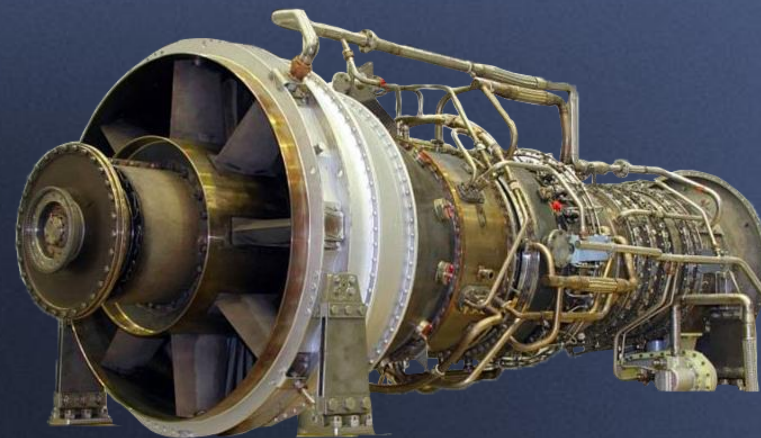


Опыт разработки цифрового двойника для анализа и прогнозирования технического состояния морского ГТД

Николаев С.М.
к.т.н., генеральный директор ООО «Сайберфизикс»



ПЛАН ДОКЛАДА

- △ Цели и задачи проекта
- △ Методика анализа и прогнозирования технического состояния морского ГТД на основе цифрового двойника
- △ Реализация методики в ПО мониторинга и прогнозирования технического состояния (ПО МПТС)
- △ Апробация ПО МПТС для МГТД М90ФР
- △ Направления совершенствования методики



ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОДХОДОВ К ТОИР

Ремонт в момент возникновения отказов

- Дефект может привести к серьезным потерям
- Дефект может быть не устранен вовремя
- Невозможно спланировать ресурсы на ТОиР

Запланированный ремонт

- Основывается на статистике дефектов
- Возможный перерасход ресурсов на ТОиР
- Неучет потенциальных отказов, не учтенной в статистике

Ремонт по фактическому состоянию

- Основывается на цифровом двойнике оборудования
- ТОиР производится там, где надо и тогда, когда надо за счет прогнозирования технического состояния
- Гибкое планирование ресурсов на ТОиР



 СНИЖЕНИЕ РАСХОДОВ НА ТОИР

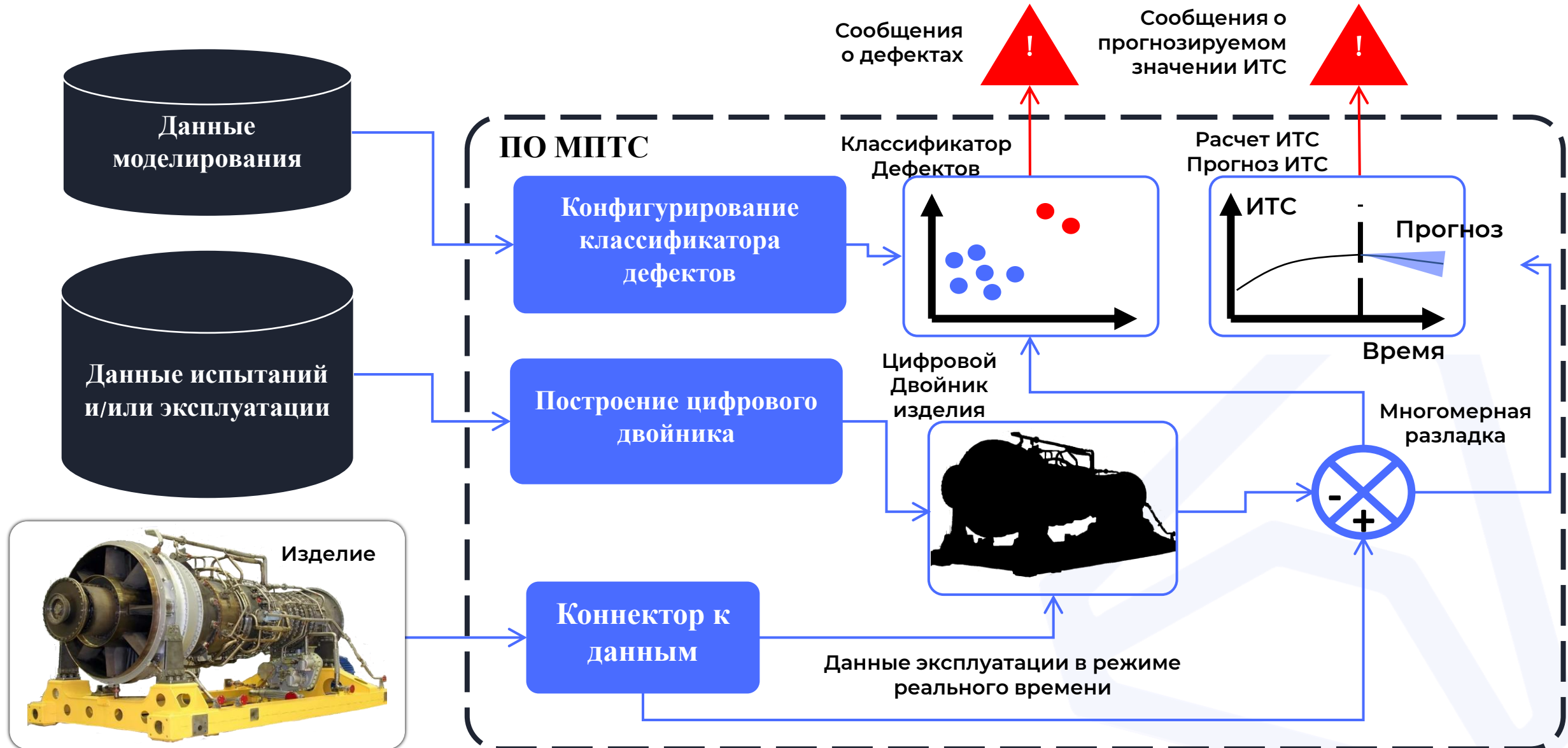
 СОКРАЩЕНИЕ ЧИСЛА ВНЕПЛАНОВЫХ ОСТАНОВОВ

ЗАДАЧИ:

- △ Разработать методику анализа и прогноза технического состояния МГТД на основе цифрового двойника
- △ Реализовать методику в виде прикладного ПО МПТС
- △ Провести апробацию ПО МПТС в части выявления дефектов отдельных подсистем МГТД М₉₀ФР
- △ Выработать рекомендации по увеличению эффективности диагностики МГТД по результатам апробации



АРХИТЕКТУРА ПО ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

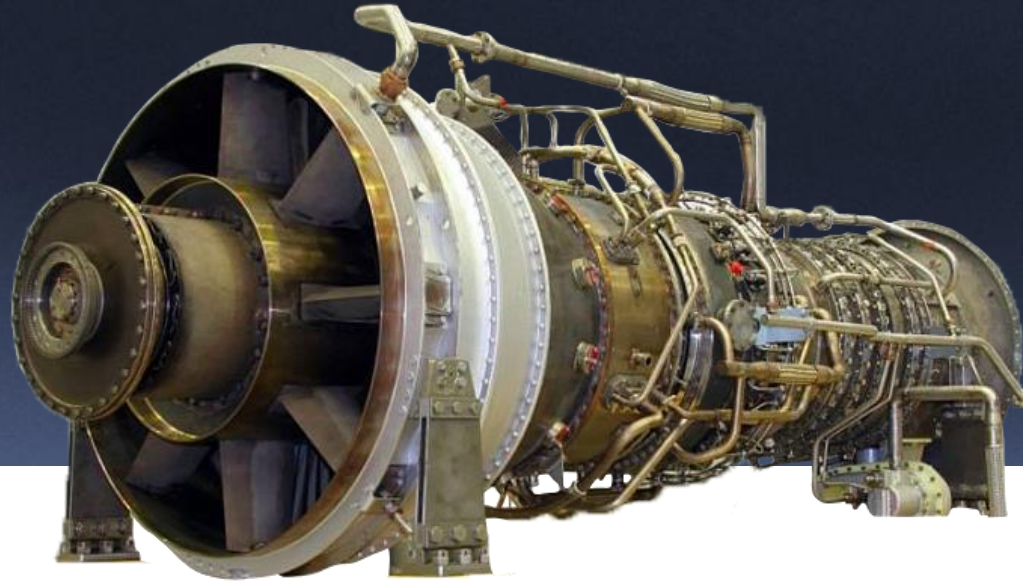


- △ **Создание элементов цифрового двойника систем МГТД**
 - Создание и уточнение моделей систем МГТД
 - Тестирование точности моделей систем МГТД

