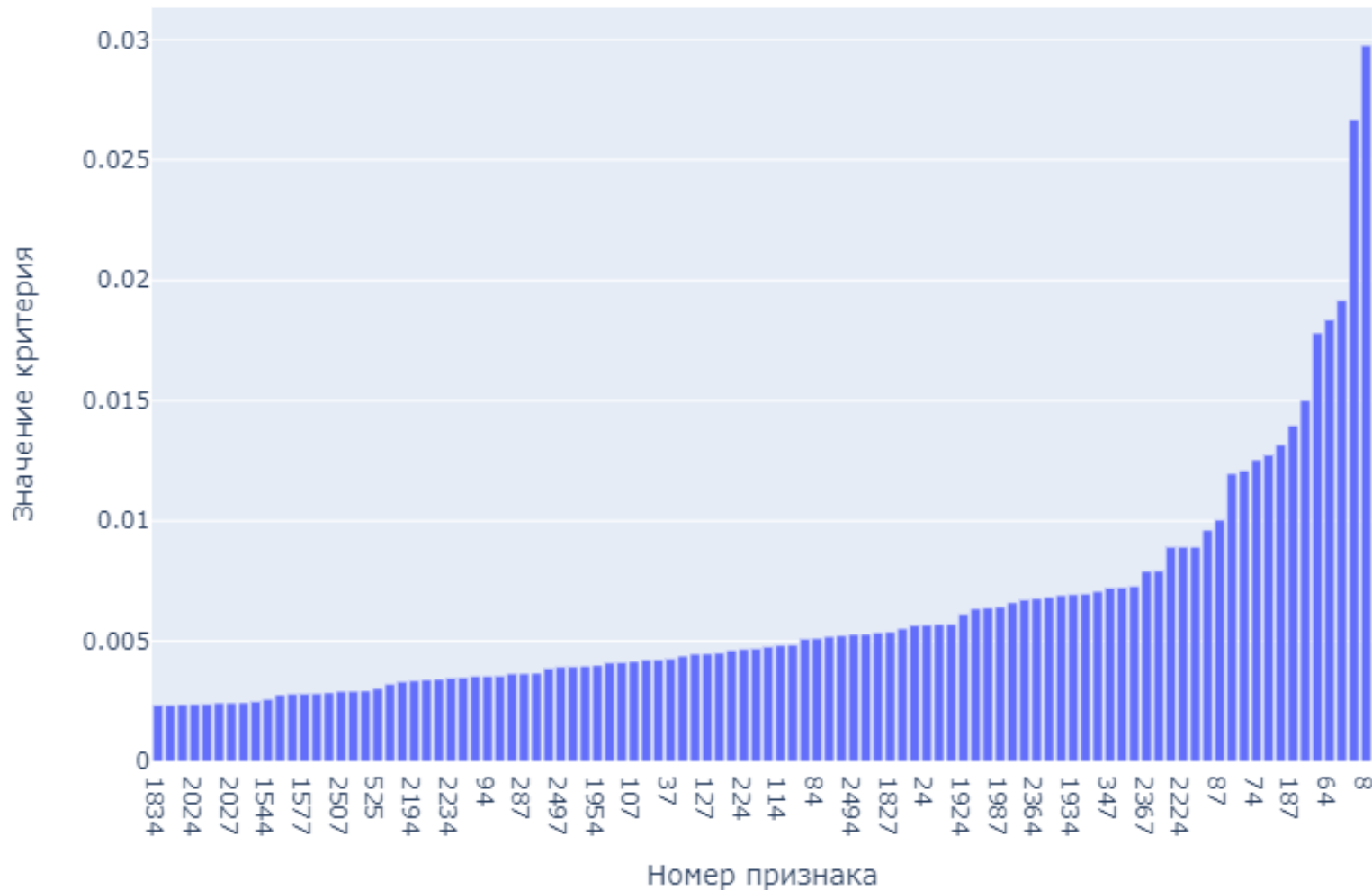
Метод случайного леса





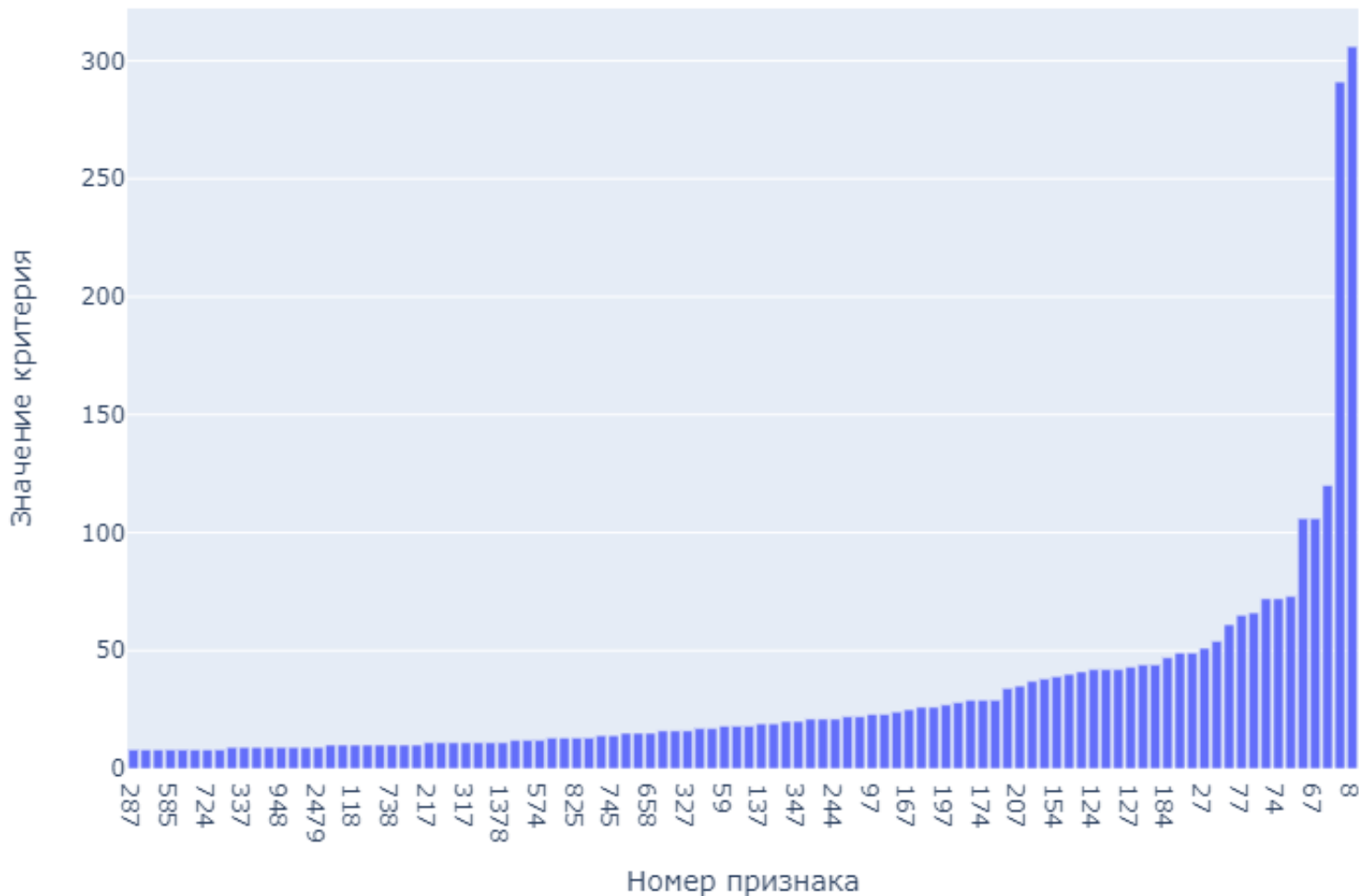
# График уровня значимости признаков с использованием метода случайного леса (ускоренный)

Метод случайного леса (ускоренный)

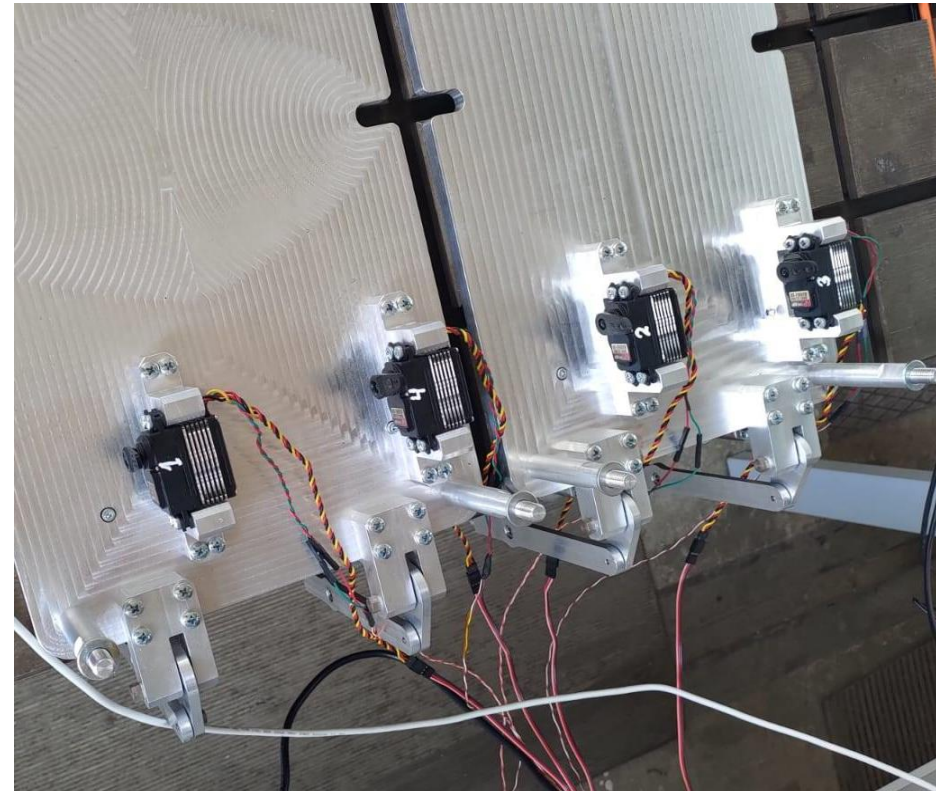
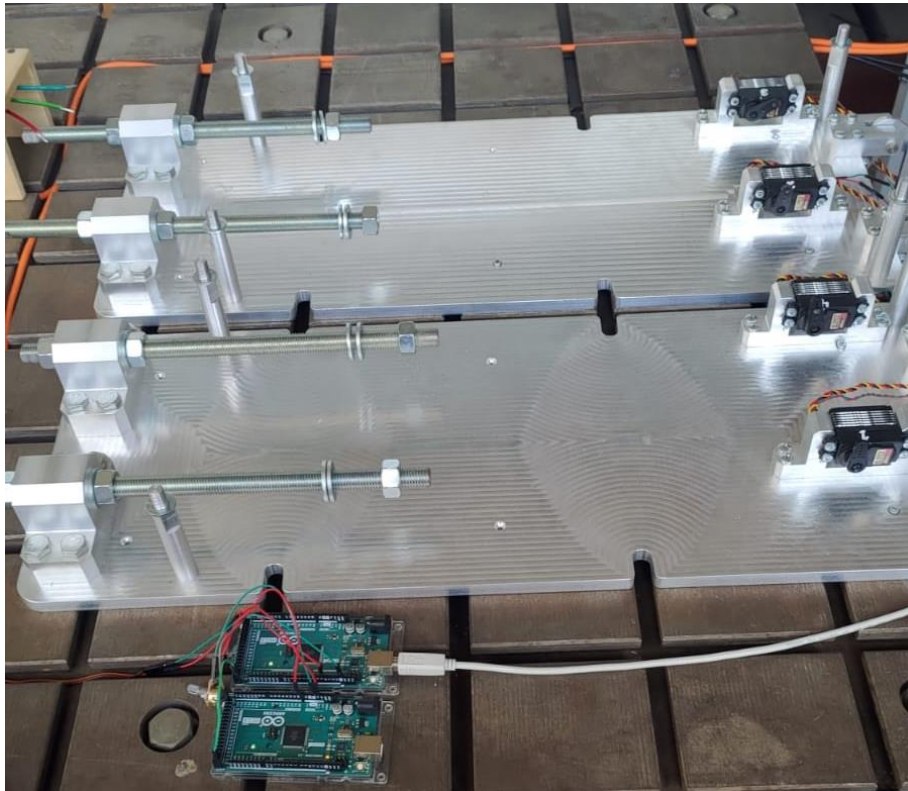


