



ЦЕНТР  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

# Исследование датасета «Оставшееся количество циклов зарядки аккумулятора» (ориг. *Battery Remaining Useful Life - RUL*)

Выпускная квалификационная работа  
1 мая 2023 г.

Ларин П. М.



ЦЕНТР  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

# Информация о датасете RUL

Автор датасета: **Ignacio Viñuales**

Оригинальное название: **Battery Remaining Useful Life (RUL)**

Домашняя страница датасета: [https://github.com/ignavinuales/Battery\\_RUL\\_Prediction](https://github.com/ignavinuales/Battery_RUL_Prediction)

На Каггле: <https://www.kaggle.com/datasets/ignaciovinuales/battery-remaining-useful-life-rul>

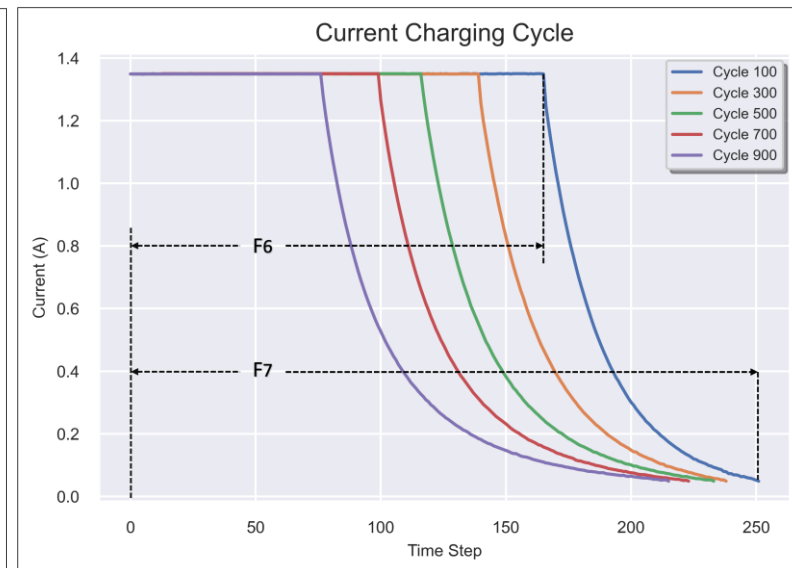
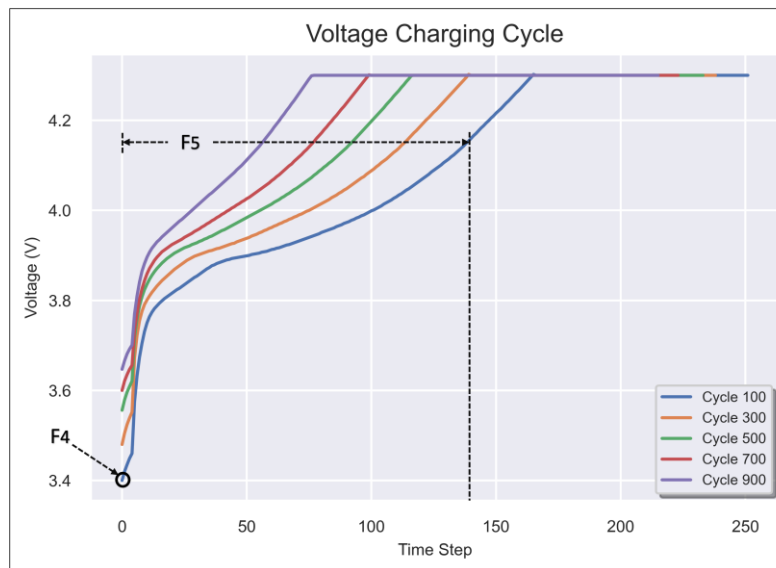
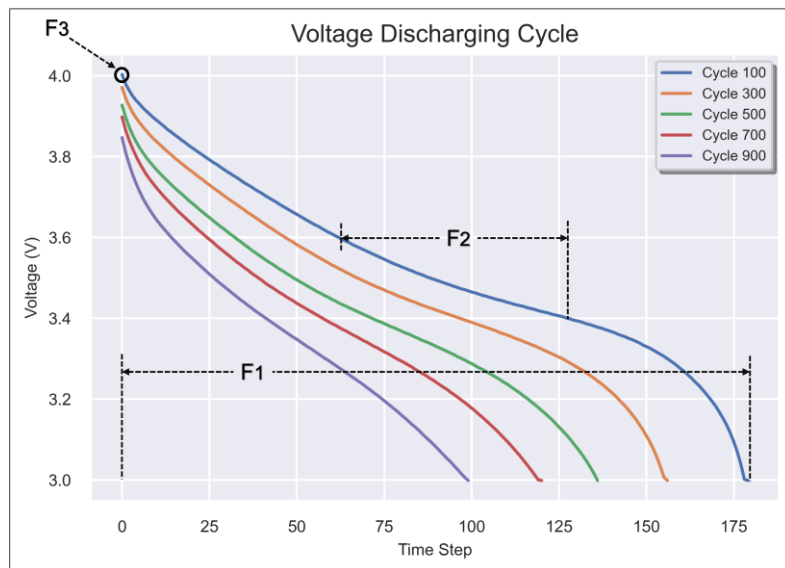
## Описание автора датасета

Гавайский Институт природной энергии протестировал 14 аккумуляторов типа NMC-LCO 18650 номинальной емкости 2.8 А·ч. Каждый аккумулятор был подвергнут более чем 1000 циклам разрядки/зарядки при температуре 25°C, включающим CC-CV зарядку в режиме C/2 и разрядку в режиме 1.5C.

На основе соответствующего датасета я [автор] создал новые признаки, описывающие динамику напряжения и силы тока для каждого цикла. Эти признаки можно использовать для предсказания оставшегося количества циклов аккумулятора. Датасет содержит сводную информацию о 14 аккумуляторах.



# Информация о датасете RUL



## Признаки

- Индекс цикла
- F1: Полная продолжительность разрядки (с)
- F2: Продолжительность разрядки с 3.6 В до 3.4 В (с)
- F3: Стартовое напряжение при разрядке (В)
- F4: Стартовое напряжение при зарядке (В)
- F5: Продолжительность зарядки до 4.15 В (с)
- F6: Продолжительность зарядки постоянным током (с)
- F7: Полная продолжительность зарядки (с)
- RUL: Целевая переменная (оставшееся количество циклов зарядки аккумулятора)