- △ **Конфигурация классификатора дефектов**
 - На основе фактических показателей дефектных состояний
 - На основе моделирования дефектных состояний

- △ **Мониторинг в режиме реального времени**
 - Сигнализирование о выявляемых дефектах
 - Расчет и прогноз Индекса технического состояния (ИТС)

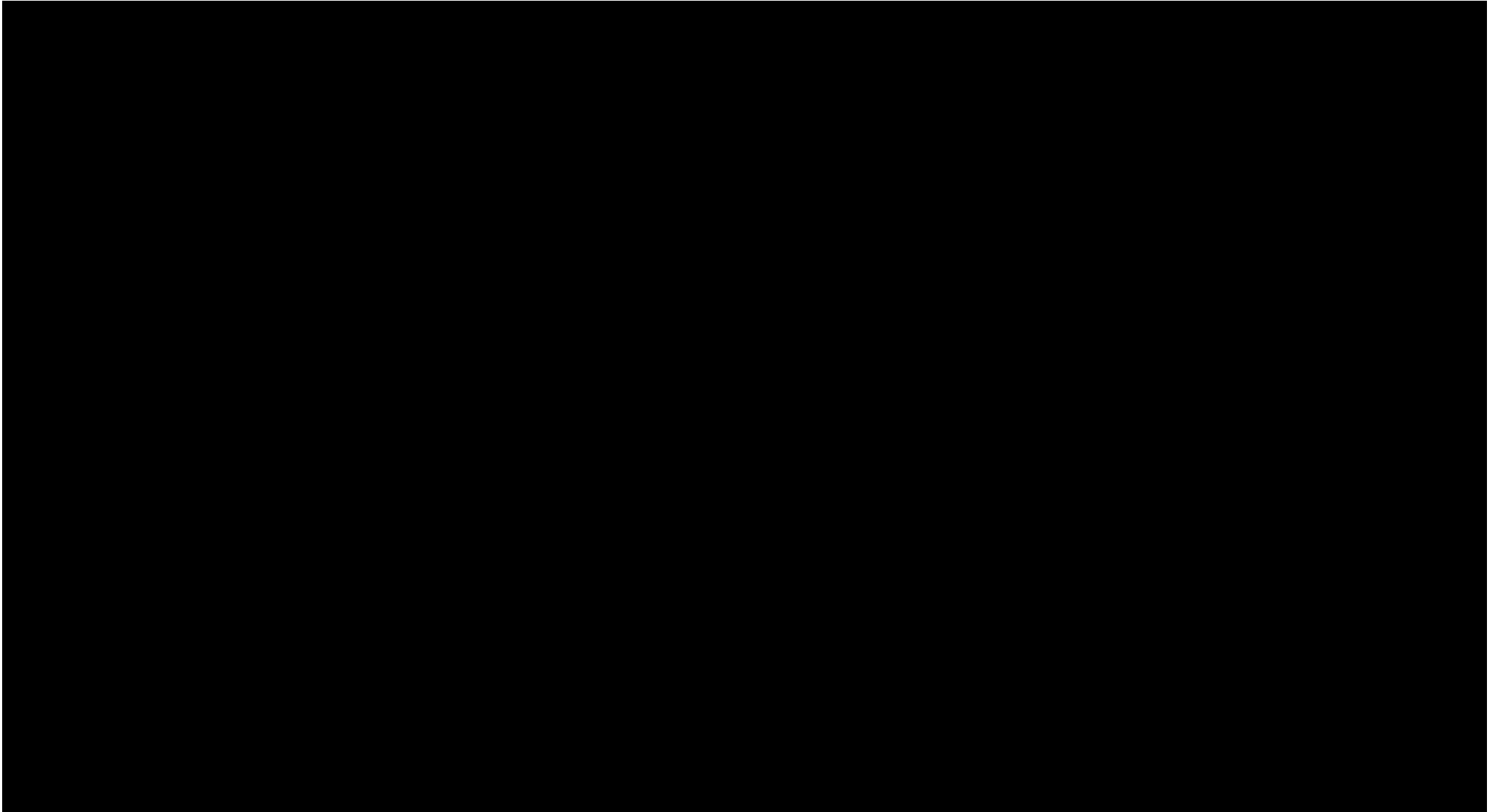
ПРИМЕР – ДВИГАТЕЛЬ М90ФР



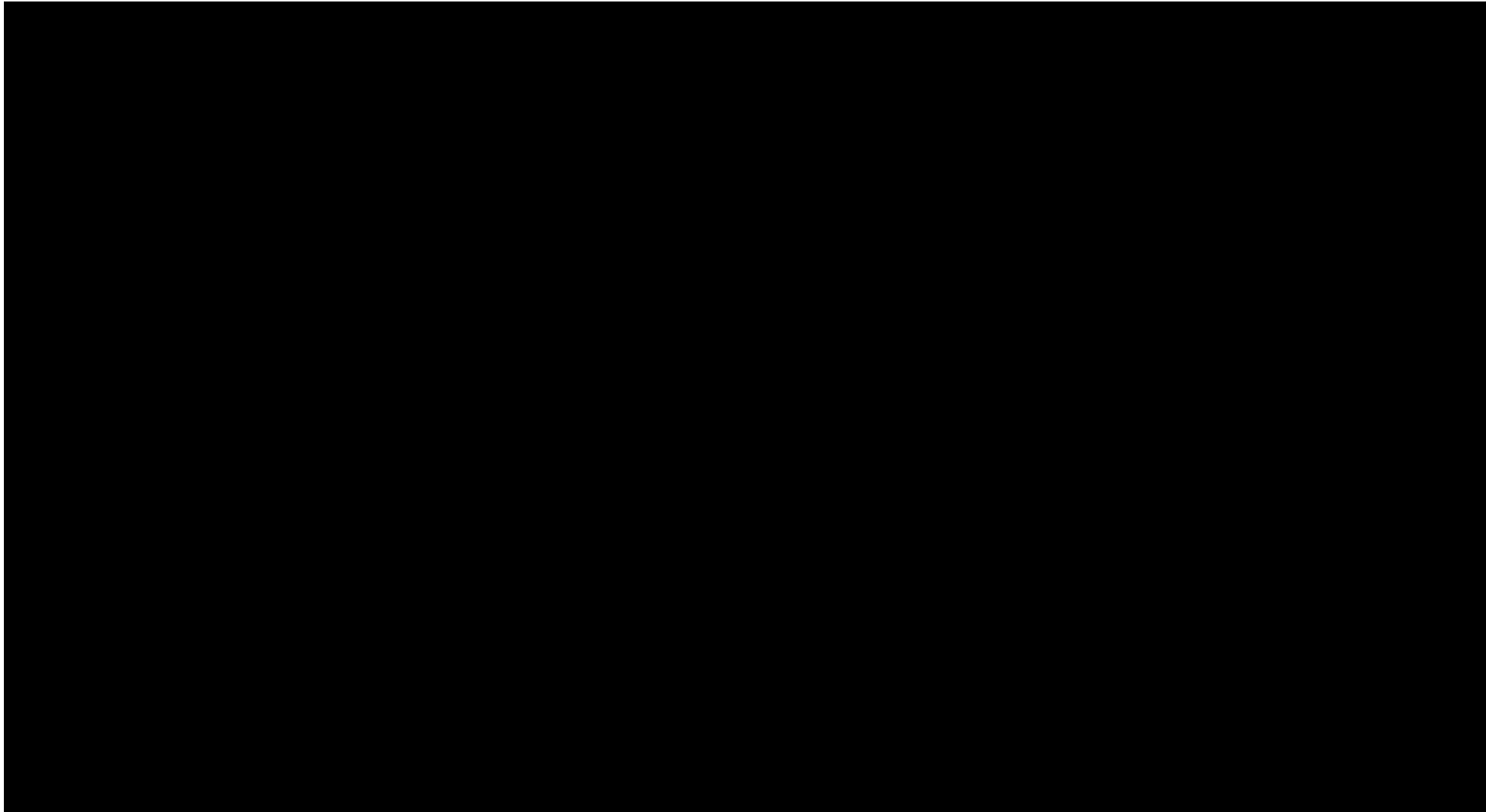
- Система газоздушного тракта: ЦД на основе **гибридной физико-математической** модели
- Система смазки подшипников
- Система подачи топлива