# График уровня значимости признаков с использованием метода ансамблей деревьев решений

Метод ансамблей LGBM



Модель	Метод отбора	Ч.п.	Обучение	Валидация	Тест
Метод k-ближайших соседей 91	LGBC	5	0,987654	0,888889	0,850617
Метод k-ближайших соседей 95	LGBC	9	0,975309	0,888889	0,85679
Метод k-ближайших соседей 92	LGBC	6	0,962963	0,888889	0,860494
Метод k-ближайших соседей 93	LGBC	7	0,975309	0,888889	0,862963
Метод k-ближайших соседей 94	LGBC	8	0,975309	0,888889	0,866667
Метод k-ближайших соседей 96	LGBC	10	0,998513	0,888889	0,867901
Логистическая регрессия 4	Information Gain	3	0,925926	0,888889	0,887654
Логистическая регрессия (L2) 37	MAD	2	0,975205	0,888889	0,92716
Случайный лес 93	LGBC	7	0,982215	0,888889	0,928395
Дерево решений 107	Random Forest	4	0,985142	0,888889	0,944444
Дерево решений 11	Information Gain	10	0,972969	0,888889	0,945679



# Мартиросян Мария Пилосовна (участник МНШ)



## **Образование:**

1-й курс магистратуры, Московский физико-технический институт (Государственный университет), Прикладные математика и физика.

## **Должность:**

инженер.

## **Работает в ИПУ РАН:**

с 2021 г.

## **Количество научных работ:**

1.

## **Область научных интересов:**

- параметрический синтез в условиях неопределенности;
- динамика систем приводов/динамика полета;
- методы оптимизации.





# **Алгоритмы отбора информативных признаков на основе методов оценки качества тренда**

Мартиросян Мария Пилосовна  
инженер  
Лаборатория № 46

# Алгоритмы отбора информативных признаков на основе методов оценки качества тренда

Используемые оптимизационные модели:

1. Многокритериальная модель (критерии - коэффициент детерминации и угол наклона нормированного линейного тренда)

$$\begin{cases} \max_{\bar{x}} \alpha, \\ \max_{\bar{x}} R^2, \\ \alpha > \alpha_0, \\ R^2 > R_0^2, \end{cases}$$

2. Однокритериальная модель с ограничениями (критерий – коэффициент детерминации)

$$\begin{cases} \max_{\bar{x}} R^2, \\ \alpha > \alpha_0. \end{cases}$$

3. Однокритериальная модель с ограничениями (критерий – угол наклона нормированного линейного тренда)

$$\begin{cases} \max_{\bar{x}} \alpha, \\ R^2 > R_0^2, \end{cases}$$

# Алгоритм расчёта целевых функций

Алгоритм расчёта  $\alpha$  и  $R^2$  (целевые функции и ограничения):

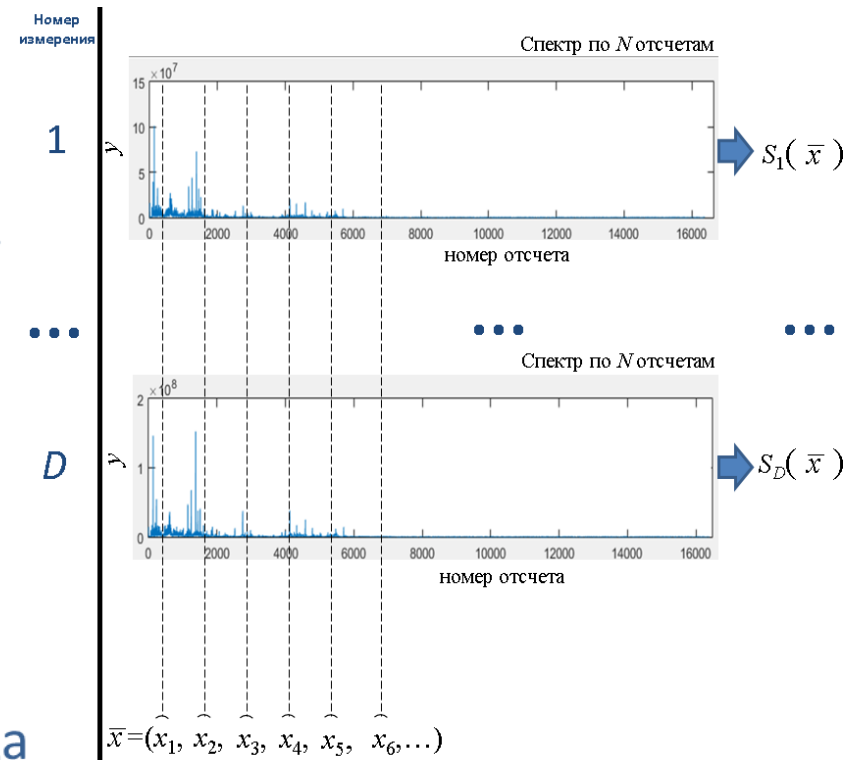
**Шаг 1.** На основе амплитудных спектров вибрационных сигналов строится временная последовательность сумм амплитуд

**Шаг 2.** Полученный временной ряд нормируется посредством деления каждого элемента на значение максимального элемента

**Шаг 3.** С использованием метода наименьших квадратов осуществляется оценка коэффициентов линейного тренда

**Шаг 4.** Осуществляется расчет стандартного коэффициента детерминации

**Шаг 5.** Вычисляется угол наклона нормированного тренда



Построение временной последовательности сумм амплитуд



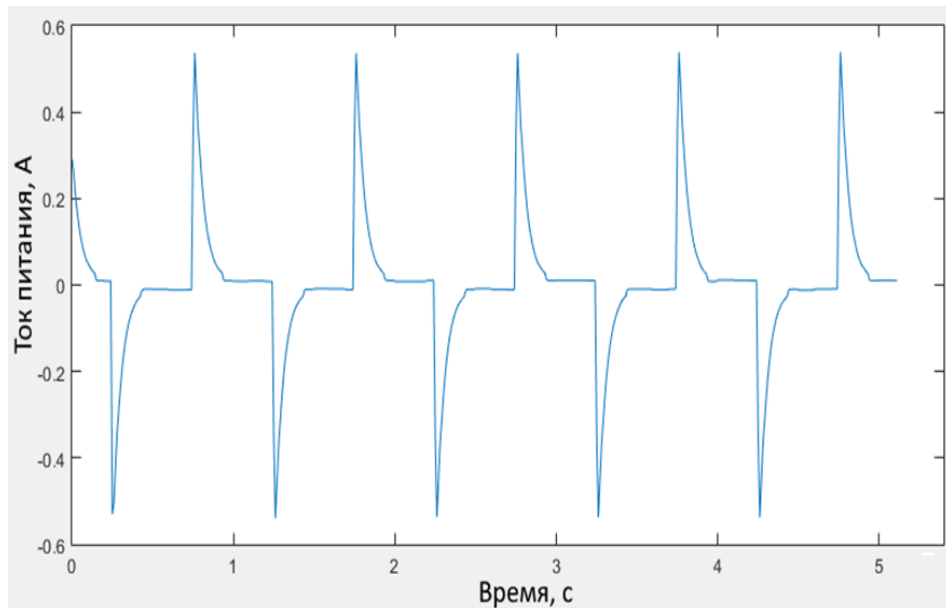
# Исследование разработанных алгоритмов на тестовых данных, отражающих техническое состояние электромеханического привода летательного аппарата

Разработанные оптимизационные модели опробованы на данных, полученных с использованием:

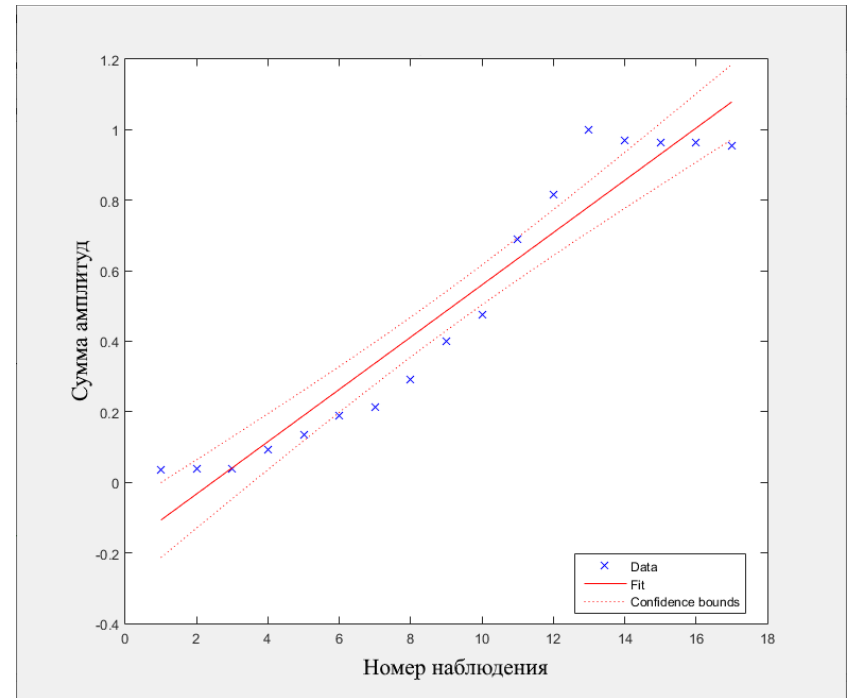
- математической модели ЭМП беспилотного ЛА при отработке циклограммы полета и «треугольных» сигналов
- стендовых ресурсных испытаний синхронного бесколлекторного электродвигателя

# Результаты применения оптимизационных моделей к данным, полученным с использованием математической модели ЭМП беспилотного ЛА

$$R^2 = 0,92831$$



Изменение тока питания во времени при обработке управляющего сигнала

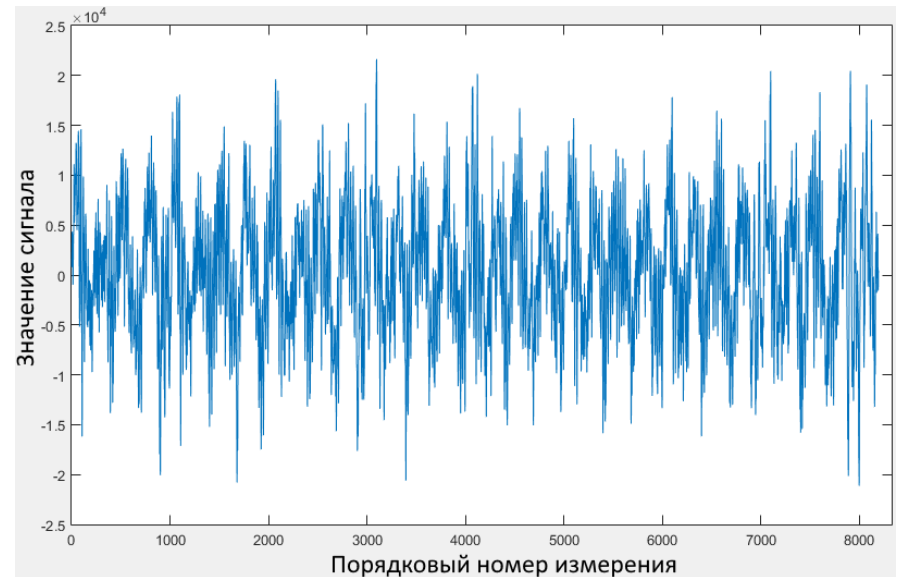


Тренд для диапазона интегрирования спектра, найденного с использованием многокритериальной модели