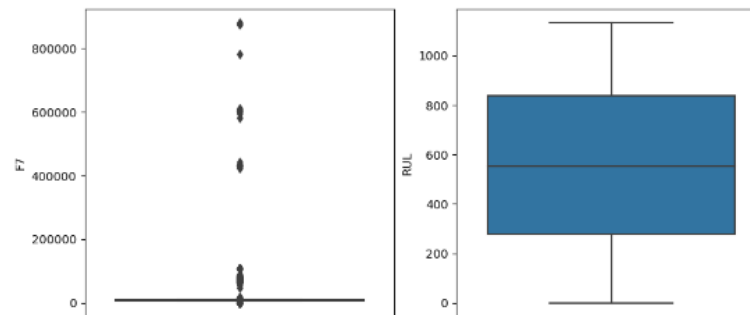
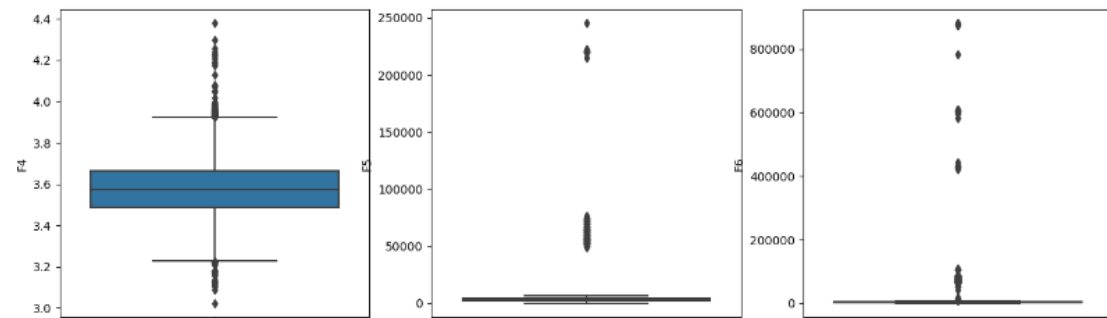
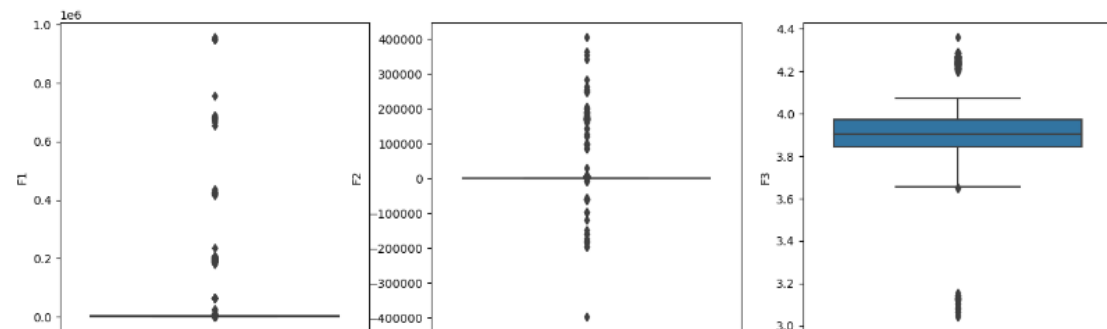
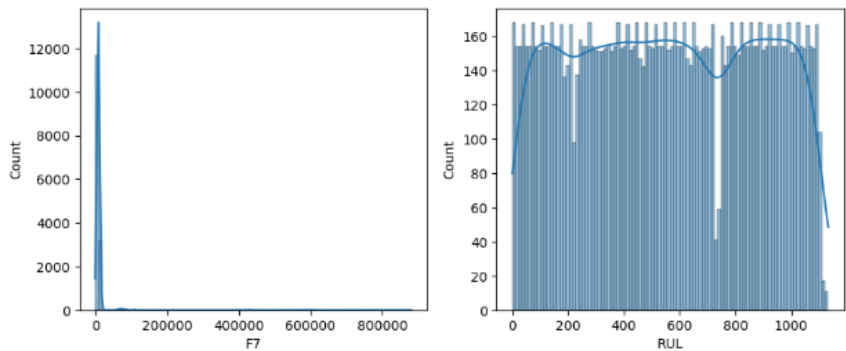
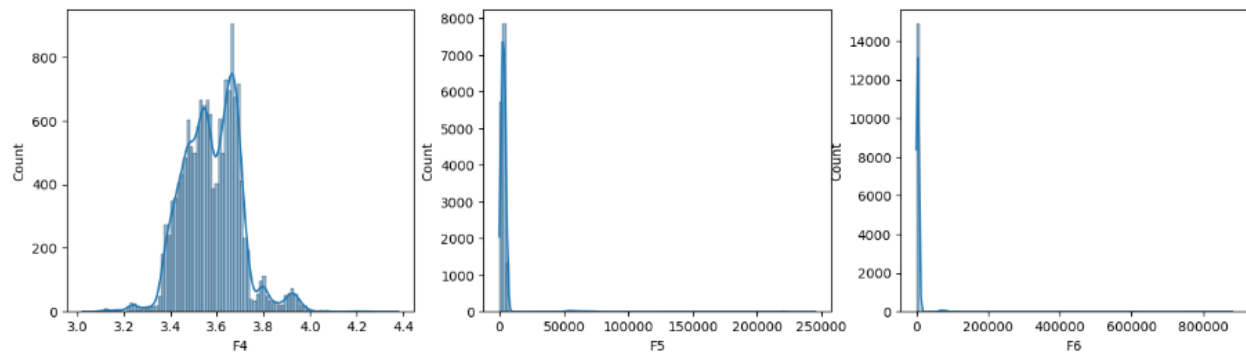
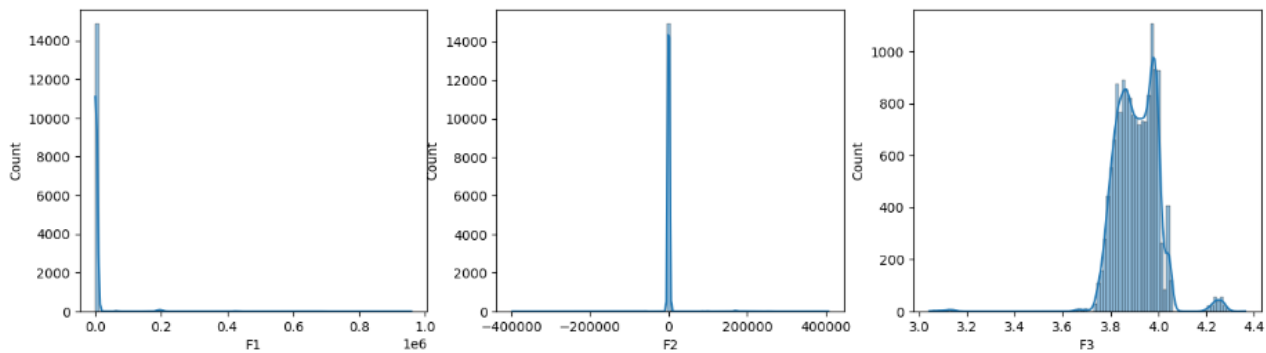
# Информация о датасете RUL