} **Нейросетевые
модели**

МОНИТОРИНГ ПО МПТС



МОНИТОРИНГ (НАЛИЧИЕ ДЕФЕКТОВ В СИСТЕМЕ)



СОЗДАНИЕ КАРТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИ ГВТ

[На главную](#)

ДВИГАТЕЛЬ ▾

НАСТРОЙКА ▾

МОНИТОРИНГ ▾

ИСТОРИЯ ▾

Газовоздушный тракт

Топливная система

Масляная система

Вибрации

Температурная
неравномерность

СОЗДАНИЕ КАРТ

ОПТИМИЗАЦИЯ

ВЫБОР ПРИЗНАКА

РАСЧЕТ ПОДСИСТЕМЫ

lpc.csv

hpc.csv

lpt.csv

hpt.csv

wst.csv

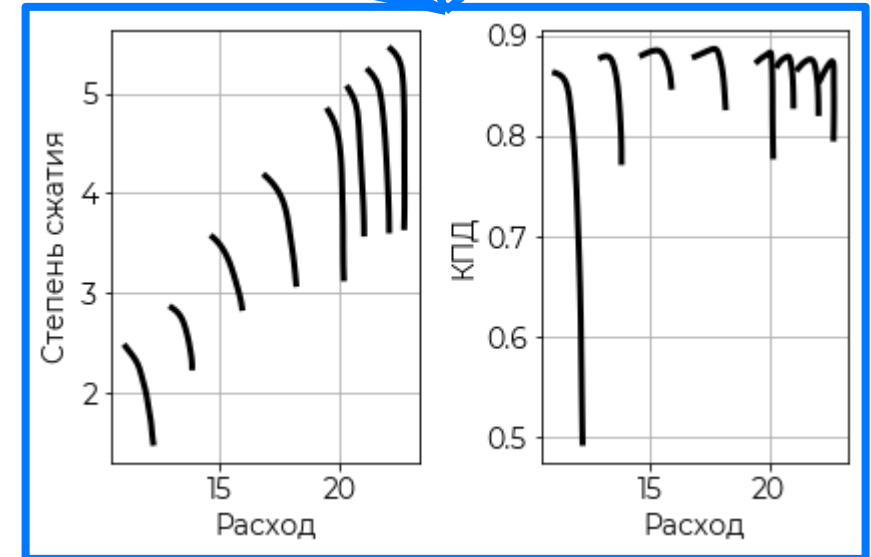
Скорость обучения
0.01

Размер минипакета
32

Число эпох обучения
30000

ПОСТРОИТЬ КАРТЫ

- Оцифровка характеристик узлов МГТД: КНД, КВД, СТ, ТВД, ТНД
- Аппроксимация при помощи нейросетевой модели



УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ГВТ

На главную

Газовоздушный тракт

Топливная система

Масляная система

Вибрации

Температурная
неравномерность

ДВИГАТЕЛЬ

НАСТРОЙКА

МОНИТОРИНГ

ИСТОРИЯ

СОЗДАНИЕ КАРТ

ОПТИМИЗАЦИЯ

ВЫБОР ПРИЗНАКА

РАСЧЕТ ПОДСИСТЕМЫ

Режим оптимизации

Параметры

Карты

ЦЕЛЕВЫЕ ДАННЫЕ

ОПТИМИЗИРОВАТЬ

Число эпох обучения

Скорость обучения

Штраф на разницу между параметрами

100

0.001

1e-7

Дообучать только последний слой

Тонкая настройка формы характеристик

par	min	max	current
lpc-leak	0	0,2	0,012
lpc-c_leak	0	1	0,1
lpc-a_mfr	0,8	1,2	1
lpc-a_kpd	0,8	1,2	1
lpc-a_PI	0,8	1,2	1

Выберите карту

Карта LPC

pi	n_c	mf_c	kpd	mf_c_res
1,035	2 000	14,475	0,314	14,233
1,082	2 000	14,027	0,651	14,055
1,114	2 000	13,47	0,769	13,719
1,139	2 000	12,903	0,826	13,113
1,156	2 000	12,313	0,843	12,434

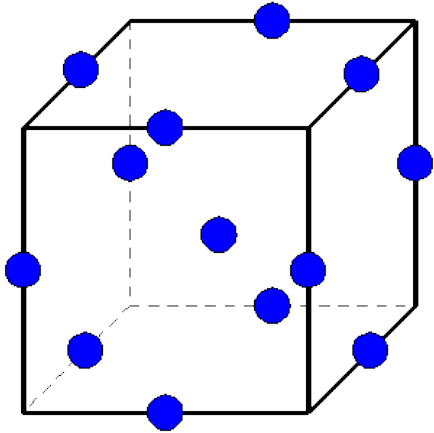
Архив данных работы ГВТ, который должна точно воспроизвести модель

Коэффициенты смещения расход-напорных характеристик и модельные константы



ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

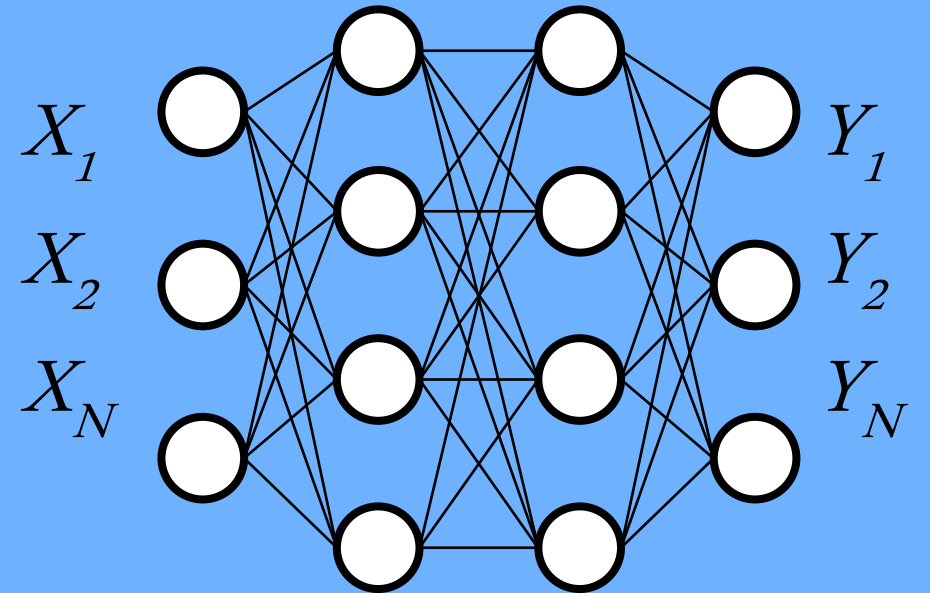
Планирование эксперимента (разные
рабочие режимы)



Данные моделирования



ПО МПТС



Нейросетевая
(суррогатная) модель



Модель изделия в САЕ системе



КОНФИГУРАЦИЯ СУРРОГАТНОЙ МОДЕЛИ

На главную

ДВИГАТЕЛЬ ▾ НАСТРОЙКА ▾ МОНИТОРИНГ ▾ ИСТОРИЯ ▾


Газовоздушный тракт
Топливная система
Масляная система
Вибрации
Температурная
неравномерность

ОБУЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ДООБУЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ВЫБОР ПРИЗНАКА РАСЧЕТ ПОДСИСТЕМЫ

Подбор параметров

☒ Автоматический

☐ Ручной

fuel_ini_withoutUnst_reduce... 