# Результаты применения оптимизационных моделей к данным, полученным в результате стендовых ресурсных испытаний синхронного бесколлекторного электродвигателя

В тестовых данных содержатся следующие параметры:

- вибрация электродвигателя (измерена датчиком виброускорений),
- акустический шум электродвигателя (измерен микрофоном)



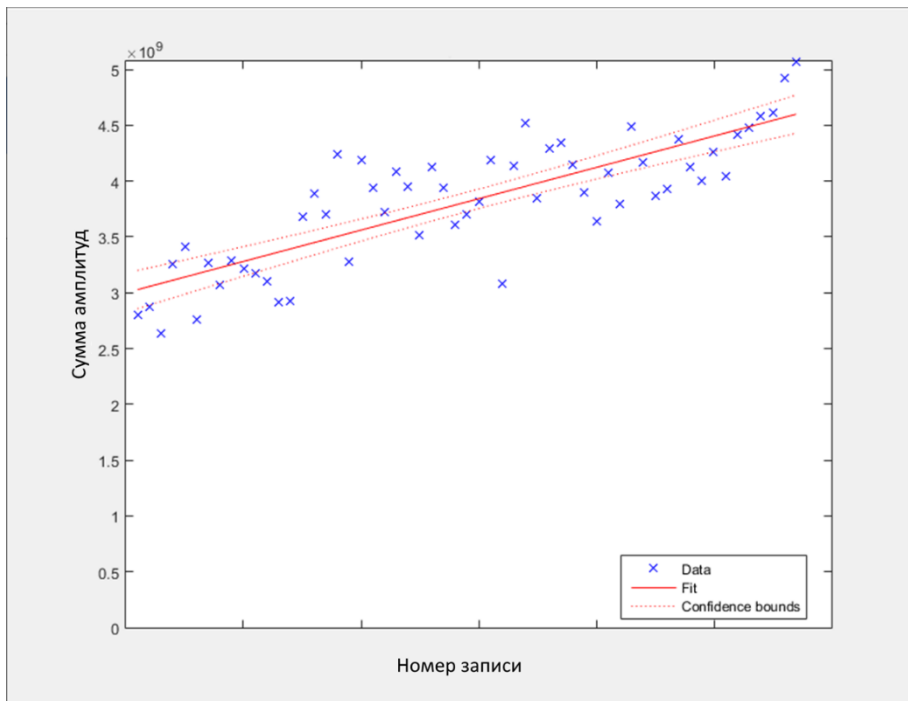
Вибрационный сигнал



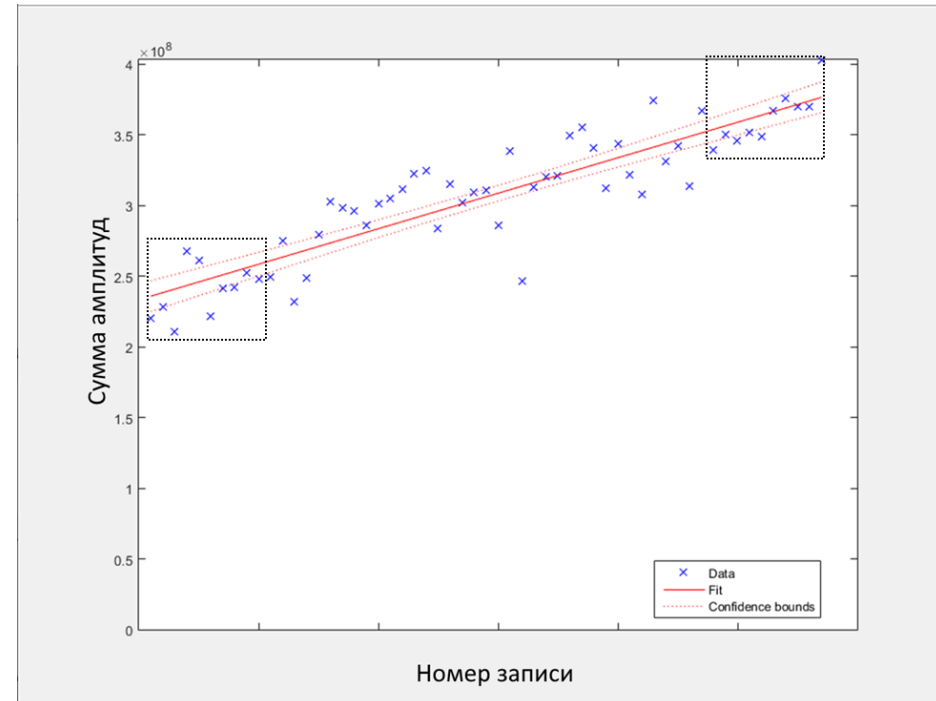
# Результаты применения оптимизационных моделей к данным, полученным в результате стендовых ресурсных испытаний синхронного бесколлекторного электродвигателя

$$R^2 = 0,66624$$

$$R^2 = 0,8037$$



Тренд для одного диапазона интегрирования



Тренд для 3-х диапазонов интегрирования

# Рекомендуемая схема применения оптимизационных алгоритмов





# Огородников Олег Викторович (участник МНШ)



## **Образование:**

Высшее, Московский физико-технический институт,  
Прикладная математика и физика.

Аспирантура ИПУ РАН с 01.11.2015 по 01.11.2019.

## **Работает в ИПУ РАН:**

с 2019 г.

## **Должность:**

научный сотрудник.

## **Количество научных работ:**

25.

## **Область научных интересов:**

- решение задач оптимизации в условиях неопределенности;
- траекторная оптимизация движения летательных аппаратов.



# **Синтез алгоритмов решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров**

Огородников Олег Викторович  
научный сотрудник  
Лаборатория № 46

1. Потребность в решении оптимизационных задач с неопределенными параметрами при создании сложных технических объектов
2. Недостаток статистических данных
3. Отсутствие общей методики синтеза алгоритмов решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров

## Цель:

Разработка и исследование научных основ синтеза алгоритмов решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров

## Задачи:

1. Разработка методики синтеза алгоритмов решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров;
2. Создание инструментального средства для синтеза алгоритмов на базе разработанных методик, моделей и алгоритмов.

$$\begin{cases} \min_{\bar{x}'} (\max) [d_1 [f_1(\bar{x}', \bar{\xi})], \dots, d_m [f_m(\bar{x}', \bar{\xi})]] \\ M[g_j(\bar{x}', \bar{\xi}) \leq 0] \geq \alpha_{g_j}, j = 1, 2, \dots, p \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\bar{x}'$  – вектор независимых оптимизируемых детерминированных и/или неопределенных параметров;  $\bar{\xi}$  – вектор независимых входных неопределенных параметров;  $f_i(\bar{x}', \bar{\xi})$  – целевая функция;  $g_j(\bar{x}', \bar{\xi})$  – функция ограничения;  $m, p$  – соответственно количество целевых функций и ограничений;  $d_i$  – множество числовых характеристик функции  $f_i(\bar{x}', \bar{\xi})$ ;  $M(\cdot)$  – мера неопределенности (степени уверенности) события  $(\cdot)$ ,  $\alpha_{g_j}$  – заданный ЛПР уровень меры неопределенности (степени уверенности) для выполнения  $j$ -го ограничения,  $0 \leq \alpha_{g_j} \leq 1$ .

## Требования к алгоритмам

Требования к алгоритму решения оптимизационной задачи с неопределенными параметрами:

1. алгоритм может решать задачи непрерывной оптимизации;
2. алгоритм может оперировать эпистемически неопределенными величинами.

Требования к алгоритму подготовки экспертных данных:

1. возможность ввода распределения неопределенности в эмпирическом и аналитическом виде;
2. возможность аппроксимации, кластеризации и верификации экспертных ФРН;
3. возможность автоматизированной генерации неопределенных величин (посредством варьирования параметров ФРН).



# Синтез алгоритмов для решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров

## Синтез алгоритма решения оптимизационной задачи:

1. Постановка и формализация оптимизационной задачи (выполняется пользователем)
2. Синтез программных модулей для вычисления значений целевых функций и ограничений и их числовых характеристик;
3. Создание модулей оптимизации и запуска расчета;

## Синтез алгоритма подготовки экспертных данных:

1. Создание модуля преобразования аналитической функции распределения неопределенности (ФРН) в программный код;
2. Создание модуля автоматизированной генерации ФРН неопределенных величин (варьирование параметров ФРН);
3. Создание модулей верификации, аппроксимации и кластеризации экспертных ФРН

# Синтез алгоритмов для решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров

## Обобщенная схема решения оптимизационной задачи







# Синтез алгоритмов для решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров

## Инструментальное средство

Файл Правка

Оптимизационная задача | Обработка данных | Параметры | Расчет и анализ

Создать... Оптимизационная задача

Аналитические выражения

Новый элемент

Добавить | Изменить | Удалить

Оптимизационная модель

Целевая функция	Условие оптимизации	Числовая характеристика	a:	
Новый элемент	min	E	0,00	Добавить

Ограничение		Числовая характеристика	a:		
Новый элемент	<=	0	E	0,00	Добавить

Параметр	Тип	
Новый элемент	Детерминированный	Добавить

Оптимизационная задача

- > Целевые функции
- > Ограничения
- > Проектные параметры
- > Неопределенные параметры
- > Детерминированные параметры

Удалить | Сохранить

# Задача оптимизации параметров маневренного самолета

## Постановка задачи

Без учета неопределенных параметров

$$\begin{cases} \min K_{max\ cr} \\ \min P_0 \\ 400 \leq \gamma_a \leq 600 \\ 3 \leq F \leq 3.5 \\ 0.13 \leq \gamma_{eng} \leq 0.2 \end{cases}$$



С учетом неопределенных параметров

$$\begin{cases} \min \inf_{\alpha_{K_{max\ cr}}} [K_{max\ cr}] \\ \min \inf_{\alpha_{P_0}} [P_0] \\ 400 \leq \gamma_a \leq 600 \\ 3 \leq F \leq 3.5 \\ 0.13 \leq \gamma_{eng} \leq 0.2 \end{cases}$$

$K_{max\ cr}$  - максимальное аэродинамическое качество на режиме крейсерского полета

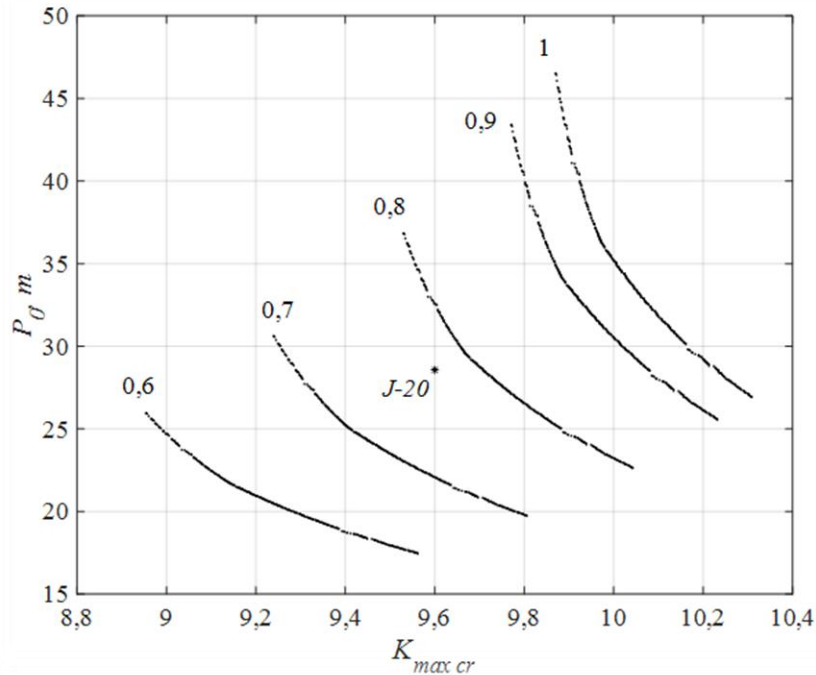
$P_0$  - взлетная тяга двигателя

$\gamma_a$  - плотность самолета,

$\gamma_{eng}$  - отношение веса силовой установки к тяге двигателей,

$F$  - коэффициент формы (равен отношению площади поверхности самолета к поверхности равновеликой по объему сферы).