Размер исходного  
датасета: (15064, 9)

| Cycle_Index | Discharge<br>Time (s) | Decrement<br>3.6-3.4V (s) | Max. Voltage<br>Dischar. (V) | Min. Voltage<br>Charg. (V) | Time at 4.15V<br>(s) | Time constant<br>current (s) | Charging time<br>(s) | RUL  |
|-------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|------|
| 1           | 2595.3                | 1151.4885                 | 3.67                         | 3.211                      | 5460.001             | 6755.01                      | 10777.82             | 1112 |
| 2           | 7408.64               | 1172.5125                 | 4.246                        | 3.22                       | 5508.992             | 6762.02                      | 10500.35             | 1111 |
| 3           | 7393.76               | 1112.992                  | 4.249                        | 3.224                      | 5508.993             | 6762.02                      | 10420.38             | 1110 |
| 4           | 7385.5                | 1080.320667               | 4.25                         | 3.225                      | 5502.016             | 6762.02                      | 10322.81             | 1109 |
| 6           | 65022.75              | 29813.487                 | 4.29                         | 3.398                      | 5480.992             | 53213.54                     | 56699.65             | 1107 |
| 7           | 3301.18               | 1194.235077               | 3.674                        | 3.504                      | 5023.633636          | 5977.38                      | 5977.38              | 1106 |
| 8           | 5955.3                | 1220.135329               | 4.013                        | 3.501                      | 5017.495             | 5967.55                      | 5967.55              | 1105 |
| 9           | 5951.2                | 1220.135329               | 4.014                        | 3.501                      | 5017.496             | 5962.21                      | 5962.21              | 1104 |
| 10          | 5945.44               | 1216.920914               | 4.014                        | 3.501                      | 5009.993667          | 5954.91                      | 5954.91              | 1103 |
| 11          | 435251.49             | 263086.078                | 4.267                        | 3.086                      | 269.984              | 443700.02                    | 443700.02            | 1102 |
| 12          | 3228.58               | 1135.349333               | 3.689                        | 3.485                      | 5033.075692          | 5969.89                      | 5969.89              | 1101 |
| 13          | 6019.9                | 1058.279724               | 4.045                        | 3.475                      | 5053.842846          | 5980.77                      | 5980.77              | 1100 |
| 14          | 6026.59               | 1049.487845               | 4.047                        | 3.477                      | 5046.4295            | 5966.82                      | 5966.82              | 1099 |
| 15          | 6008.07               | 1065.372059               | 4.045                        | 3.48                       | 5033.075769          | 5954.47                      | 5954.47              | 1098 |
| 16          | 423271.35             | 168773.265                | 4.27                         | 3.108                      | 219923.996           | 430028.84                    | 430028.84            | 1097 |
| 17          | 2261.34               | 883.2                     | 4.038                        | 3.901                      | 1949.664             | 2922.69                      | 6070.11              | 1096 |
| 18          | 2259.46               | 883.199                   | 4.042                        | 3.373                      | 5181.377             | 6161.38                      | 9310.98              | 1095 |
| 19          | 2256.61               | 878.4                     | 4.042                        | 3.374                      | 5181.375             | 6154.37                      | 9296.64              | 1094 |
| 20          | 2252.83               | 873.601                   | 4.043                        | 3.374                      | 5174.334             | 6147.33                      | 9243.58              | 1093 |



# Разведочный анализ





## Выбросы

|    | F1        | F2            | F3    | F4    | F5            | F6        | F7        | RUL  |
|----|-----------|---------------|-------|-------|---------------|-----------|-----------|------|
| 10 | 3228.58   | 1135.349333   | 3.689 | 3.485 | 5033.075692   | 5969.89   | 5969.89   | 1101 |
| 11 | 6019.90   | 1058.279724   | 4.045 | 3.475 | 5053.842846   | 5980.77   | 5980.77   | 1100 |
| 12 | 6026.59   | 1049.487845   | 4.047 | 3.477 | 5046.429500   | 5966.82   | 5966.82   | 1099 |
| 13 | 6008.07   | 1065.372059   | 4.045 | 3.480 | 5033.075769   | 5954.47   | 5954.47   | 1098 |
| 14 | 423271.35 | 168773.265000 | 4.270 | 3.108 | 219923.996000 | 430028.84 | 430028.84 | 1097 |
| 15 | 2261.34   | 883.200000    | 4.038 | 3.901 | 1949.664000   | 2922.69   | 6070.11   | 1096 |
| 16 | 2259.46   | 883.199000    | 4.042 | 3.373 | 5181.377000   | 6161.38   | 9310.98   | 1095 |
| 17 | 2256.61   | 878.400000    | 4.042 | 3.374 | 5181.375000   | 6154.37   | 9296.64   | 1094 |
| 18 | 2252.83   | 873.601000    | 4.043 | 3.374 | 5174.334000   | 6147.33   | 9243.58   | 1093 |