ОБУЧИТЬ

Параметры обучения

Тип модели

mlp_torch_parametric ▾

Число итераций autoML

30

Параметры модели

Разбиение данных

k_fold_split ▾

Параметр разбиения данных

3

Функция активации

relu ▾

Скорость обучения

0,01

Размер минипакета

512

Число слов

3

Число нейронов

8

Число эпох обучения

2000

Данные для обучения и тестирования суррогатной модели

Два типа нейросетевых моделей:

- Многослойный перцептрон
- Рекуррентная нейронная сеть

Параметры нейросетевой модели



УТОЧНЕНИЕ СУРРОГАТНОЙ МОДЕЛИ

[На главную](#)

ДВИГАТЕЛЬ ▾

НАСТРОЙКА ▾

МОНИТОРИНГ ▾

ИСТОРИЯ ▾

Газовоздушный тракт

Топливная система

Масляная система

Вибрации

Температурная
неравномерность

ОБУЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ

ДООБУЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ

ВЫБОР ПРИЗНАКА

РАСЧЕТ ПОДСИСТЕМЫ

Режим дообучения

asutp_all_newdat...

☐ Веса

☒ Параметры

ДООБУЧИТЬ

Скорость обучения

Число минипакетов

Число эпох обучения

0,01

128

500

☒ Дообучать только последний слой

par	min	max	current
k@constant	0,98	1	0,992
k@gain_5	0,8	1	0,9
k@gain_6	0,8	1	0,9
k@gain_7	0,8	1	0,9
k@constant_6	0,8	1	0,9
1–5 of 6 < >			



НАПОЛНЕНИЕ БАЗЫ КЛАССИФИКАТОРА ДЕФЕКТОВ

[На главную](#)

ДВИГАТЕЛЬ

НАСТРОЙКА

МОНИТОРИНГ

ИСТОРИЯ

Газовоздушный тракт

Топливная система

Масляная система

Вибрации

Температурная
неравномерность

СОЗДАНИЕ КАРТ

ОПТИМИЗАЦИЯ

ВЫБОР ПРИЗНАКА

РАСЧЕТ ПОДСИСТЕМЫ

Тип признака

☐ Внешний

☒ Синтетический

Выберите признак

flowpath_sign_hpc_leak

СОЗДАТЬ

УДАЛИТЬ ПРИЗНАК

Входы

	P_lpc_in	humidity	mfr_fuel	T_fuel	P_wst_out	n_wsr	W_wst	
	100 173,8	0,316	0,952	300	105 173,8	2 826,203	-395 020	
	99 108,3	0,542	0,937	300	104 108,3	2 802,647	-387 002	
	99 166,666	0,592	0,934	300	104 166,666	2 800,16	-385 719	
<input type="checkbox"/>	281,499	100 312,667	0,299	0,923	300	105 312,667	2 781,667	-381 505
<input type="checkbox"/>	286,257	99 882,8	0,308	1,168	300	104 882,8	3 100,093	-477 032

1-5 of 13

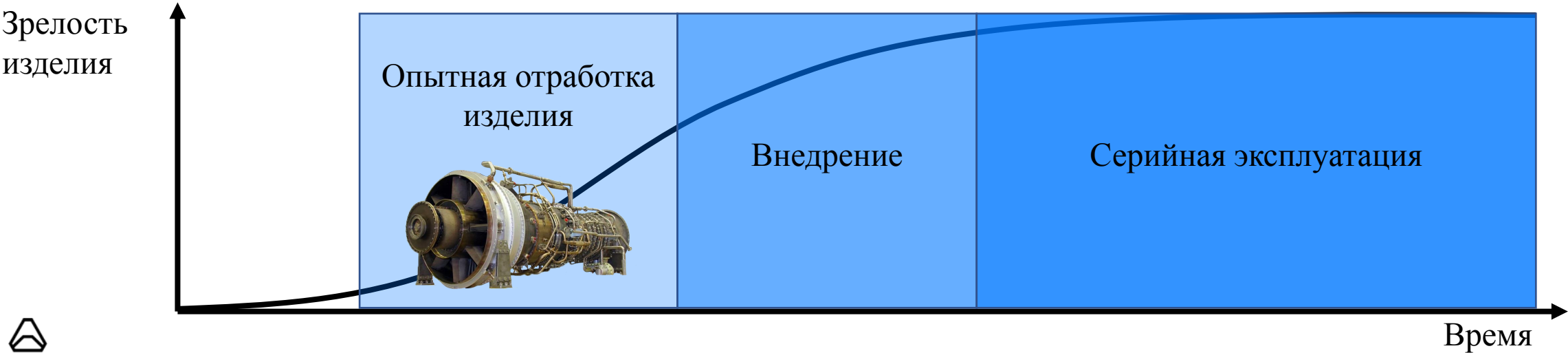
Параметры модели изделия с дефектом

Фактические показатели изделия с дефектом



НАПОЛНЕНИЕ КЛАССИФИКАТОРА ДЕФЕКТОВ

Зрелость изделия по ЖЦ	Способ наполнения классификатора дефектов			
	Моделирование	Данные испытаний	Данные эксплуатации	Экспертные правила
Новое изделие	+	+		
Изделие на внедрении		+	+	
Серийное изделие			+	+