## Результат



С увеличением значений  $\alpha_{K_{max cr}}$  и  $\alpha_{P_0}$  повышается степень уверенности в том, что итоговые значения  $K_{max cr}$  и  $P_0$  при создании самолета не превысят значений из соответствующего Парето-фронта. В приведенном расчете значения  $\alpha_{K_{max cr}}$  и  $\alpha_{P_0}$  взяты равными.

*Парето-фронты, соответствующие различным степеням уверенности от 0,6 до 1*

Момент тангажа  $M_z$ , создаваемый горизонтальным оперением, определяется по формуле:

$$M_z = YL = C_Y \frac{\rho (am)^2}{2} SL$$

$Y$  – подъемная сила,

$L$  – расстояние от центра масс до стабилизатора,

$C_Y$  – коэффициент подъемной силы,

$S$  – площадь стабилизатора,

$a$  – скорость звука,

$m$  – число Маха,

$\rho$  – плотность воздуха.





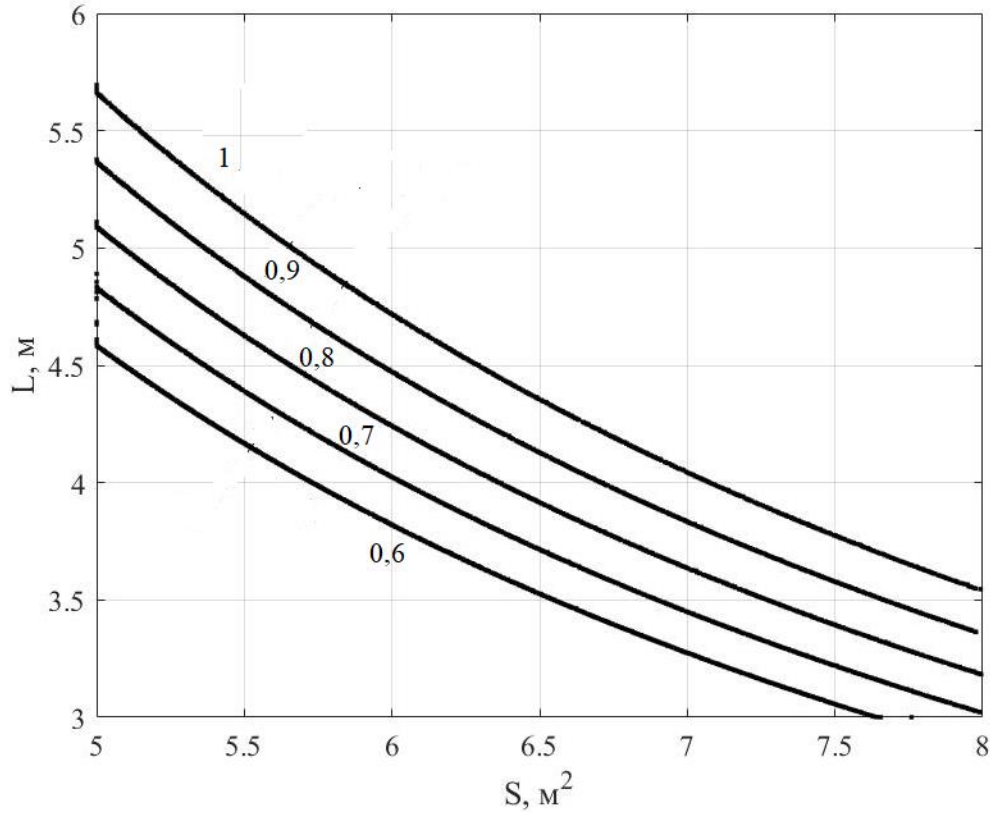
# Задача оптимизации параметров стабилизатора самолета

В детерминированной постановке:

$$\begin{cases} \min K_S S, \min K_L L \\ M_Z \geq M_{Z \text{ потр}} \end{cases}$$

В неопределенной постановке:

$$\begin{cases} \min INF_{\alpha_S}[K_S S], \min INF_{\alpha_L}[K_L L], \max \alpha_{M_Z} \\ M\{M_Z(m, H) \geq M_{Z \text{ потр}}\} = \alpha_{M_Z} \end{cases}$$



Неопределенные параметры:  
 $m, H, K_S$  и  $K_L$

Проектные параметры:  
 $S, L$  и  $\alpha_{M_Z}$

1. Разработана методика синтеза алгоритмов решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров
2. Разработаны требования к алгоритмам решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров и алгоритмам обработки экспертных данных о неопределенных параметрах, выполнение которых обеспечивает синтез алгоритмов, способных решать рассматриваемые задачи
3. Разработано инструментальное средство для автоматизированного синтеза алгоритмов решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью параметров
4. Решена задача оптимизации параметров горизонтального стабилизатора маневренного самолета в условиях неопределенности
5. Решена задача оптимизации аэродинамических характеристик и характеристик двигателя маневренного самолета на этапе предварительного проектирования

# Московцев Александр Михайлович (участник МНШ)



## Образование:

2-ой курс магистратуры,  
Политехнический Университет,  
математика и информатика.

Московский  
Прикладная

## Работает в ИПУ РАН:

с 2021 г.

## Должность:

инженер.

## Количество научных работ:

1.

## Область научных интересов:

- Методы интеллектуального анализа данных и их реализация на языке python.



**Построение функциональной зависимости на основе  
эмпирических данных для решения задачи  
оптимизации траектории набора высоты и скорости  
летательного аппарата**

**Московцев Александр Михайлович  
инженер  
Лаборатория № 46**

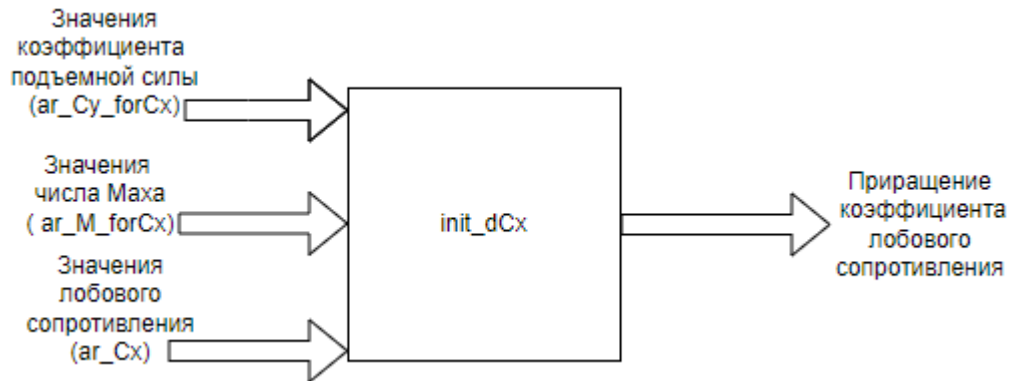


# Рассматриваемый объект



Длина самолета	20.3 м
Размах крыла	12.88 м
Высота	4.45 м
Площадь крыла	73 м <sup>2</sup>
Масса пустого самолета	17000 кг
Максимальная взлетная масса	36300 кг
Масса топлива	11100 кг
Двигатель	2 штуки с тягой 140 кН на форсаже
Дальность полета	5500 км
Боевой радиус	2000 км
Практический потолок	20000 м

# Функция для нахождения приращения коэффициента лобового сопротивления



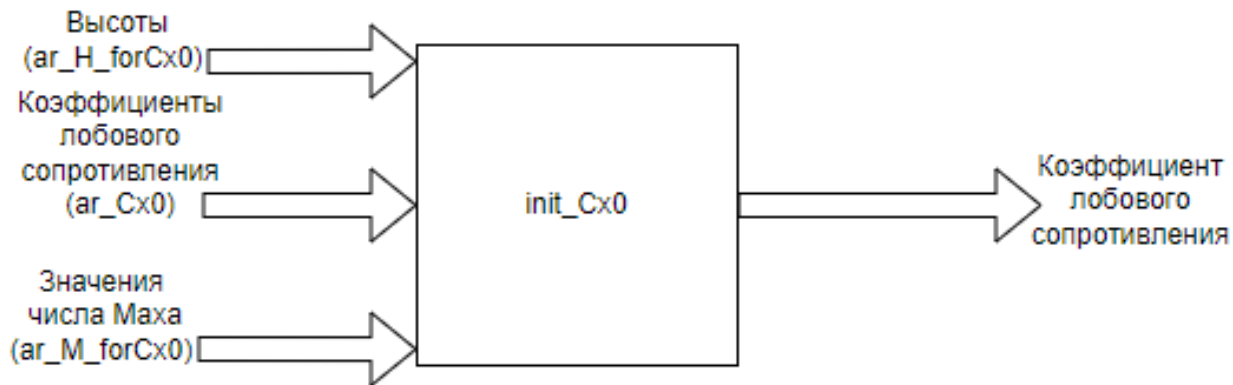
```
function F = init_dCx(method)

ar_Cy_fordCx = ...
[-0.1000  -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000 -0.1000
-0.0500  -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500 -0.0500
0.0000   0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
0.0500   0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500  0.0500
0.1000   0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000
0.1500   0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500  0.1500
ar_M_fordCx = ...
[0.0100  0.2000  0.4000  0.6000  0.7000  0.8000  0.8500  0.9000  0.9500  1.0000  1.0500  1.1000  1.2000
0.0100  0.2000  0.4000  0.6000  0.7000  0.8000  0.8500  0.9000  0.9500  1.0000  1.0500  1.1000  1.2000
0.0100  0.2000  0.4000  0.6000  0.7000  0.8000  0.8500  0.9000  0.9500  1.0000  1.0500  1.1000  1.2000
0.0100  0.2000  0.4000  0.6000  0.7000  0.8000  0.8500  0.9000  0.9500  1.0000  1.0500  1.1000  1.2000
0.0100  0.2000  0.4000  0.6000  0.7000  0.8000  0.8500  0.9000  0.9500  1.0000  1.0500  1.1000  1.2000
0.0100  0.2000  0.4000  0.6000  0.7000  0.8000  0.8500  0.9000  0.9500  1.0000  1.0500  1.1000  1.2000
0.0100  0.2000  0.4000  0.6000  0.7000  0.8000  0.8500  0.9000  0.9500  1.0000  1.0500  1.1000  1.2000
ar_dCx = ...
[0.0020  0.0019  0.0018  0.0018  0.0018  0.0018  0.0019  0.0019  0.0020  0.0022  0.0024  0.0025  0.0029
0.0005  0.0005  0.0005  0.0004  0.0004  0.0004  0.0005  0.0005  0.0005  0.0005  0.0006  0.0006  0.0007
0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
0.0005  0.0005  0.0005  0.0004  0.0004  0.0004  0.0005  0.0005  0.0005  0.0005  0.0006  0.0006  0.0007
0.0020  0.0019  0.0018  0.0018  0.0018  0.0018  0.0019  0.0019  0.0020  0.0022  0.0024  0.0025  0.0029
F = griddedInterpolant({ar_Cy_fordCx(:, 1), ar_M_fordCx(1, :)}, ar_dCx, method);

-end
```



# Функция для нахождения коэффициента лобового сопротивления



```
function F = init_Cx0(method)
```

```
ar_H_forCx0 = ...
```

```
[0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000;  
0 5000 11000 15000 20000 25000];
```

```
ar_M_forCx0 = ...
```

```
[0.0100 0.0100 0.0100 0.0100 0.0100 0.0100;  
0.2000 0.2000 0.2000 0.2000 0.2000 0.2000;  
0.4000 0.4000 0.4000 0.4000 0.4000 0.4000;  
0.6000 0.6000 0.6000 0.6000 0.6000 0.6000];
```