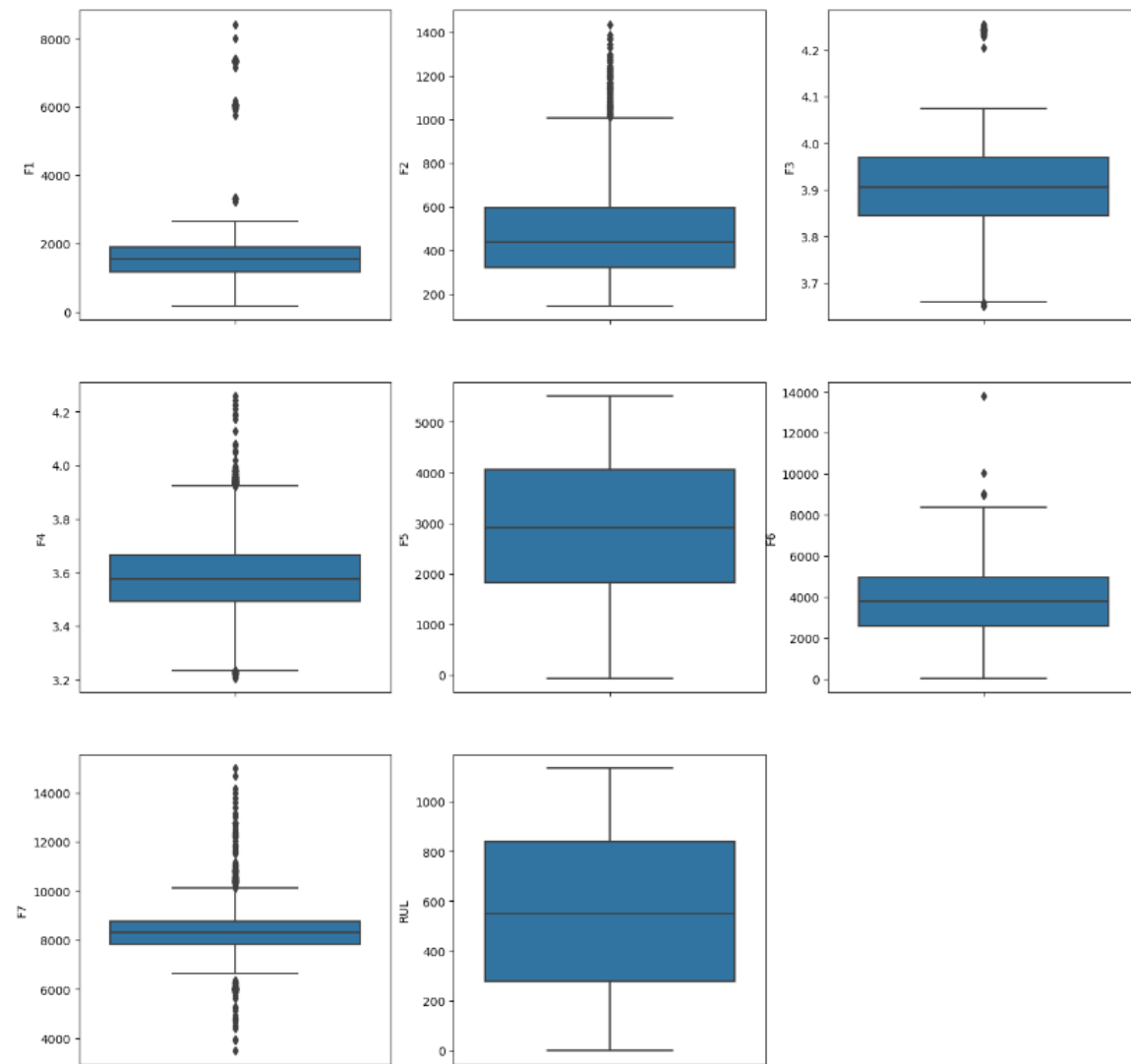
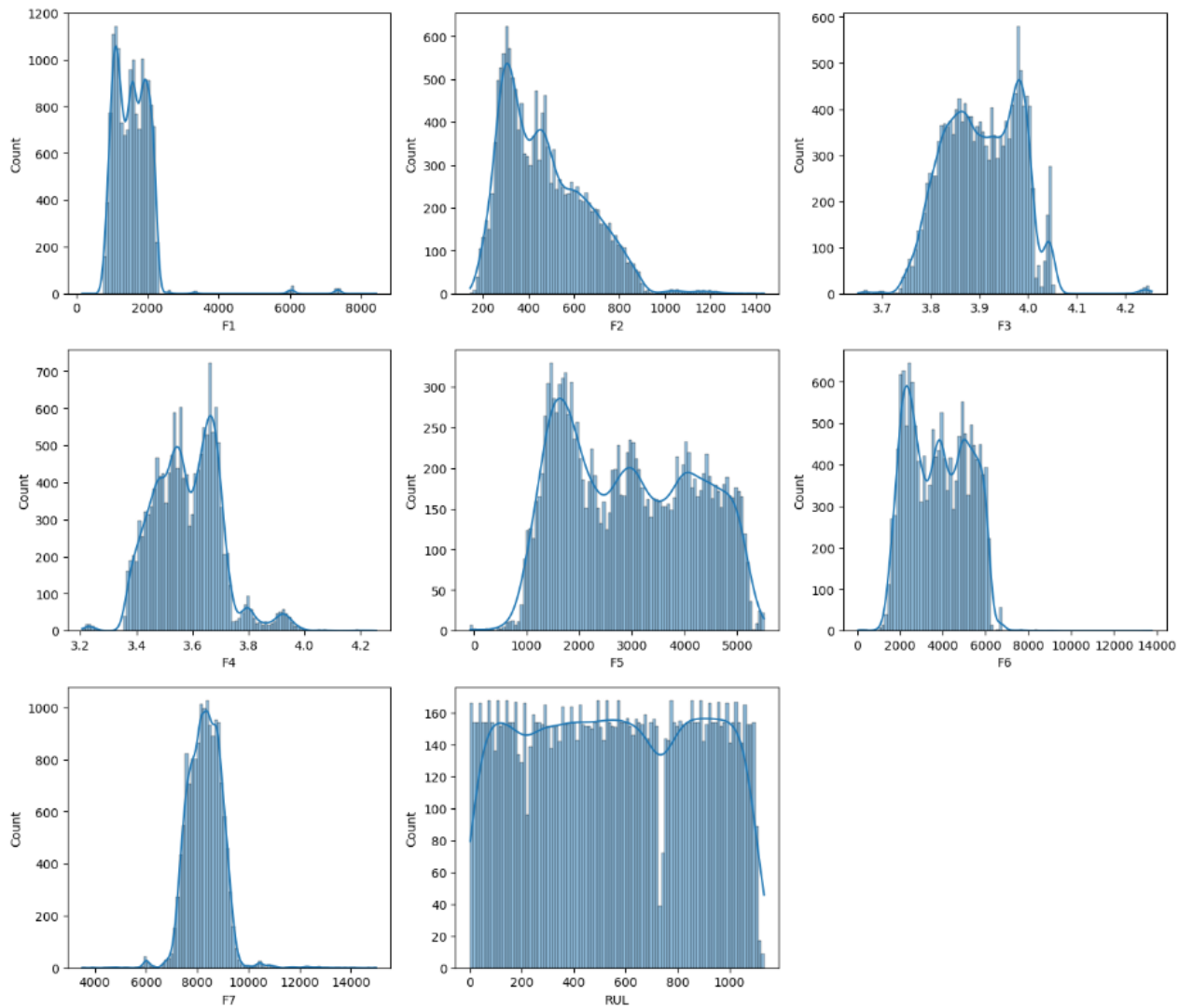
|       | F1      | F2         | F3    | F4    | F5          | F6      | F7      | RUL |
|-------|---------|------------|-------|-------|-------------|---------|---------|-----|
| 11822 | 1017.06 | 273.371429 | 3.800 | 3.674 | 1457.375000 | 2096.38 | 7823.50 | 41  |
| 11823 | 1014.88 | 273.500000 | 3.800 | 3.673 | 1452.875000 | 2096.38 | 7793.94 | 40  |
| 11824 | 1008.00 | 272.457143 | 3.800 | 3.675 | 1448.375000 | 2060.38 | 7795.12 | 39  |
| 11825 | 1012.25 | 271.542857 | 3.799 | 3.676 | 1443.875000 | 2060.38 | 7792.44 | 38  |
| 11826 | 32.38   | 42.105263  | 3.114 | 3.674 | 114.250000  | 8.00    | 8.00    | 37  |
| 11827 | 1014.69 | 271.600000 | 3.799 | 3.671 | 1529.375000 | 2168.38 | 7963.75 | 36  |
| 11828 | 1014.62 | 271.657143 | 3.799 | 3.673 | 1448.375000 | 2060.38 | 7863.06 | 35  |
| 11829 | 1009.75 | 269.828571 | 3.799 | 3.673 | 1443.875000 | 2060.38 | 7856.69 | 34  |
| 11830 | 1007.00 | 268.914286 | 3.798 | 3.674 | 1432.884429 | 2060.31 | 7783.56 | 33  |

|      | F1        | F2         | F3    | F4    | F5        | F6       | F7       | RUL  |
|------|-----------|------------|-------|-------|-----------|----------|----------|------|
| 7603 | 2188.81   | 818.375    | 4.044 | 3.384 | 5002.813  | 5965.38  | 9136.38  | 1049 |
| 7604 | 2186.38   | 818.438    | 4.044 | 3.385 | 4999.313  | 5958.31  | 9101.31  | 1048 |
| 7605 | 2186.38   | 818.375    | 4.045 | 3.385 | 4992.375  | 5958.38  | 9136.38  | 1047 |
| 7606 | 2184.00   | 806.375    | 4.026 | 3.705 | 4956.000  | 5922.00  | 9142.00  | 1046 |
| 7607 | 207013.99 | -98271.841 | 4.272 | 3.159 | 73349.980 | 85080.00 | 85080.00 | 1045 |
| 7608 | 11755.36  | 807.000    | 4.005 | 3.380 | 5250.080  | 6200.48  | 9556.67  | 1044 |
| 7609 | 2184.00   | 814.400    | 4.008 | 3.389 | 5012.353  | 5948.35  | 9188.35  | 1043 |
| 7610 | 2183.74   | 816.000    | 4.009 | 3.388 | 5012.318  | 5948.32  | 9188.32  | 1042 |
| 7611 | 2172.00   | 816.000    | 4.009 | 3.389 | 5005.152  | 5948.35  | 9192.90  | 1041 |

Подобные выбросы невозможно интерпретировать как корректные результаты измерений, поэтому перед нами либо ошибки измерений, либо ошибки обработки. Данные выбросы необходимо удалить.