ТЕСТИРОВАНИЕ НА ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На главную

Газовоздушный тракт

Топливная система

Масляная система

Вибрации

Температурная
неравномерность

ДВИГАТЕЛЬ ▾

НАСТРОЙКА ▾

МОНИТОРИНГ ▾

ИСТОРИЯ ▾

СОЗДАНИЕ КАРТ

ОПТИМИЗАЦИЯ

ВЫБОР ПРИЗНАКА

РАСЧЕТ ПОДСИСТЕМЫ

Источник данных

☒ csv

☐ База данных

ВЫЧИСЛИТЬ

ФАЙЛ С ДАННЫМИ

Задайте диапазон
от Выберите дату до Выберите дату

Параметр

Ошибка

Активен

n_hpr_by_n_lpr

0,046

☒

n_wsr_by_n_lpr

0,034

☒

n_wsr_by_n_hpr

0,007

☒

mfr_fuel_by_pi_k

0,023

☐

mfr_fuel_by_T_lpt

0,007

☐

8–12 of 12

<

>

Ретроспективные
данные тестирования

Выбор графиков



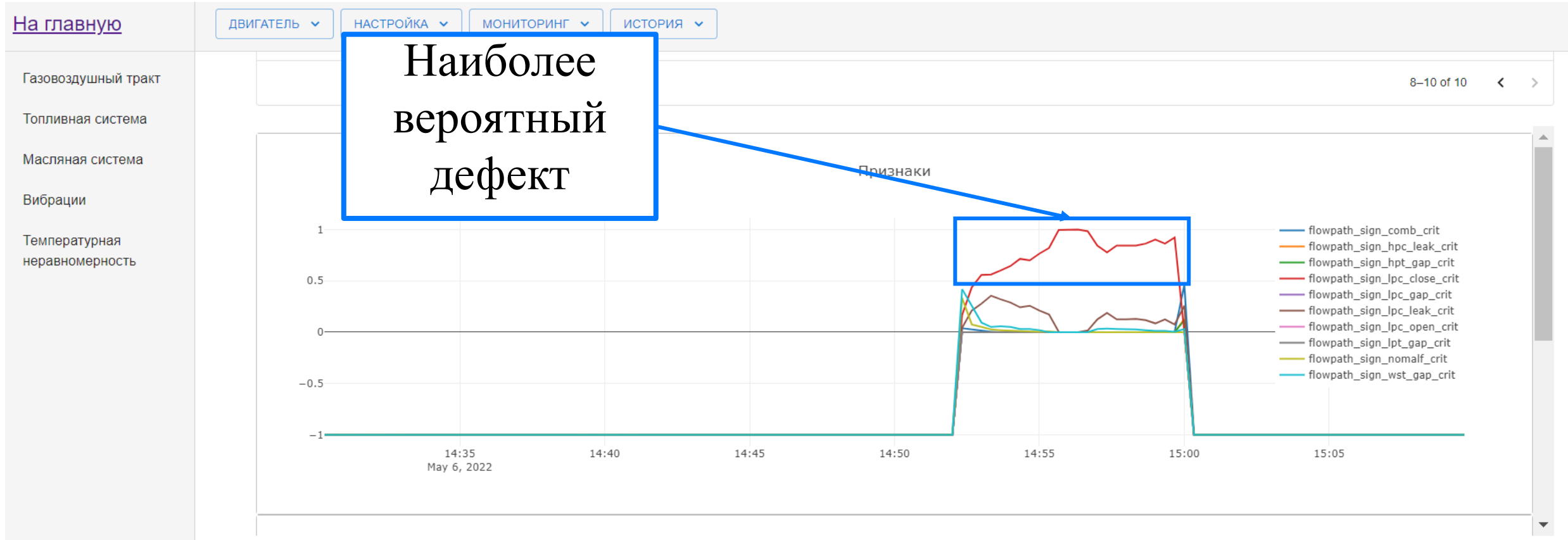
ГРАФИКИ «ДАТЧИК-МОДЕЛЬ» И ОТКЛОНЕНИЕ МОДЕЛИ



График «датчик и модель»

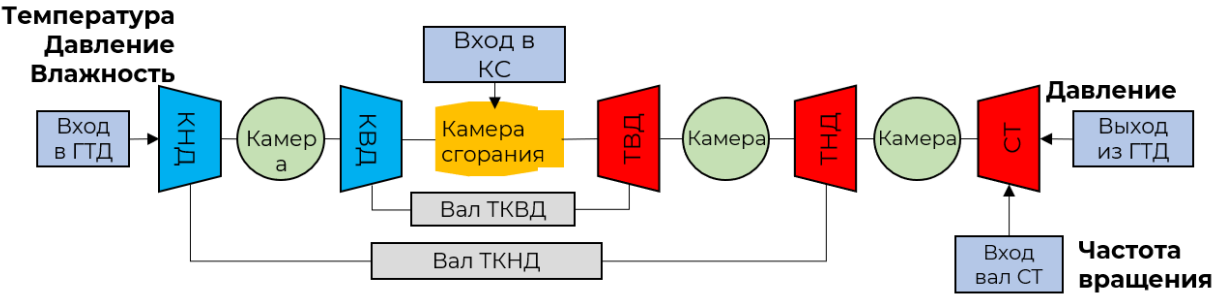
Отклонение модели

ТЕСТИРОВАНИЕ НА ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ



Апробация ПО в части:

- Система ГВТ
- Система смазки
- Топливная система



- Встроена в ПО МПТС
- Одномерная модель
- Узлы определены расход-напорными характеристиками и характеристиками КПД
- Характеристики прочих узлов – константы
- Моделирование дефектов

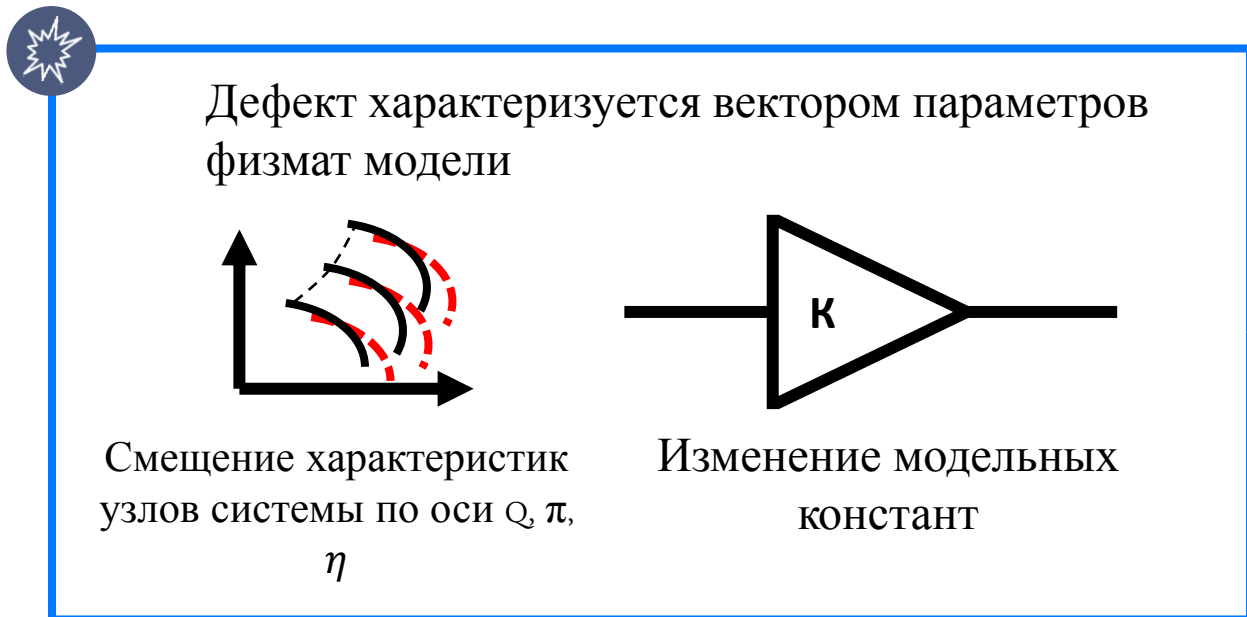


Архитектура модели

№ п/п	Наименование параметра	Тип параметра
1	Температура на входе в КНД	Вход
2	Давление на входе в КНД	Вход
3	Влажность на входе в КНД	Вход
4	Расход топлива	Вход
5	Частота вращения СТ	Вход
6	Давление за КВД	Выход
7	Температура за ТНД	Выход
8	Мощность СТ	Выход
9	Частота вращения ТКНД	Выход
10	Частота вращения ТКВД	Выход



МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ



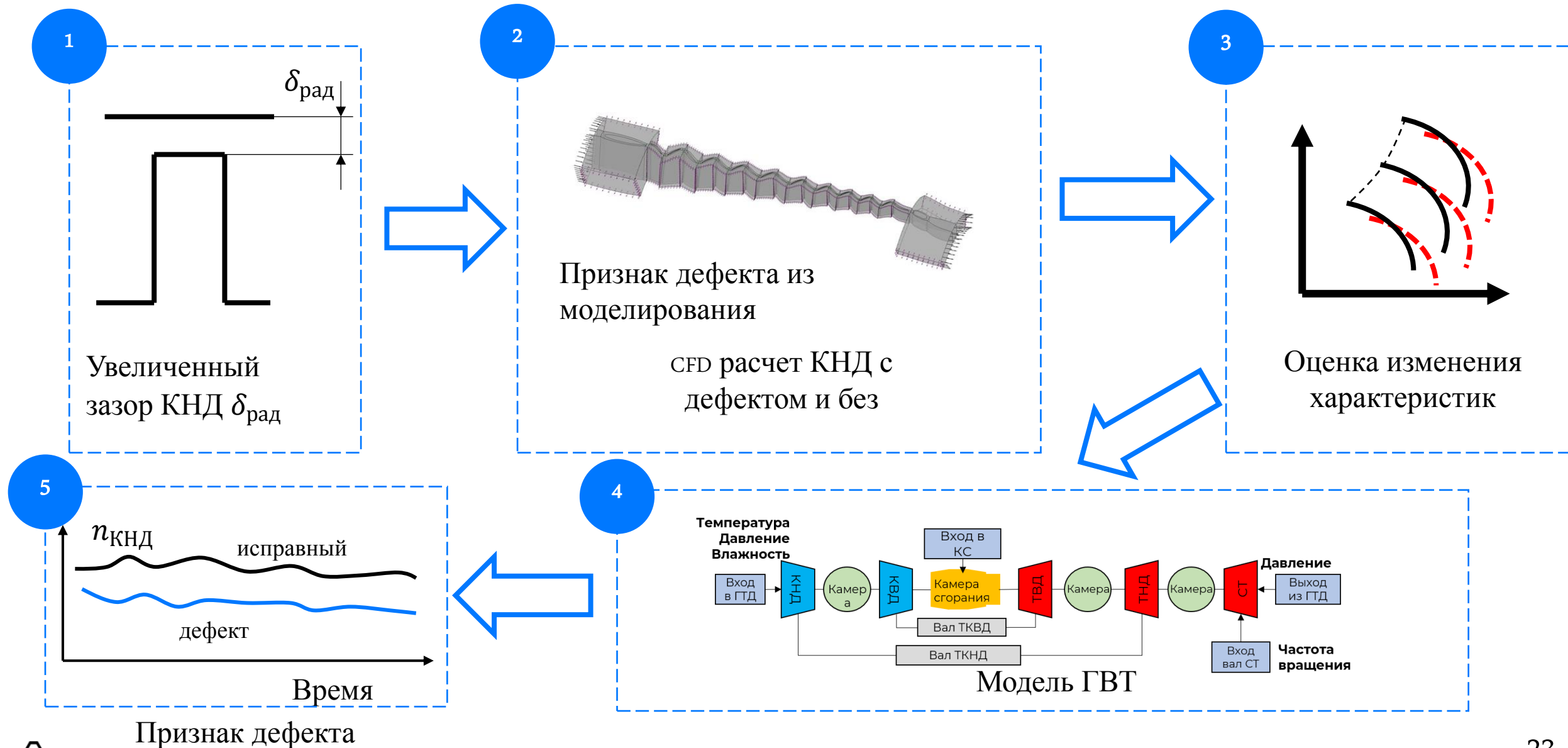
На основе моделирования в САЕ системах

- Пример: увеличенные зазоры КНД вследствие эрозийного износа
- Смещения характеристик определяются непосредственно по результатам расчета

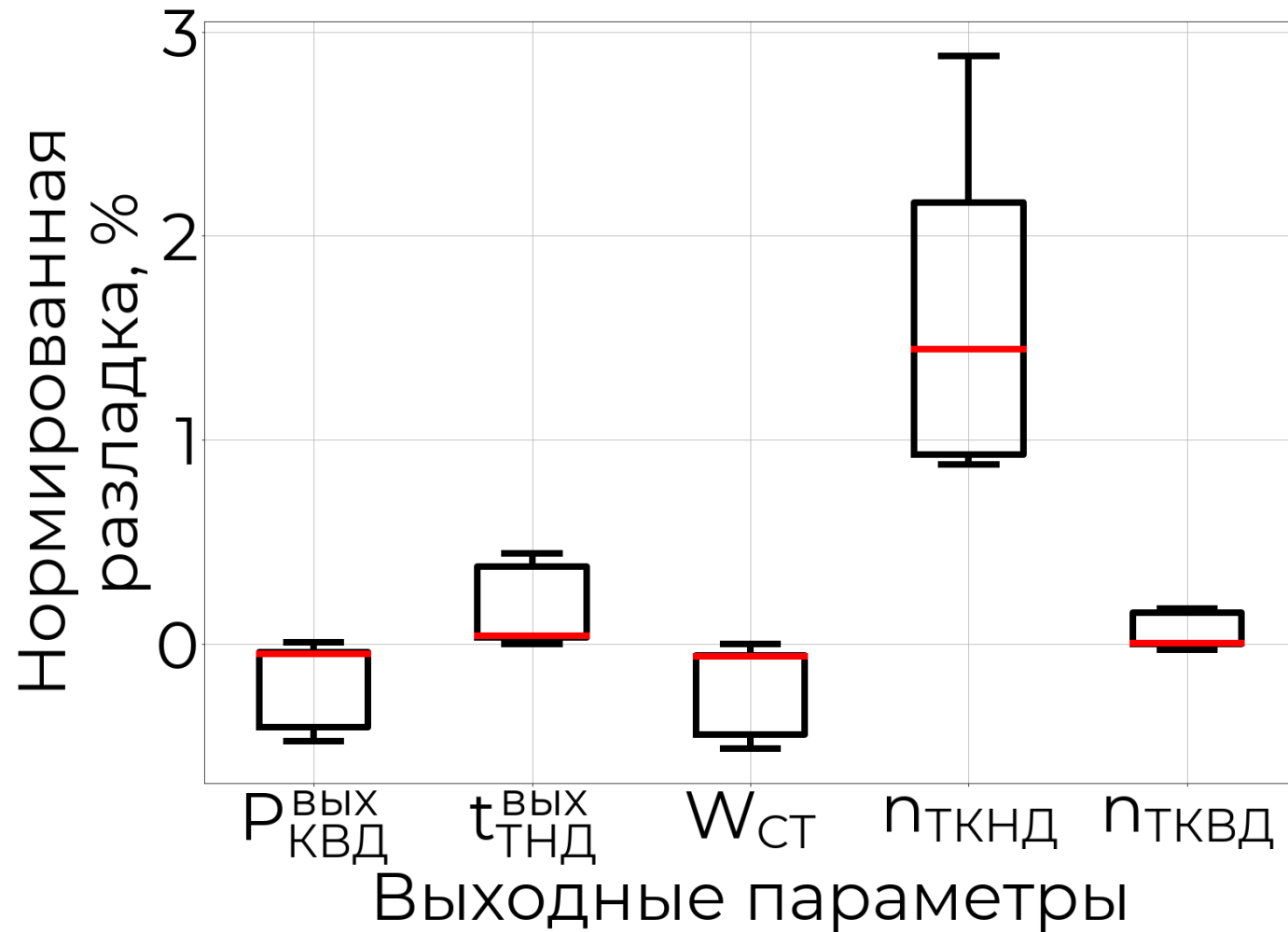
На основе ретроспективных данных испытаний, имитирующих дефектные состояния

- Пример: нештанный угол поворота ВНА
- Решается обратная задача: подобрать смещения характеристик