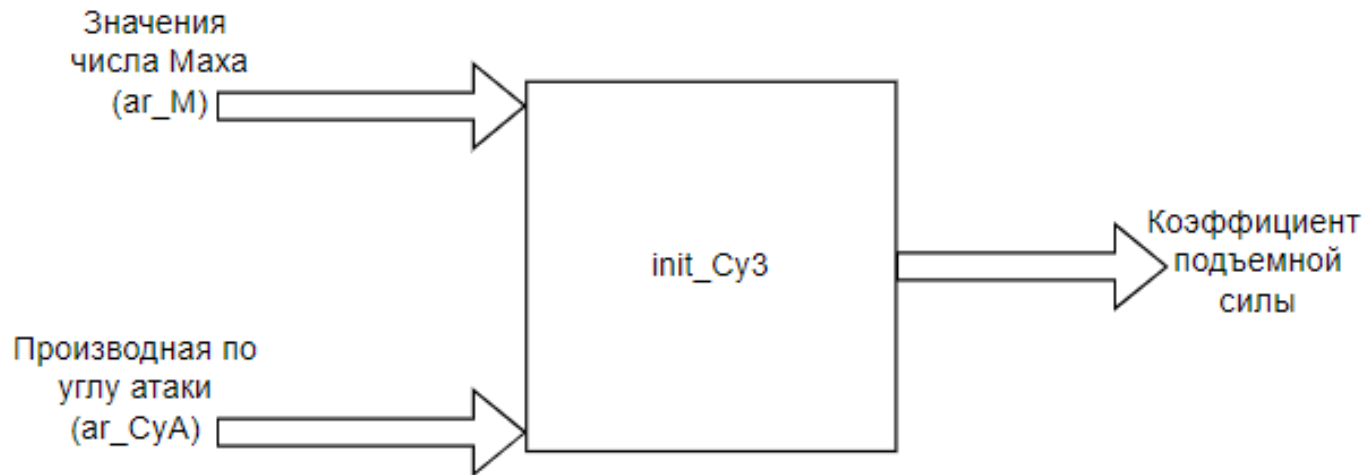
```
ar_Cx0 = ...
```

```
[0.0135 0.0144 0.0158 0.0174 0.0196 0.0221;  
0.0136 0.0141 0.0150 0.0160 0.0174 0.0191;  
0.0137 0.0139 0.0147 0.0156 0.0169 0.0183;  
0.0140 0.0140 0.0147 0.0155 0.0167 0.0181;  
0.0143 0.0141 0.0148 0.0156 0.0167 0.0180;  
0.0146 0.0144 0.0150 0.0158 0.0169 0.0181;  
0.0149 0.0147 0.0152 0.0159 0.0170 0.0182;  
0.0158 0.0156 0.0160 0.0167 0.0178 0.0190;  
0.0189 0.0187 0.0190 0.0197 0.0207 0.0219;  
0.0240 0.0237 0.0240 0.0246 0.0256 0.0268;  
0.0288 0.0286 0.0288 0.0294 0.0304 0.0315;  
0.0311 0.0308 0.0310 0.0316 0.0326 0.0336;  
0.0321 0.0319 0.0320 0.0326 0.0335 0.0346;  
0.0283 0.0281 0.0282 0.0287 0.0296 0.0306;  
0.0260 0.0258 0.0259 0.0264 0.0272 0.0282;  
0.0243 0.0241 0.0242 0.0247 0.0255 0.0263;  
0.0235 0.0233 0.0234 0.0239 0.0246 0.0254;  
0.0228 0.0227 0.0228 0.0232 0.0239 0.0247];
```

```
F = griddedInterpolant({ar_M_forCx0(:, 1), ar_H_forCx0(1, :)}, ar_Cx0, method);
```

```
end
```

# Функция для нахождения коэффициента подъемной силы



```
function F = init_Cy3(method)

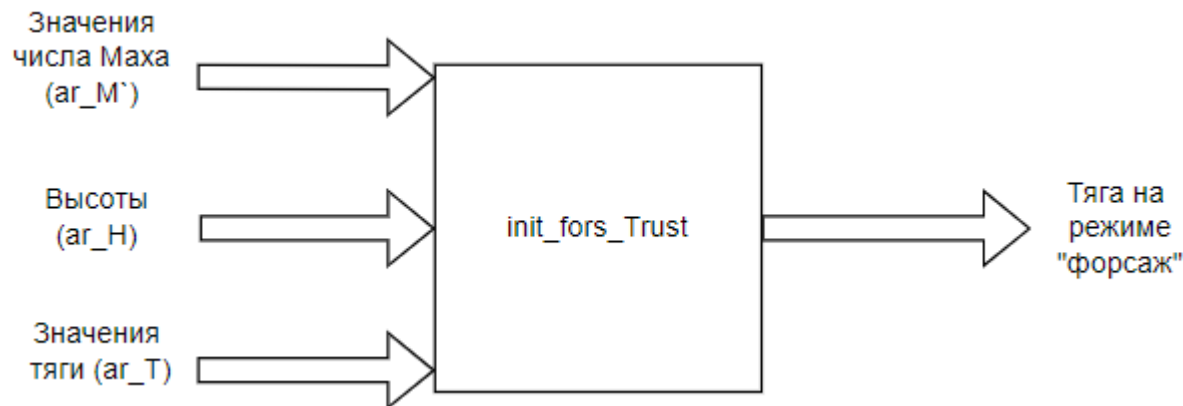
ar_M = ...
[0.01; 0.2; 0.4; 0.6; 0.7; 0.8; 0.85; 0.9; 0.95; 1; 1.05; 1.1; 1.2; 1.5; 1.78; 2.03; 2.27; 2.5];

ar_CyA = ...
[0.0584; 0.0593; 0.0615; 0.0643; 0.0661; 0.0691; 0.0710; 0.0728; 0.0750; 0.0772; 0.0782; 0.0773; 0.0707];

F = griddedInterpolant(ar_M, ar_CyA, method);

end
```

# Функция для нахождения тяги на режиме «форсаж»



```
function F = init_fors_Trust(method)

ar_H = [0 5000 8000 11000 15000 20000 25000];

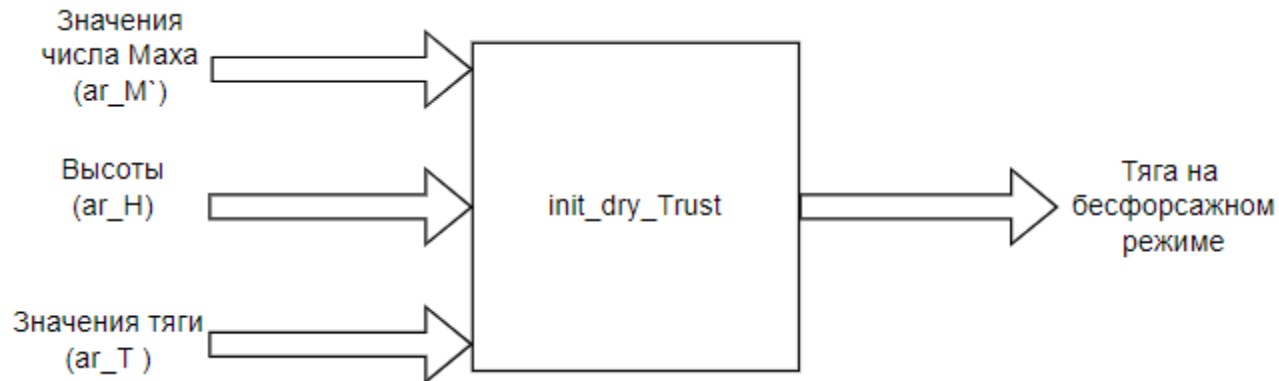
ar_M = [0.01 0.3 0.3895 0.4789 0.5684 0.6579 0.7474 0.8368 0.9263 1.0158 1.1053 1.1947 1.2842];

ar_T = ...
[113713 60849 40506 25506 13576.6 6170.1 2795.917395;
116906 64163.69774 42758.87005 27663 14724.8 6691.9 3032.382431;
120240.0277 67392.97424 44795.24689 29250 15569.4 7075.8 3206.312796;
122139.3228 70641.24991 46990.32065 30611 16293.9 7405 3355.519401;
124781.6455 74857.62073 49684.61911 32371 17230.9 7830.8 3548.4705;
129125.3213 80445.5557 53251.6803 34591 18412.5 8367.9 3791.825107;
135194.2483 87705.34436 57787.75276 37360 19886.4 9037.7 4095.33721;
142061.5269 94579.67203 63359.17829 40814 21725.1 9873.3 4473.998734;
147709.3615 98702.22879 70052.55698 44876 23886.9 10855.8 4919.188682;
151103.374 102202.2848 76631.52546 49303 26243.7 11926.9 5404.550908;
154276.078 107132.3999 81902.70903 54523 29021.9 13189.5 5976.680775;
158236.925 113890.7185 86686.53151 61094 32519.8 14779.1 6697.02717;
NaN 119692.7793 92241.35041 68849 36647.7 16655.1 7547.125961;
NaN 125423.2562 98508.72338 73288 39010.3 17728.8 8033.655699;
NaN 130886.4052 104204.1005 77791 41407.2 18818.2 8527.276313;
NaN NaN 108675.5588 82805 44076 20031 9076.884097;
NaN NaN 111967.5447 86918 46265.8 21026.2 9527.831269;
NaN NaN 113285.7887 89320 47543.9 21607.1 9791.056354;
NaN NaN NaN 90204 48014.8 21821.1 9888.02178;
NaN NaN NaN 89454 47615.6 21639.6 9805.810625;
NaN NaN NaN 86212 45889.4 20855.2 9450.334784];

F = griddedInterpolant({ar_M', ar_H}, ar_T, method);

end
```

# Функция для нахождения тяги на бесфорсажном режиме



```
function F = init_dry_Trust(method)

ar_H = [0 5000 8000 11000 15000 20000 25000];

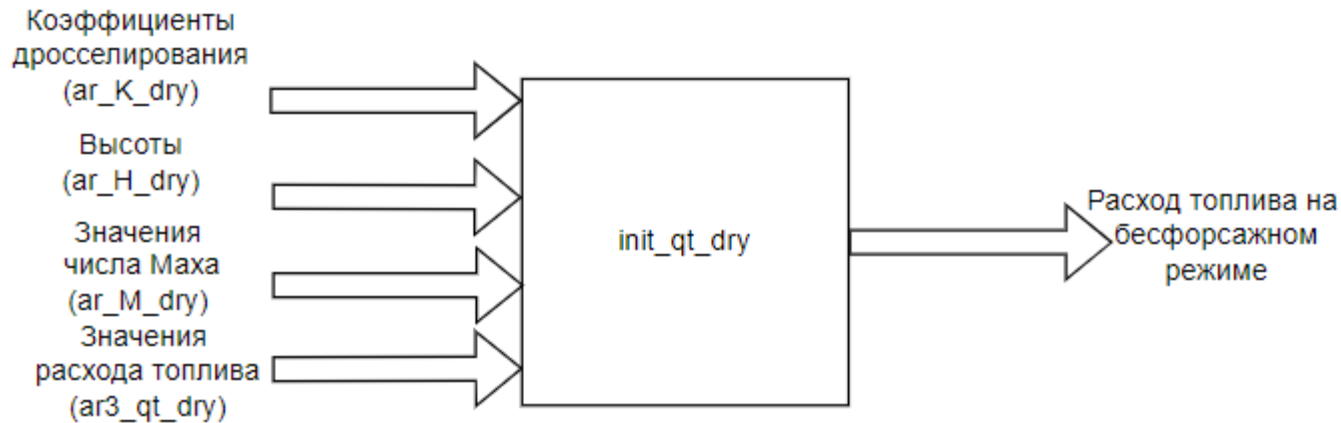
ar_M = [0.01 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 0.95 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 2];

ar_T = ...
[71055.45 38392.26 25273.70 15696.00 8354.81 3796.97 1720.56;
69788.10 37962.82 24917.40 15597.90 8302.59 3773.24 1709.81;
69386.64 37842.52 24848.70 15745.05 8380.92 3808.84 1725.94;
70153.36 38408.64 25260.80 16128.97 8585.28 3901.71 1768.03;
70763.31 39845.33 26094.60 16726.05 8903.09 4046.15 1833.48;
69859.09 41392.67 27144.30 17265.60 9190.29 4176.67 1892.62;
69735.55 43584.90 28527.50 18089.64 9628.92 4376.01 1982.95;
70693.56 46399.97 30568.00 19245.26 10244.04 4655.56 2109.63;
72159.95 49256.47 33157.80 20859.00 11103.02 5045.94 2286.52;
73621.29 51433.62 36277.40 22981.89 12233.01 5559.48 2519.23;
74080.06 51800.22 37278.00 24034.50 12793.30 5814.12 2634.61;
69758.51 49824.11 37935.30 24740.82 13169.27 5984.98 2712.04;
59038.50 46057.72 38357.10 26683.20 14203.18 6454.86 2924.96;
56345.65 46479.72 38533.70 29282.85 15586.94 7083.73 3209.93;
NaN 46466.22 39308.70 31872.69 16965.49 7710.23 3493.82;
NaN 46615.06 40436.80 33236.28 17691.31 8040.09 3643.30;
NaN 46468.07 40927.30 34060.32 18129.94 8239.43 3733.63;
NaN NaN 40613.40 34805.88 18526.79 8419.79 3815.35;
NaN NaN 39624.90 34599.42 18416.89 8369.85 3792.72;
NaN NaN NaN 32373.00 17231.79 7831.26 3548.66];

F = griddedInterpolant({ar_M', ar_H}, ar_T, method);

end
```