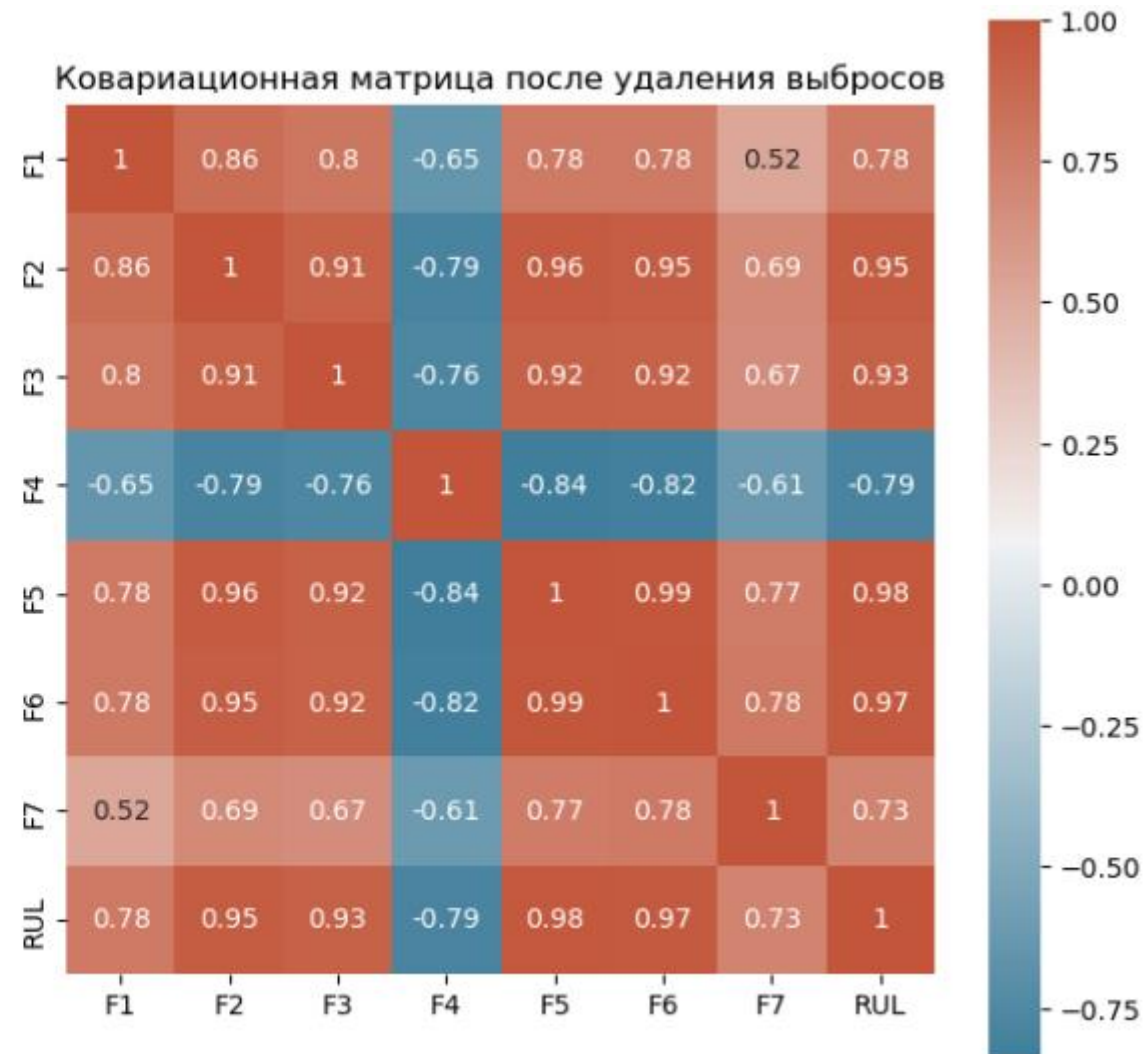
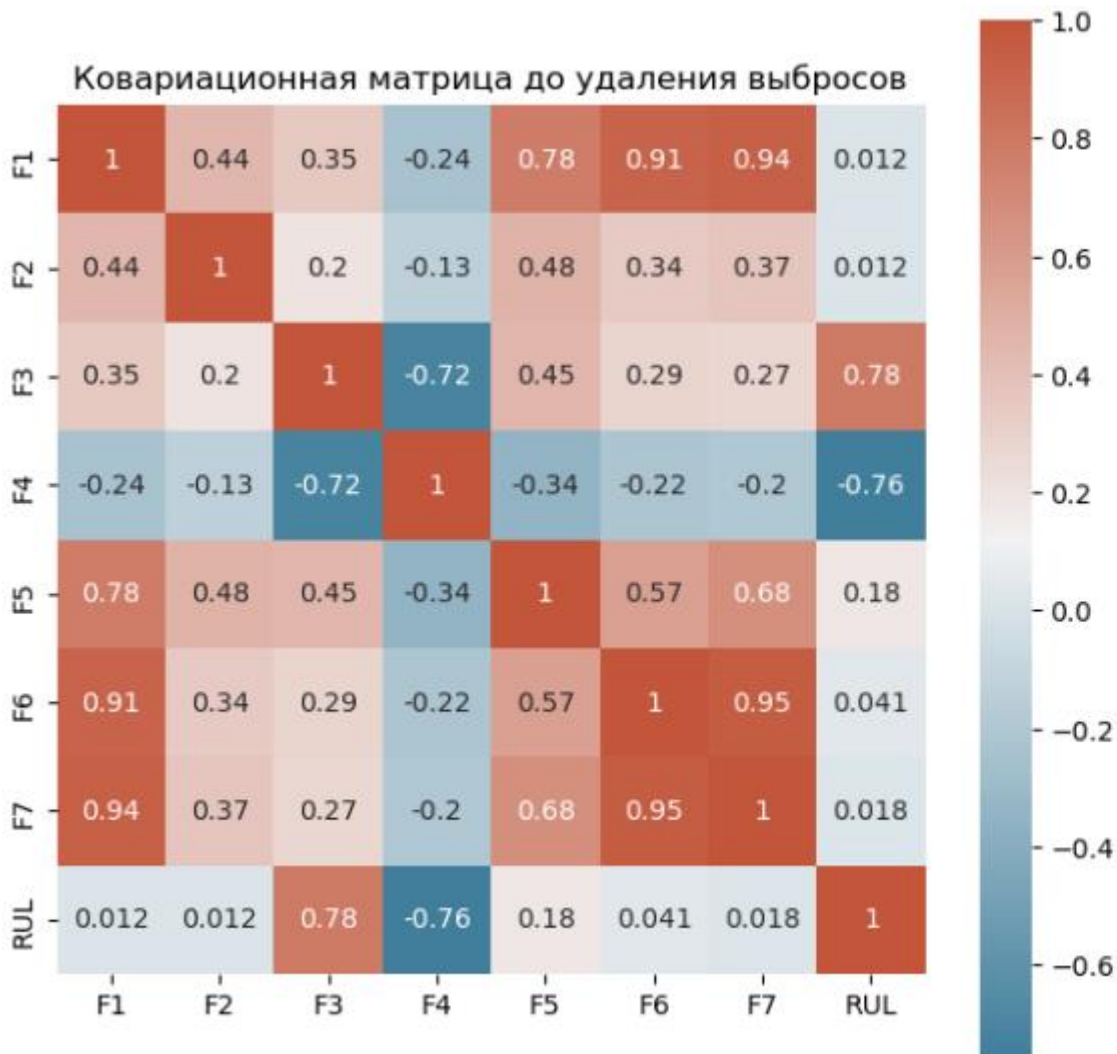
# После удаления выбросов