САЕ → ПРИЗНАК ДЕФЕКТА

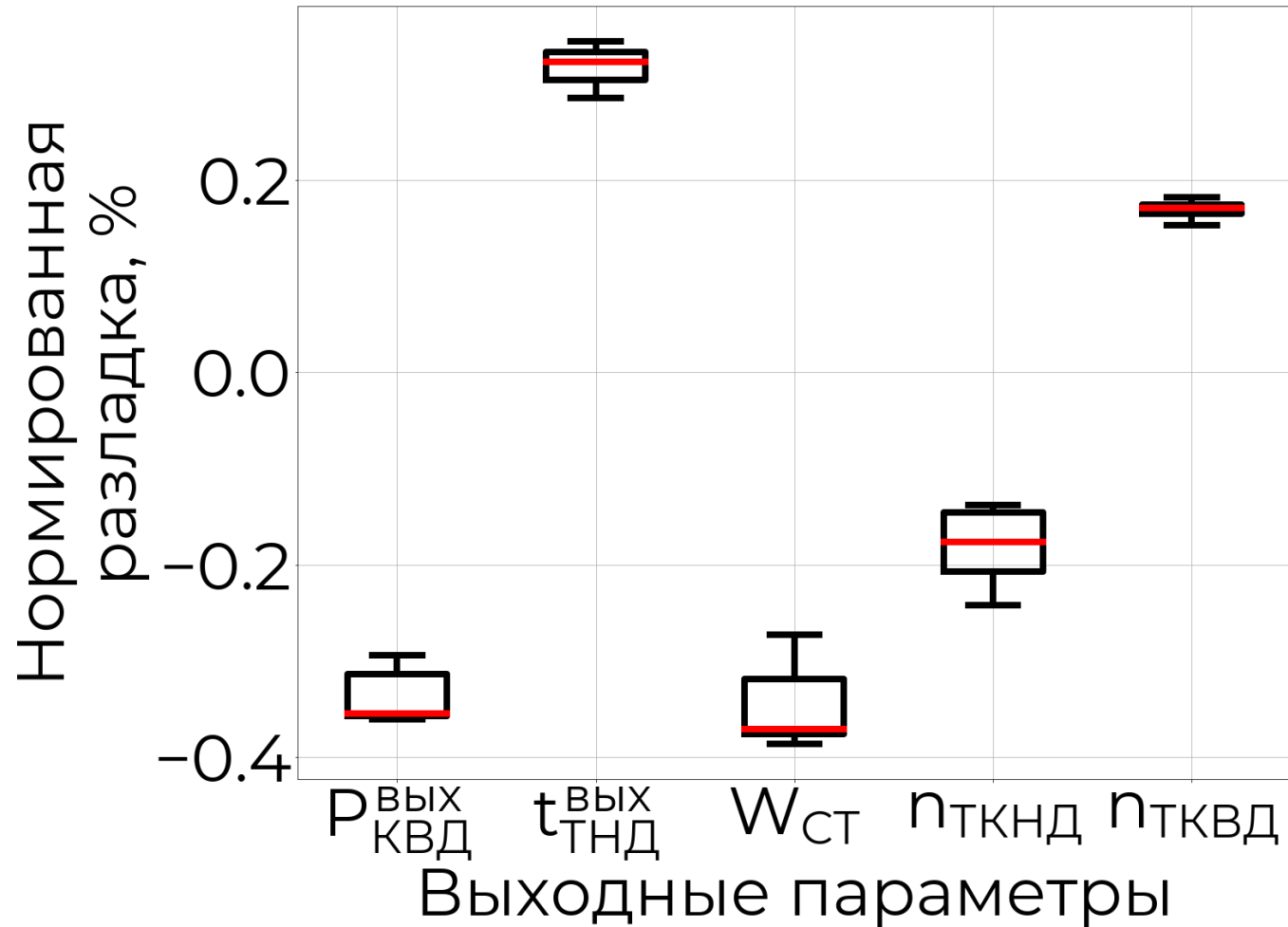


ПРЕДПОМПАЖНОЕ СОСТОЯНИЕ (ИМИТАЦИЯ ЧЕРЕЗ УГОЛ ВНА -5 ГРАДУСОВ)



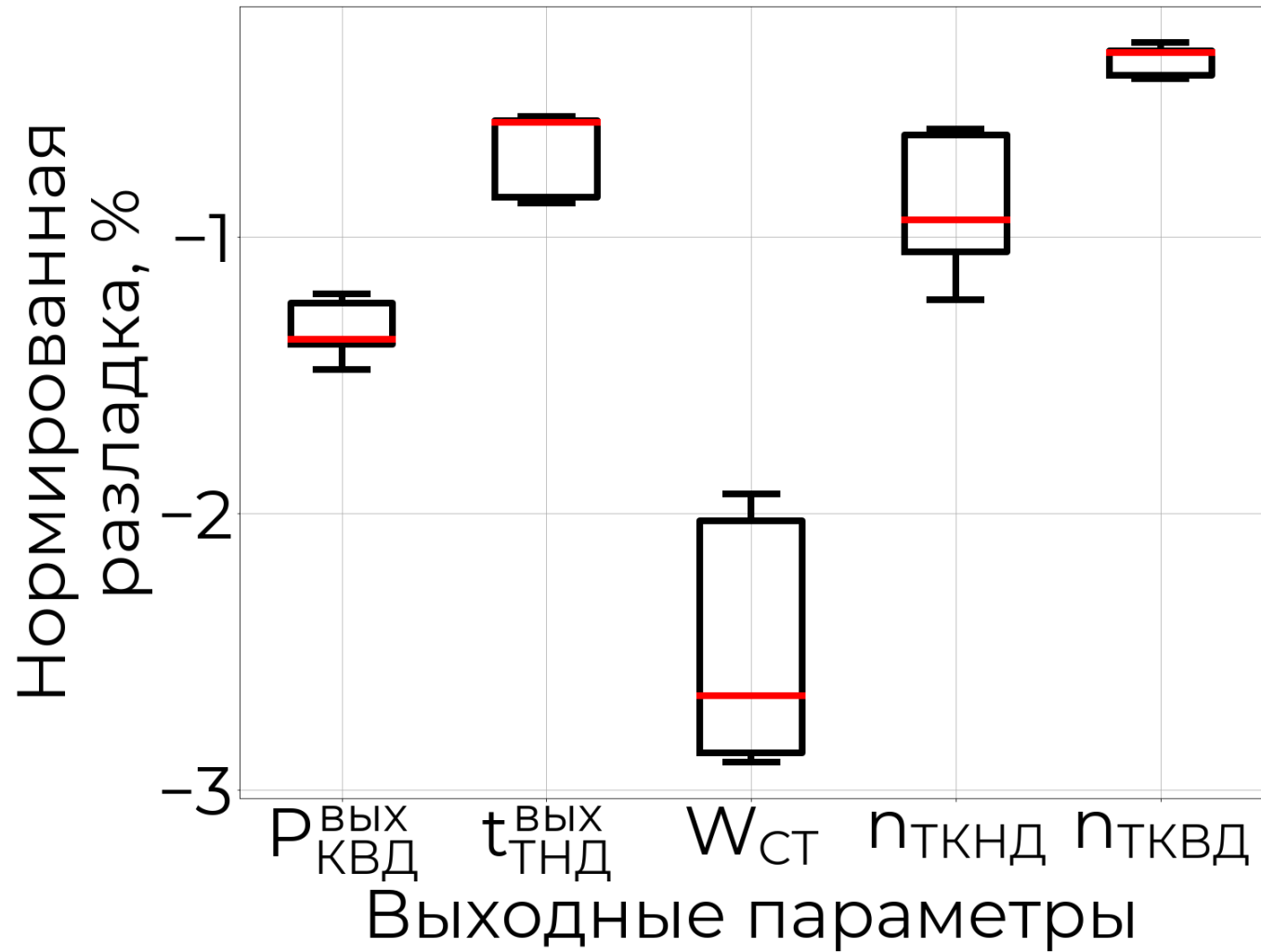
- Тяжелый дефект
- Разная выявляемость в диапазоне мощности

УВЕЛИЧЕННЫЙ РАДИАЛЬНЫЙ ЗАЗОР КНД (+0,3 ММ)