# Функция для нахождения расхода топлива на бесфорсажном режиме



```
function F = init_qt_dry(method)
```

```
ar_M_dry = [0; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.2; 1.4; 1.5; 1.6];
```

```
ar_K_dry = [0; 0.0667; 0.1333; 0.2; 0.2667; 0.3333; 0.4; 0.4667; 0.5333; 0.6; 0.6667; 0.7333; 0.8;
```

```
ar_H_dry = [0; 11000; 15000; 20000];
```

```
qt_dry_H0 = ...
```

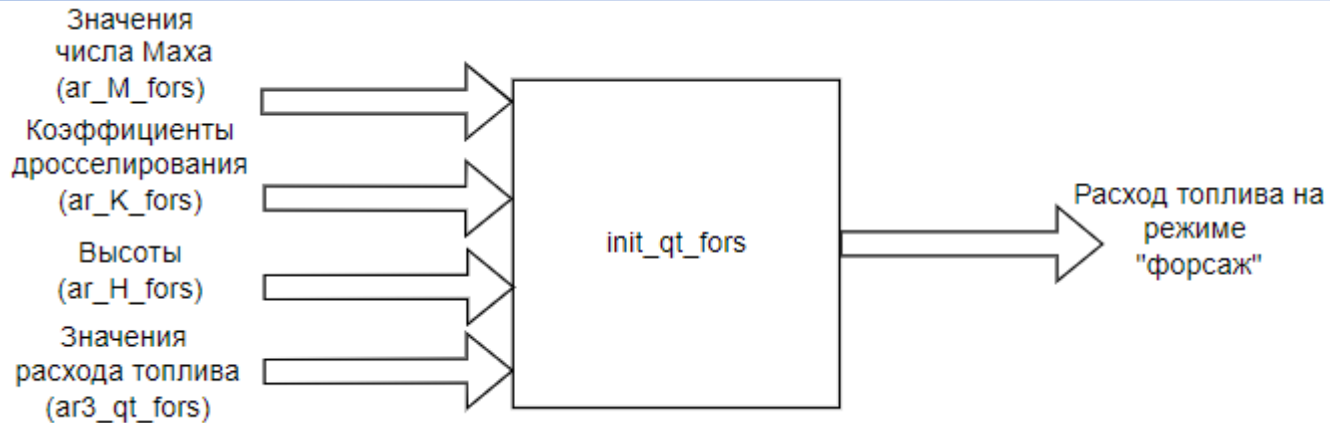
0.1500	0.1600	0.1700	0.1800	0.2000	0.2222	0.2500	0.3500	NaN	NaN
0.2486	0.2872	0.2986	0.3237	0.3552	0.3787	0.4015	0.4598	NaN	NaN
0.3457	0.4075	0.4213	0.4570	0.4971	0.5255	0.5497	0.5946	NaN	NaN
0.4411	0.5204	0.5379	0.5800	0.6277	0.6635	0.6950	0.7547	NaN	NaN

```
qt_dry_H11 = ...
```

0.0300	0.0500	0.0544	0.0600	0.0700	0.0800	0.0900	0.1000	0.1500	0.2000
0.0446	0.0655	0.0707	0.0772	0.0866	0.0961	0.1135	0.1391	0.2187	0.2696
0.0599	0.0831	0.0892	0.0966	0.1064	0.1162	0.1430	0.1830	0.2875	0.3392
0.0759	0.1025	0.1095	0.1178	0.1284	0.1391	0.1766	0.2305	0.3562	0.4088
0.0926	0.1237	0.1314	0.1406	0.1529	0.1654	0.2181	0.2841	0.4250	0.4785



# Функция для нахождения расхода топлива на режиме «форсаж»



```
function F = init_qt_fors(method)

ar_M_fors = [0; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.2; 1.4; 1.5; 1.6; 2];
ar_K_fors = [0; 0.5; 1];
ar_H_fors = [0; 5000; 8000; 11000; 15000; 20000];

qt_fors_H0 = ...
[1.7571    2.0733    2.1432    2.2547    2.3783    2.5069    2.6329    2.8594
 4.1121    4.9082    5.1476    5.4826    5.8778    6.2874    6.6975    7.4884
 6.4671    7.7431    8.1520    8.7104    9.3772    10.0679    10.7621    12.1173
NaN
NaN
NaN
NaN

qt_fors_H8 = ...
[0.5439 0.7197 0.7856 0.8729 0.9767 1.0956 1.2294 1.4277 1.6169 1.6985 1.7616 NaN;
 1.2859 1.6642 1.8065 1.9917 2.2221 2.5083 2.8408 3.3931 4.0230 4.3183 4.5556 NaN;
 2.0280 2.6088 2.8273 3.1105 3.4674 3.9210 4.4523 5.3586 6.4291 6.9382 7.3496 NaN];

qt_fors_H5 = ...
[0.8770 1.1588 1.2674 1.3927 1.5200 1.6232 1.6937 1.9181 2.1282 2.2287 NaN NaN;
 2.0196 2.6331 2.8730 3.1787 3.5438 3.8020 4.0519 4.7699 5.4774 5.8087 NaN NaN;
 3.1623 4.1075 4.4786 4.9647 5.5676 5.9809 6.4101 7.6217 8.8266 9.3888 NaN NaN];

qt_fors_H11 = ...
[0.3200    0.4288    0.4667    0.5157    0.5795    0.6586    0.7531    0.9809    1.1812    1.2442
 0.7811    1.0294    1.1138    1.2210    1.3558    1.5209    1.7193    2.2495    2.5517    2.7523
 1.2422    1.6301    1.7609    1.9262    2.1320    2.3832    2.6854    3.5182    4.4099    4.8005

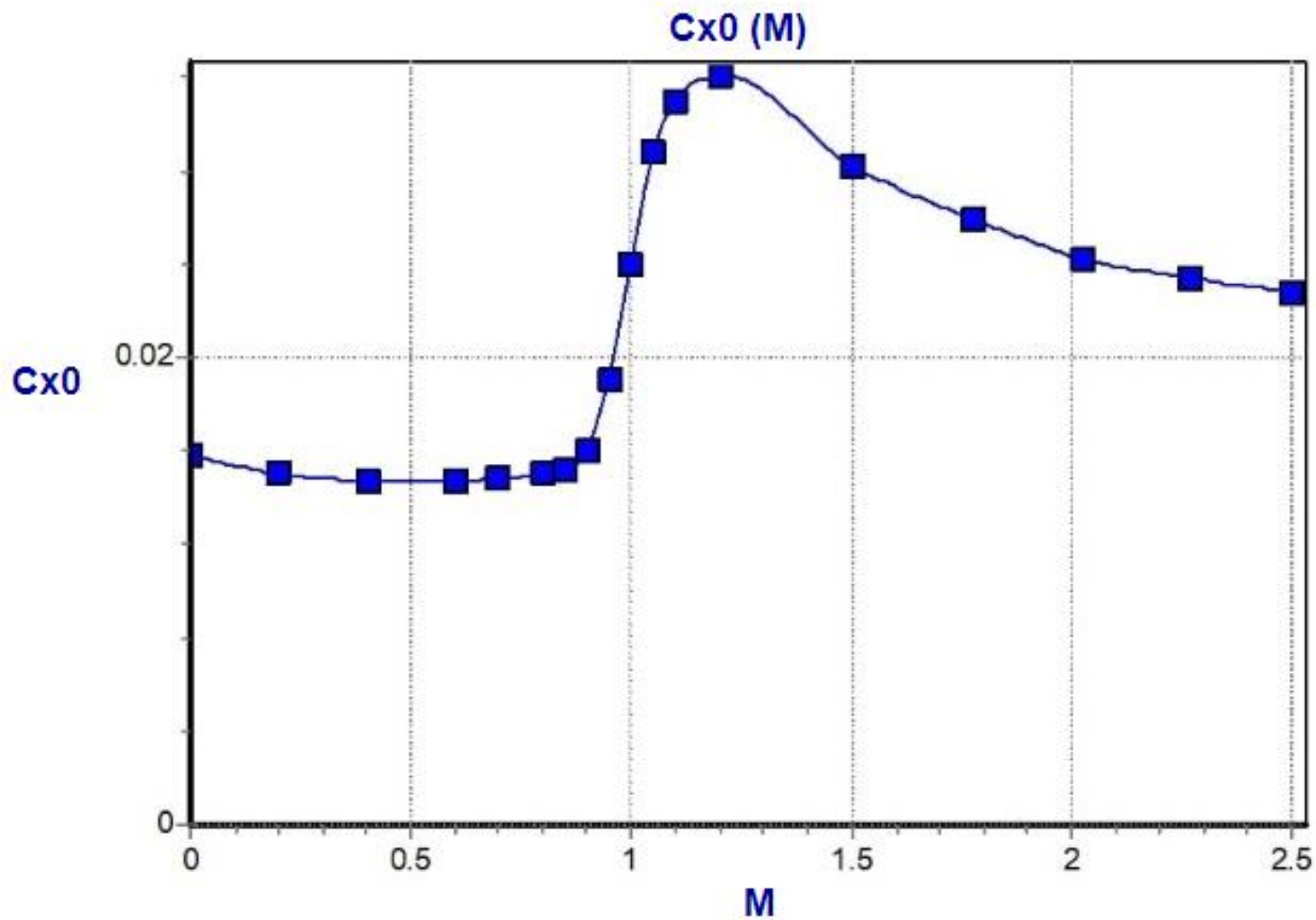
ar3_qt_fors(:, :, 1) = qt_fors_H0;
ar3_qt_fors(:, :, 2) = qt_fors_H5;
ar3_qt_fors(:, :, 3) = qt_fors_H8;
ar3_qt_fors(:, :, 4) = qt_fors_H11;
ar3_qt_fors(:, :, 5) = qt_fors_H15;
ar3_qt_fors(:, :, 6) = qt_fors_H20;

F = griddedInterpolant({ar_K_fors, ar_M_fors, ar_H_fors}, ar3_qt_fors, method);

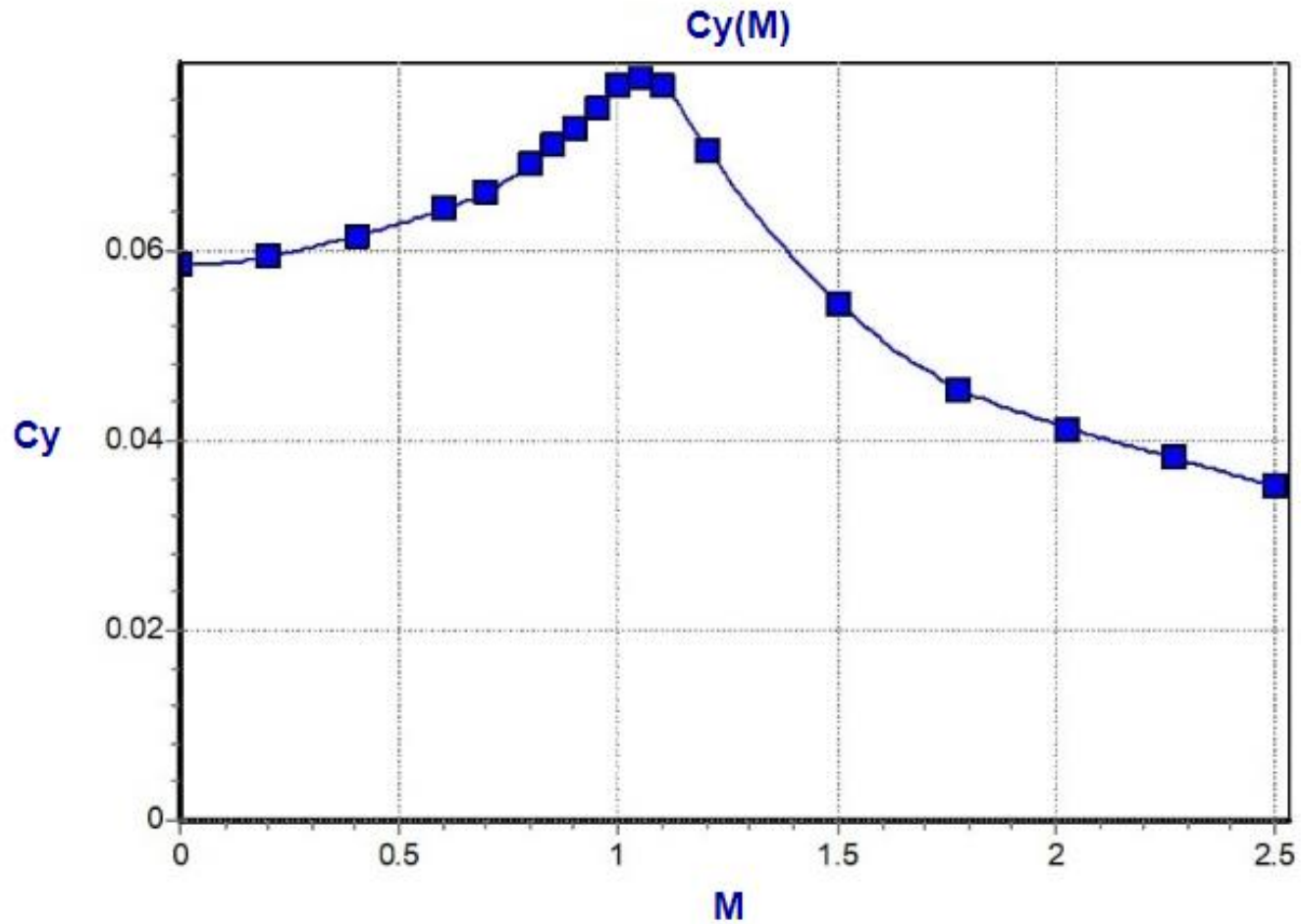
end
```