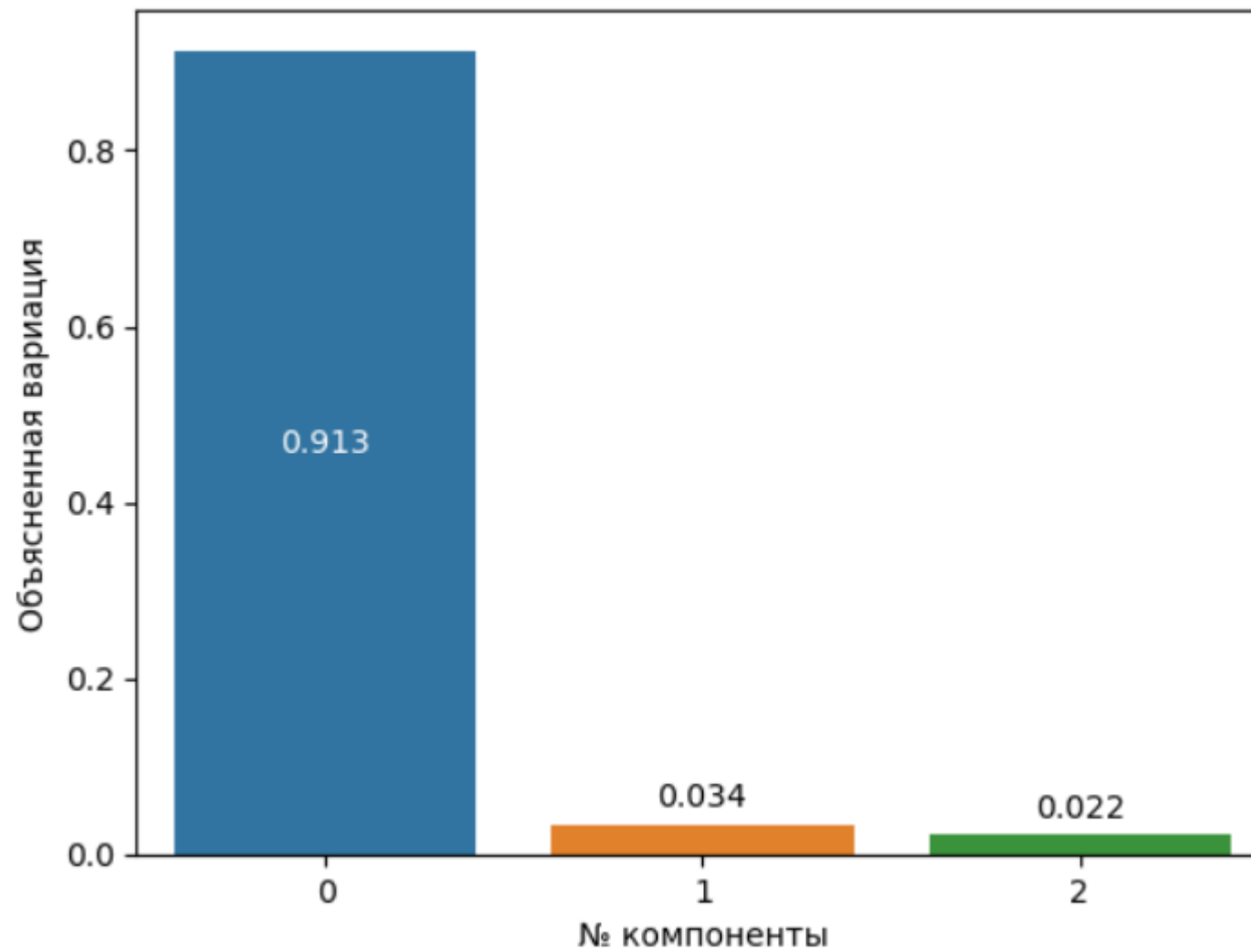
# Ковариационные матрицы







# Метод главных компонент





# Регрессоры, метрики и методика

## Используемые регрессоры

### Scikit-learn

- Линейная регрессия
- Ridge ( $L_2$  – регуляризация, или регуляризация Тихонова)
- Полиномиальная регрессия
- Метод  $k$ -ближайших соседей
- RandomForest
- Градиентный бустинг

### TensorFlow

- Полносвязная нейронная сеть

## Используемые метрики

### Коэффициент детерминации ( $R^2$ )

- Лучший в тесте
- Лучший на 1 признаке
- Лучший на 2 признаках
- Лучший на 3 признаках

### Средняя абсолютная ошибка (MAE)

- MAE, соответствующая каждому из вышеприведенных  $R^2$

## Методика

Для каждого регрессора и каждого  $n \in [1, 7]$  проводится поиск  $n$  признаков, оптимальных по критерию  $R^2$  из всех наборов из  $n$  признаков. На данных оптимальных наборах проводится кросс-валидация и по ее результатам – усреднение  $R^2$  и MAE.

Из полученных таким образом наборов  $\{R^2_n\}$ ,  $\{MAE_n\}$ ,  $n \in [1, 7]$ , выбираются  $\max \{R^2_n\}$  и  $\min \{MAE_n\}$  в качестве лучших в тесте.

Для ансамблевых методов и kNN дополнительно проводится подбор гиперпараметров.