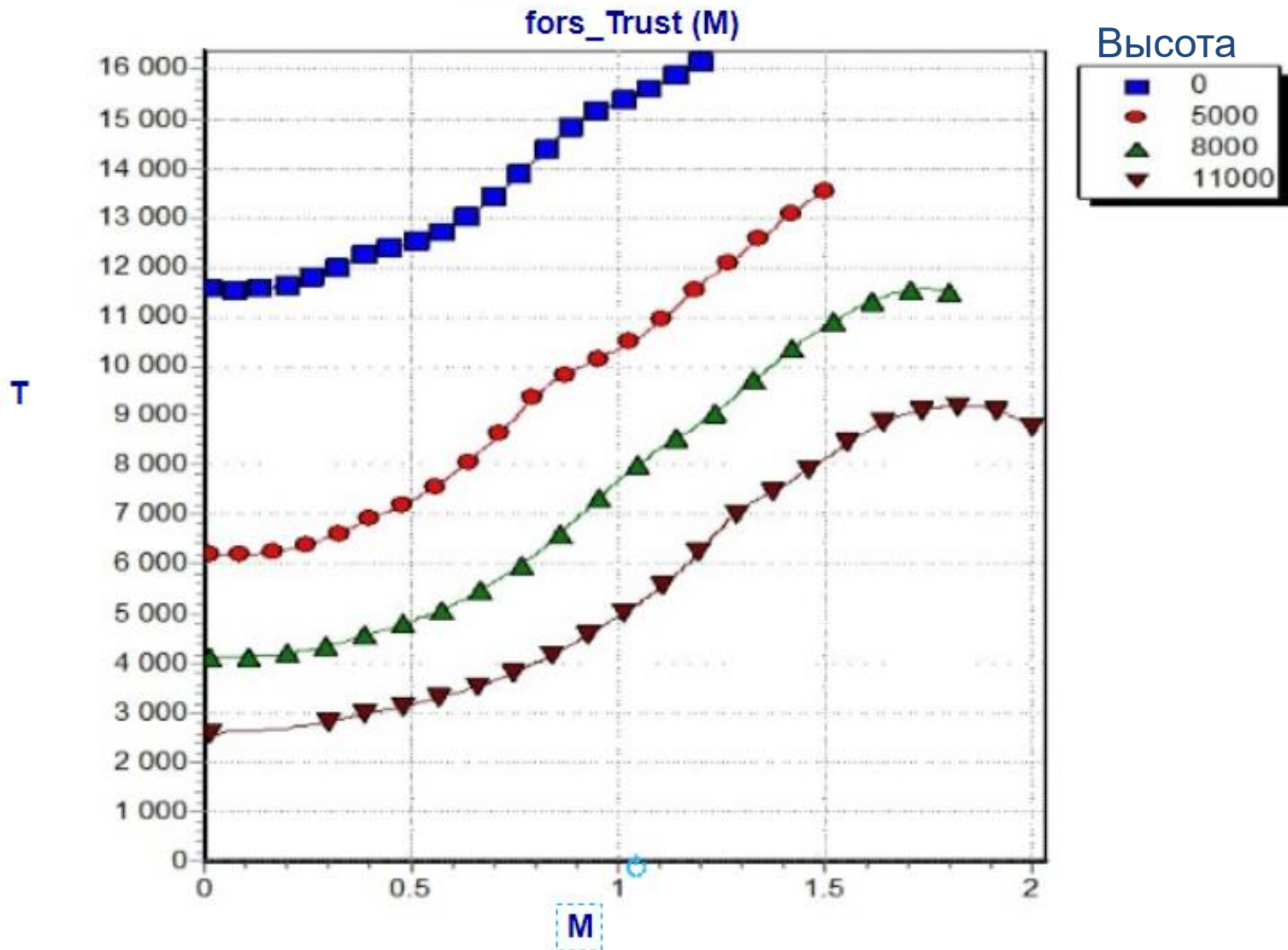
# График коэффициента лобового сопротивления