# Пример проведения регрессии

## Метод k-ближайших соседей

kNN с количеством соседей от 2 до 6:

```
In [40]: kNN1 = apply_regressor(KNeighborsRegressor(n_neighbors=2), df_X, dfc.RUL)
```

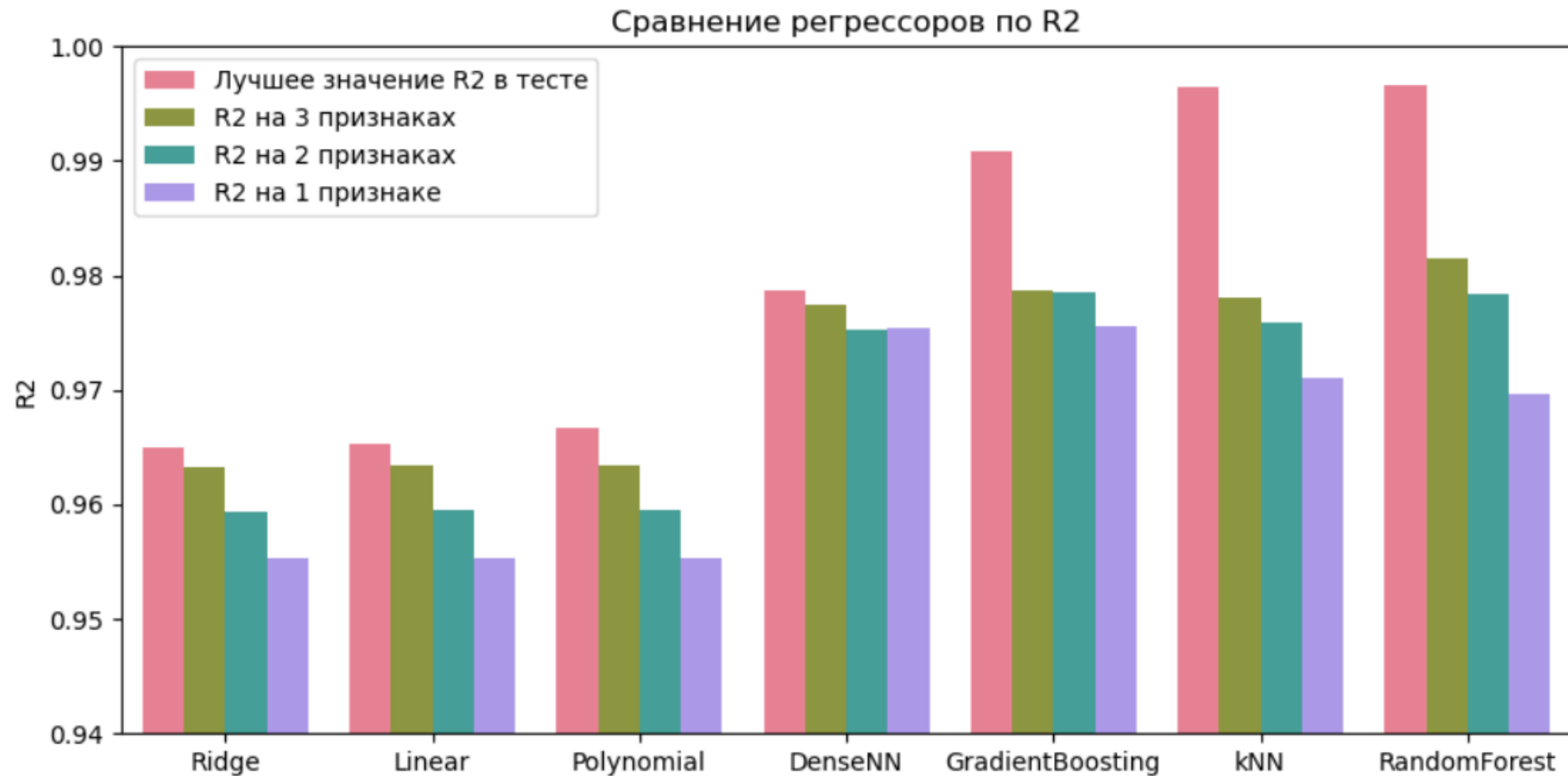
| R2     | RMSE  | MAE   | best features |
|--------|-------|-------|---------------|
| -----  |       |       |               |
| 0.9679 | 57.65 | 40.09 | [1]           |
| 0.9729 | 52.92 | 35.23 | [1 6]         |
| 0.9761 | 49.69 | 32.82 | [1 5 6]       |
| 0.9862 | 37.75 | 20.74 | [1 4 5 6]     |
| 0.9925 | 27.80 | 12.36 | [1 2 4 5 6]   |
| 0.9950 | 22.66 | 8.03  | [1 2 3 4 5 6] |
| 0.9963 | 19.46 | 6.11  | [ALL]         |

```
In [41]: kNN2 = apply_regressor(KNeighborsRegressor(n_neighbors=3), df_X, dfc.RUL)
```

| R2     | RMSE  | MAE   | best features |
|--------|-------|-------|---------------|
| -----  |       |       |               |
| 0.9711 | 54.65 | 38.35 | [1]           |
| 0.9759 | 49.95 | 33.74 | [1 6]         |
| 0.9781 | 47.60 | 32.26 | [1 5 6]       |
| 0.9866 | 37.16 | 21.78 | [1 4 5 6]     |
| 0.9926 | 27.64 | 13.35 | [1 2 4 5 6]   |
| 0.9952 | 22.23 | 8.76  | [1 2 3 4 5 6] |
| 0.9965 | 19.10 | 6.59  | [ALL]         |