# График коэффициента подъемной силы

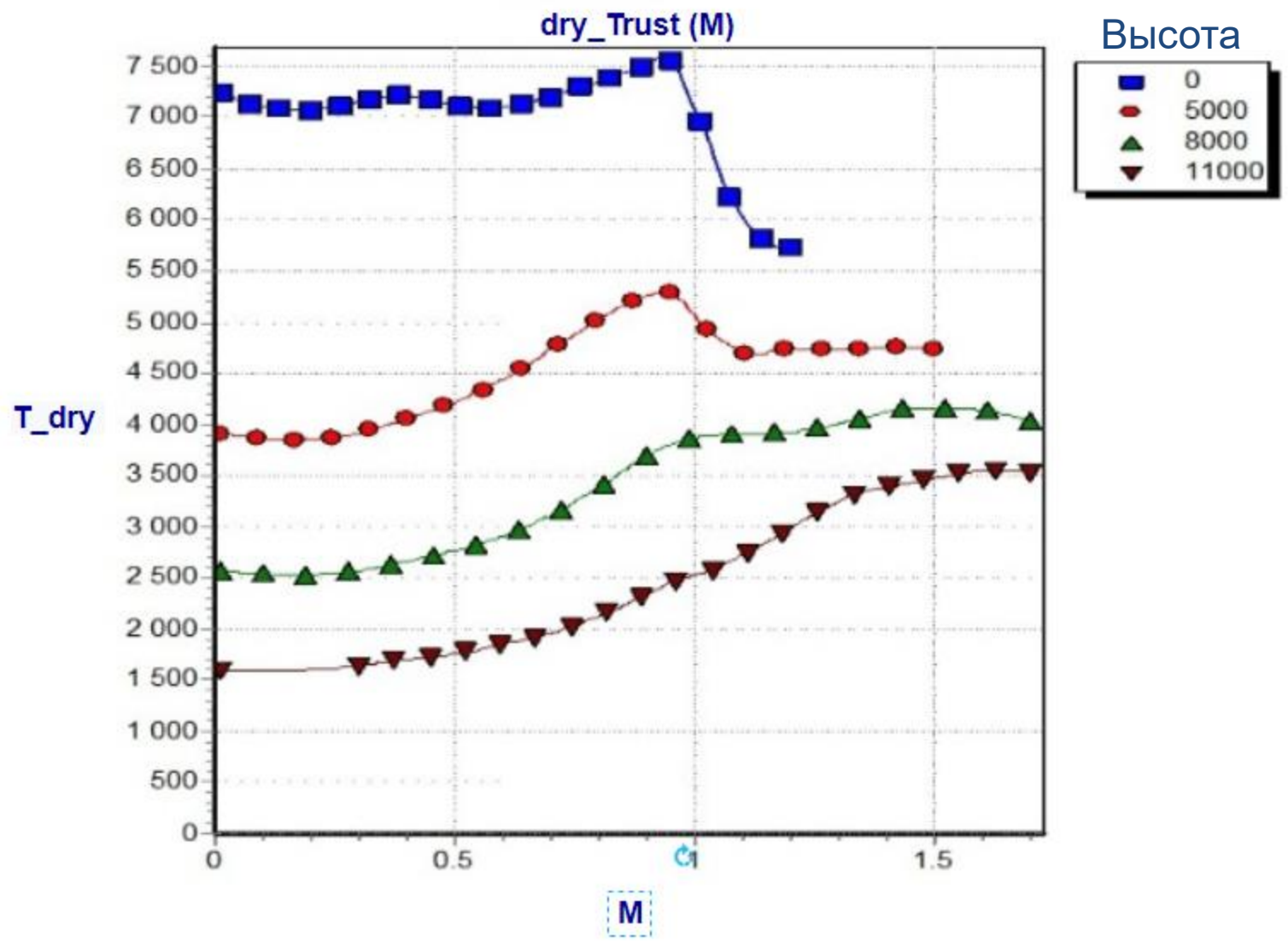


# График тяги на режиме «форсаж»



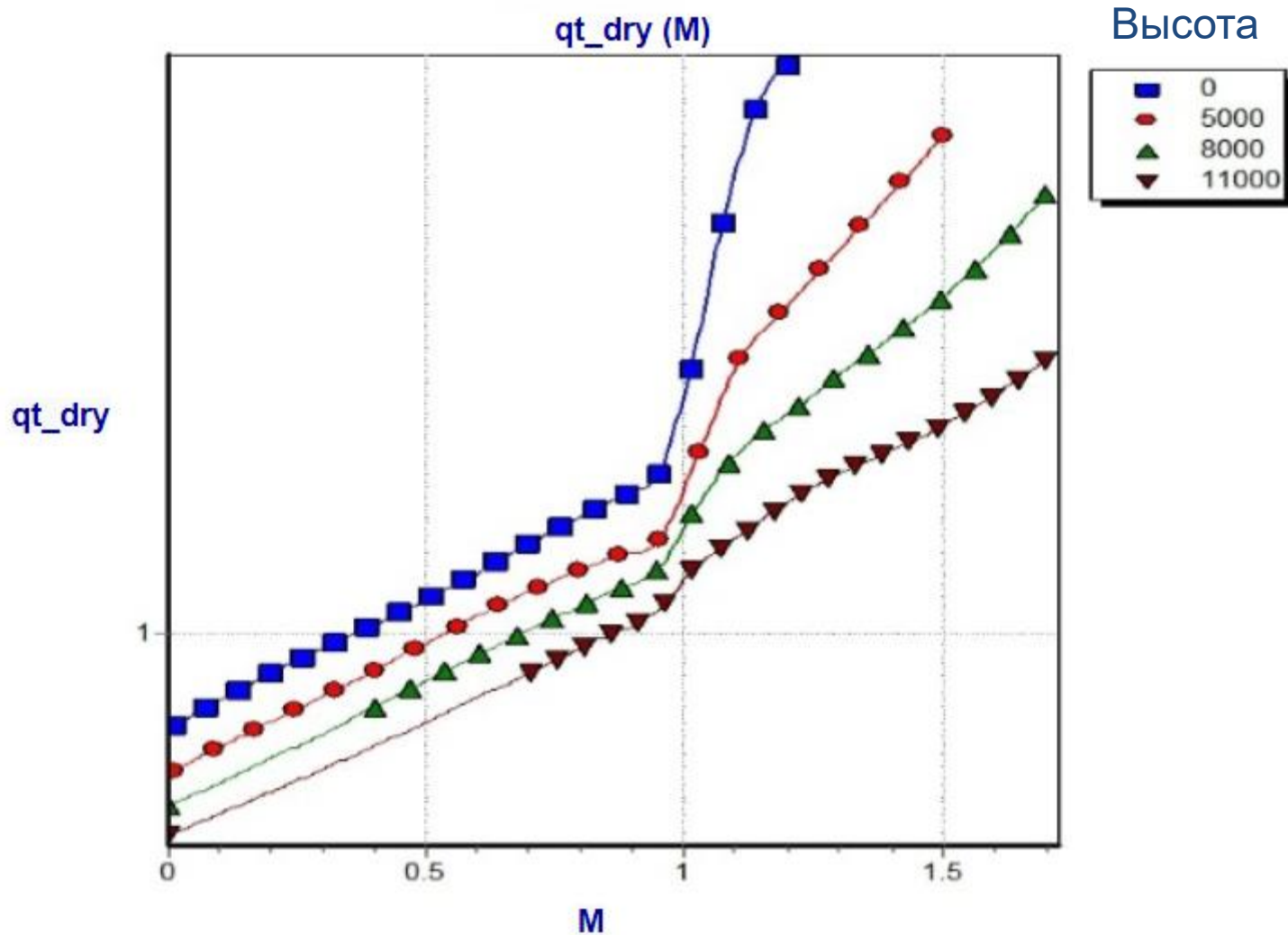


# График тяги на бесфорсажном режиме



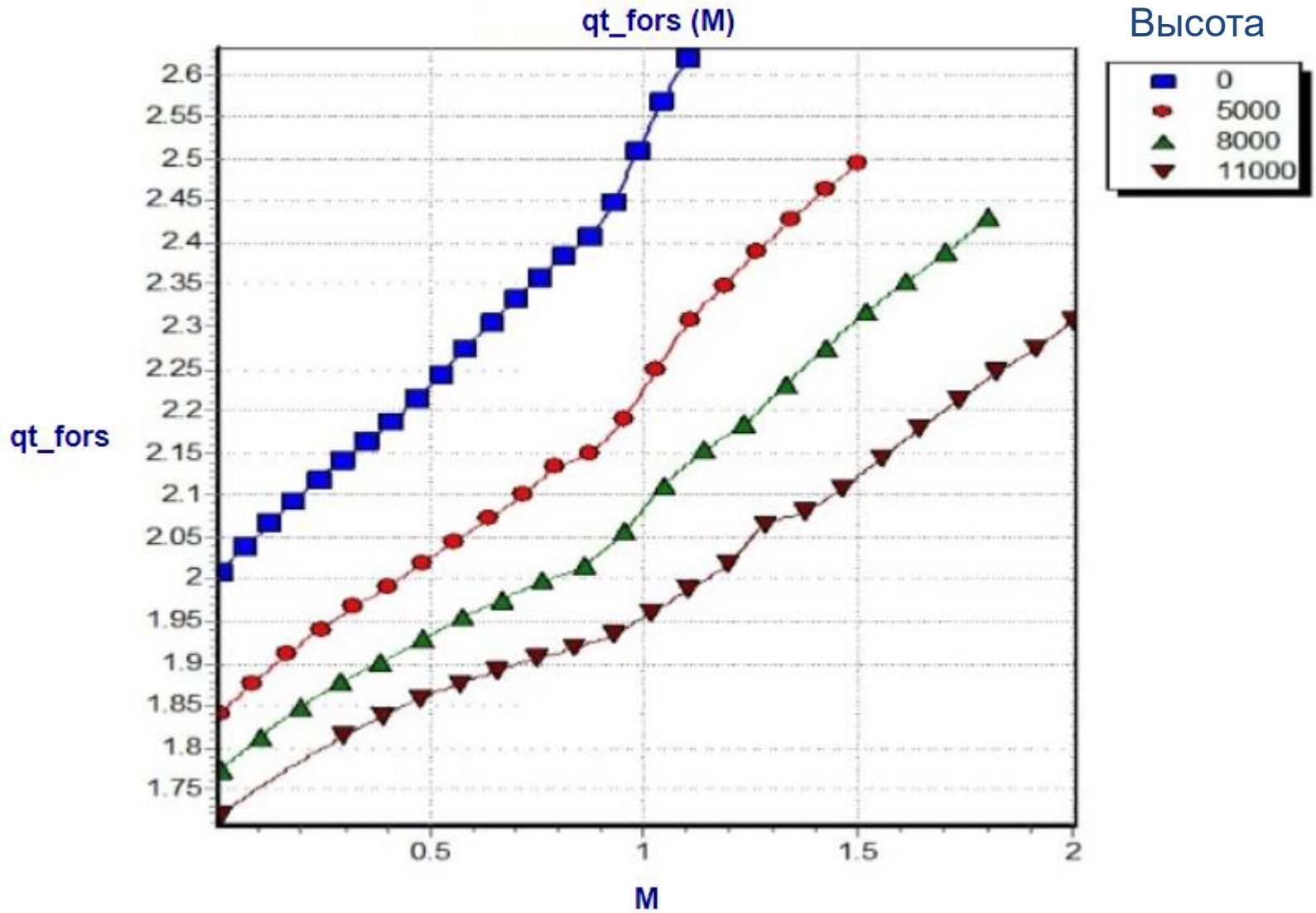


# График расхода топлива на бесфорсажном режиме



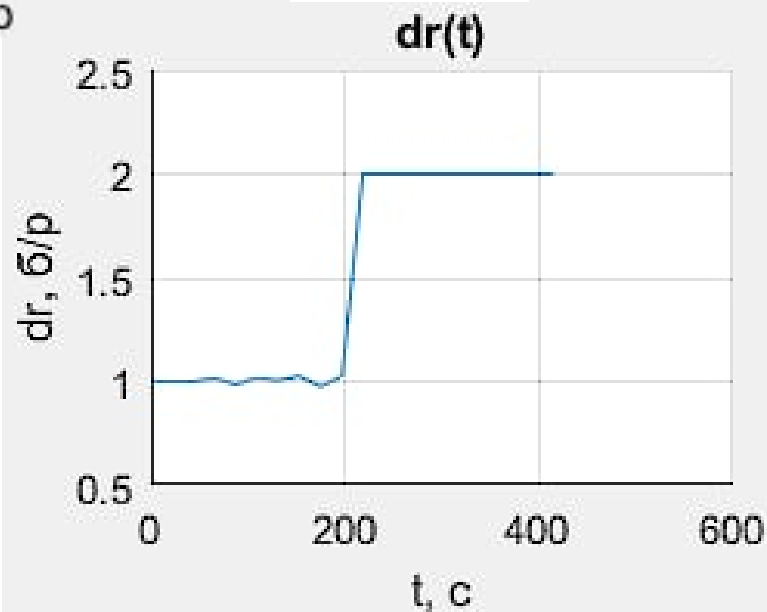
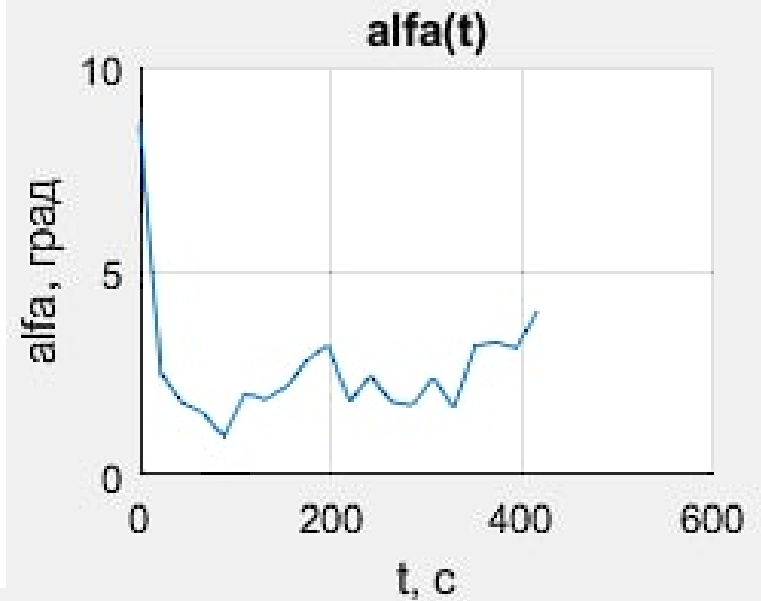
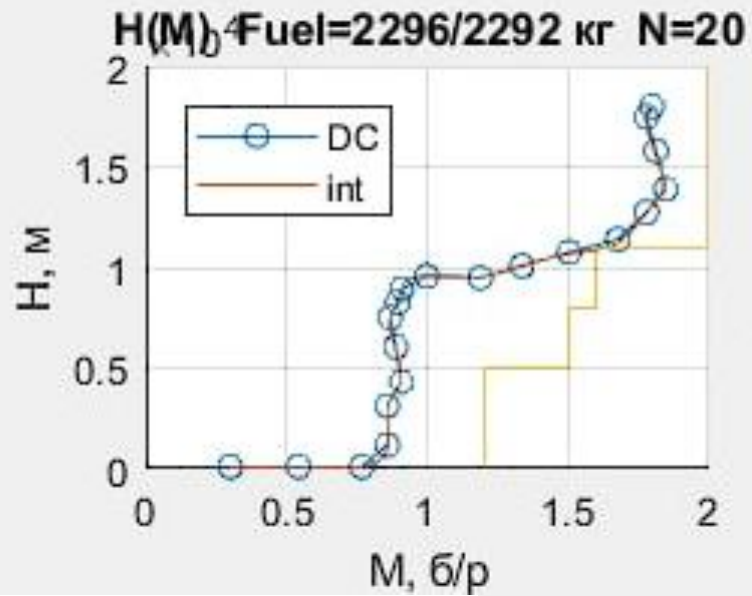


# График расхода топлива на режиме «форсаж»





# Результаты работы алгоритма оптимизации траектории



# Вересников Георгий Сергеевич (участник МНШ)



## **Образование:**

В 2020 г. Вересниковым Г.С. в ИПУ РАН защищена диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.

## **Работает в ИПУ РАН:**

с 2004 г.

## **Должность:**

Зав. лаб. № 46

## **Количество научных работ за 2021-2022 гг.:**

Scopus/WOS – 6, РИНЦ – 6.

## **Область научных интересов:**

- анализ и обработка многомерных данных с использованием математических и статистических методов;
- разработка систем поддержки принятия решений;
- методы интеллектуального анализа данных;
- проектирование сложных технических объектов в условиях параметрической неопределенности.



**Спасибо за внимание!**