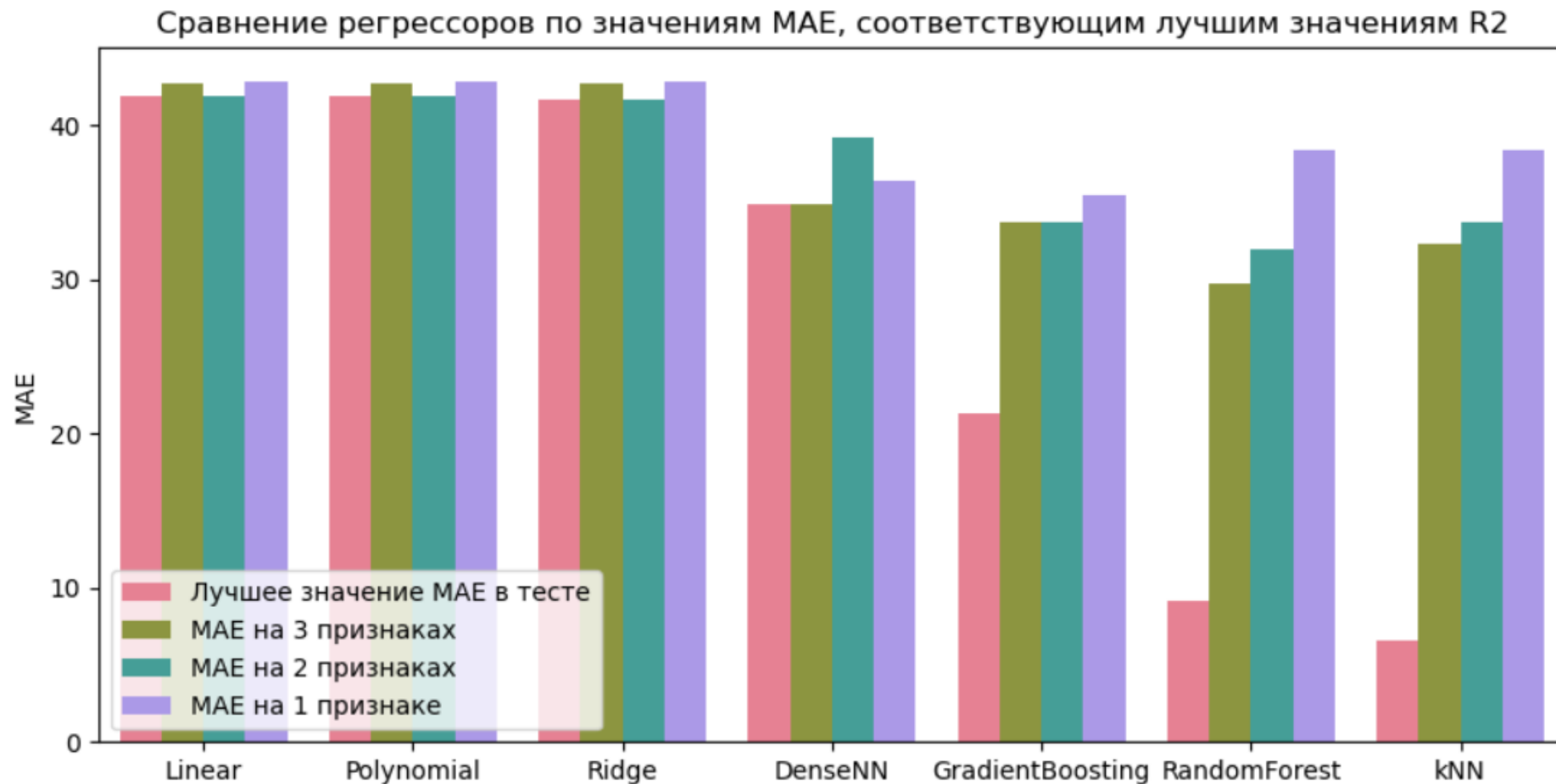


## Результаты: $R^2$





## Результаты: MAE





## Оптимальные наборы признаков

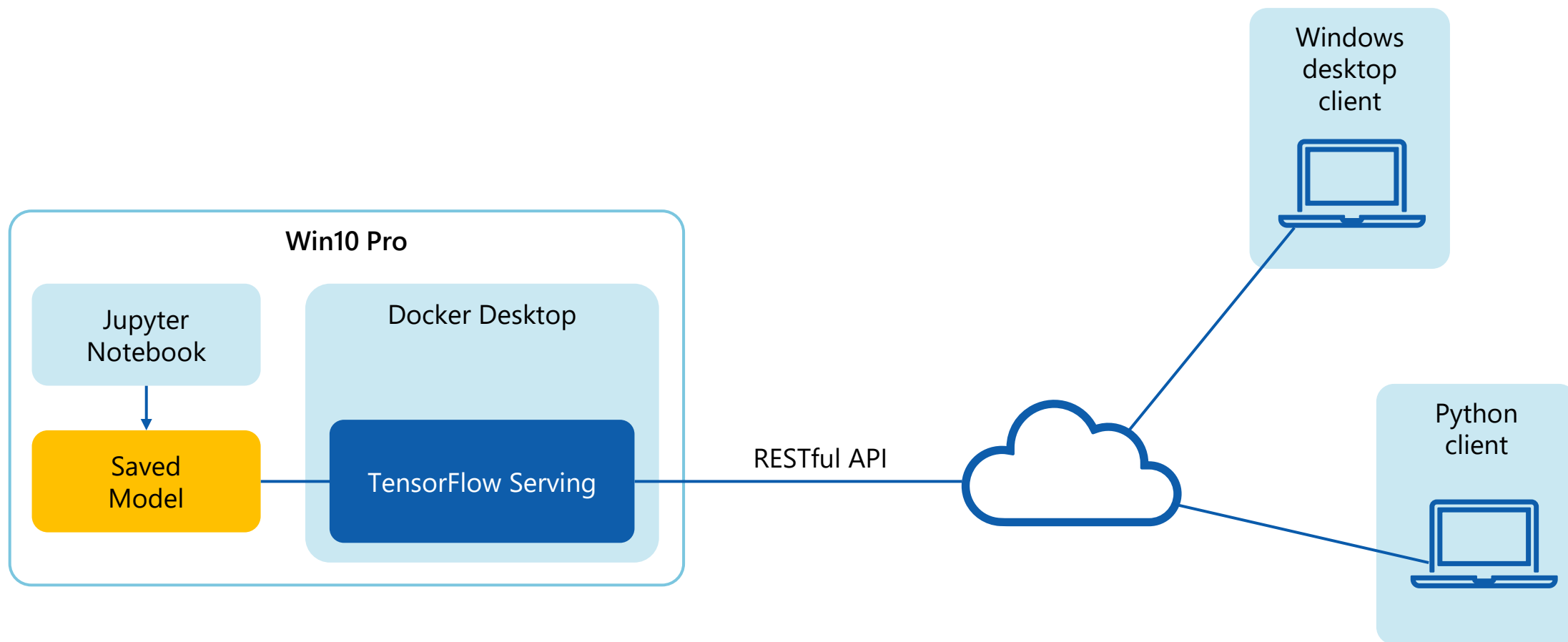
| Регрессор                    | Линейная регрессия   | Ridge  | Полиномиальная регрессия  |
|------------------------------|--|--|---|
| Оптимальные наборы признаков | [5]<br>[4 5]<br>[3 4 5]<br>[3 4 5 7]<br>[3 4 5 6 7]<br>[2 3 4 5 6 7] | [5]<br>[4 5]<br>[3 4 5]<br>[3 4 5 7]<br>[3 4 5 6 7]<br>[1 3 4 5 6 7] | [5]<br>[4 5]<br>[3 4 5]<br>[3 4 5 10]<br>[2 3 4 5 10]<br>[2 3 4 5 9 10]<br>[2 3 4 5 6 9 10]<br>[1 2 3 4 5 6 9 10]<br>[1 2 3 4 5 6 8 9 10] |

| Регрессор                    | RandomForest   | kNN  | Градиентный бустинг  |
|------------------------------|--|--|--|
| Оптимальные наборы признаков | [1]<br>[1 6]<br>[1 5 6]<br>[1 3 5 6]<br>[1 2 3 5 6]<br>[1 2 3 4 5 6] | [1]<br>[1 6]<br>[1 5 6]<br>[1 4 5 6]<br>[1 2 4 5 6]<br>[1 2 3 4 5 6] | [1]<br>[1 6]<br>[1 5 6]<br>[1 4 5 6]<br>[1 3 4 5 6]<br>[1 2 3 4 5 6] |





# Схема приложения





ЦЕНТР  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
МГТУ им. Н.Э. Баумана



[do.bmstu.ru](https://do.bmstu.ru)