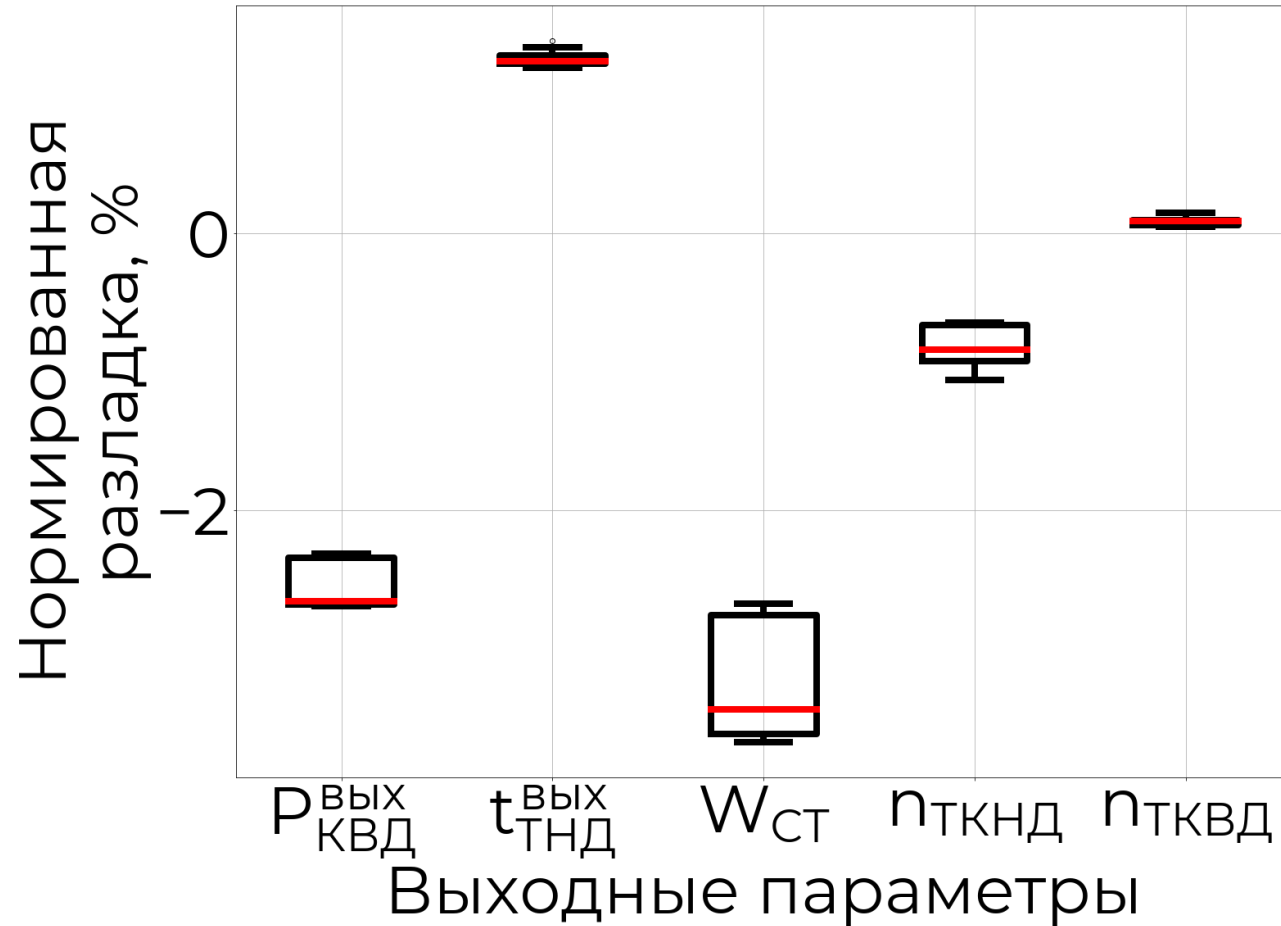
- Слабое проявление
- Тяжело устранить
- Постепенное развитие
- Разная выявляемость в диапазоне мощности

СНИЖЕНИЕ КПД КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА 2%



- Четкий признак
- Тяжело устранить
- Постепенное развитие
- Разная выявляемость в диапазоне мощности

УТЕЧКА В КВД



- **Четкий** признак
- Средне тяжело устранить
- Тяжело локализовать
- Разная выявляемость в диапазоне мощности

Апробация ПО в части:

- Система ГВТ
- Система смазки
- Топливная система

СИСТЕМА СМАЗКИ

- Модель течения масла и теплообмена с подшипниками
- Одномерная модель
- Моделирование дефектов

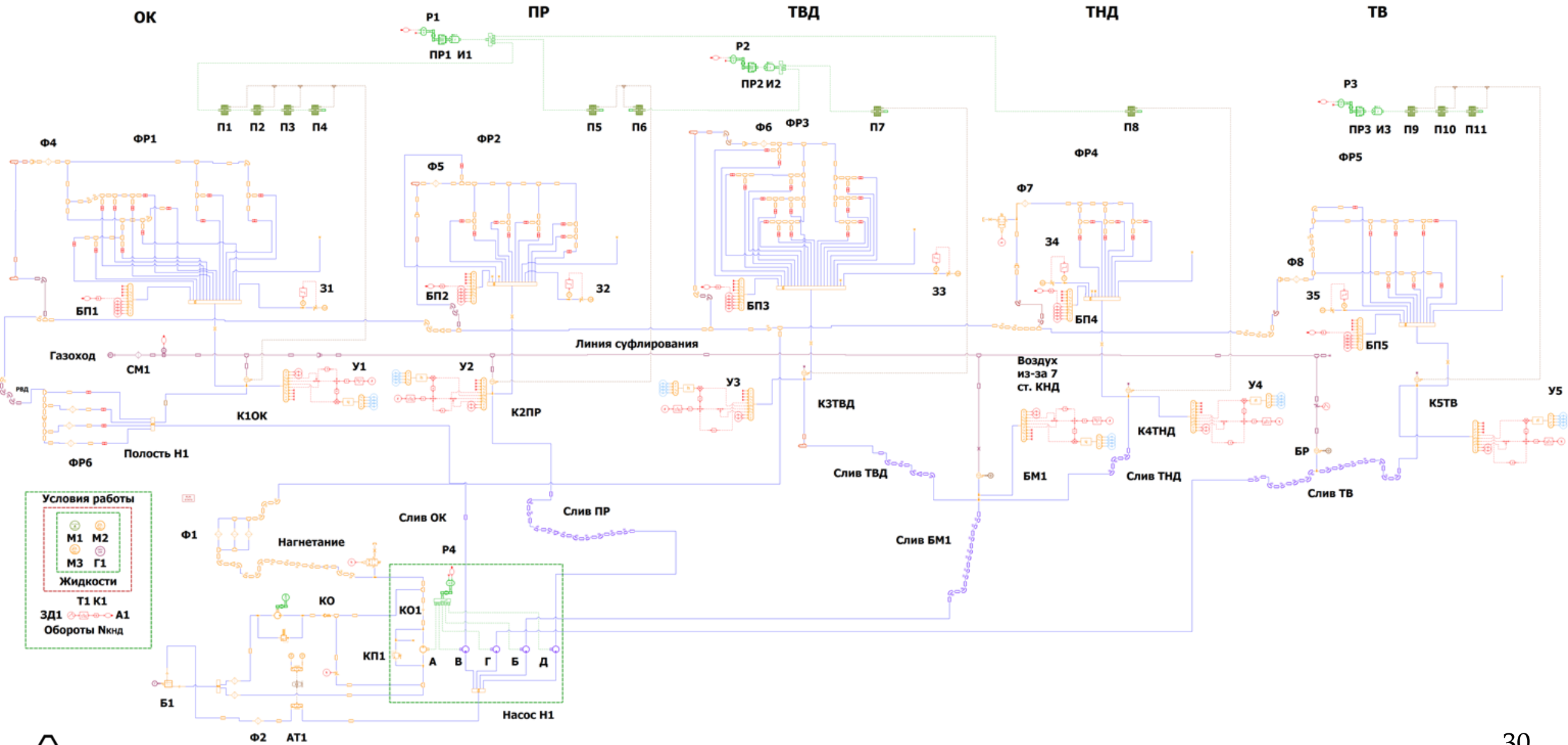


Архитектура модели

Наименование параметра	Тип параметра
Частота вращения КНД	Вход
Температура масла на входе в ГТД	Вход
Температура масла на выходе из переходника	Выход
Температура масла на выходе из опоры КВД	Выход
Температура масла на выходе из опоры ТНД	Выход
Температура масла на выходе из опоры СТ	Выход
Давление масла на линии откачки	Выход
Давление масла за фильтром Φ_1	Выход
Давление масла до фильтра Φ_1	Выход

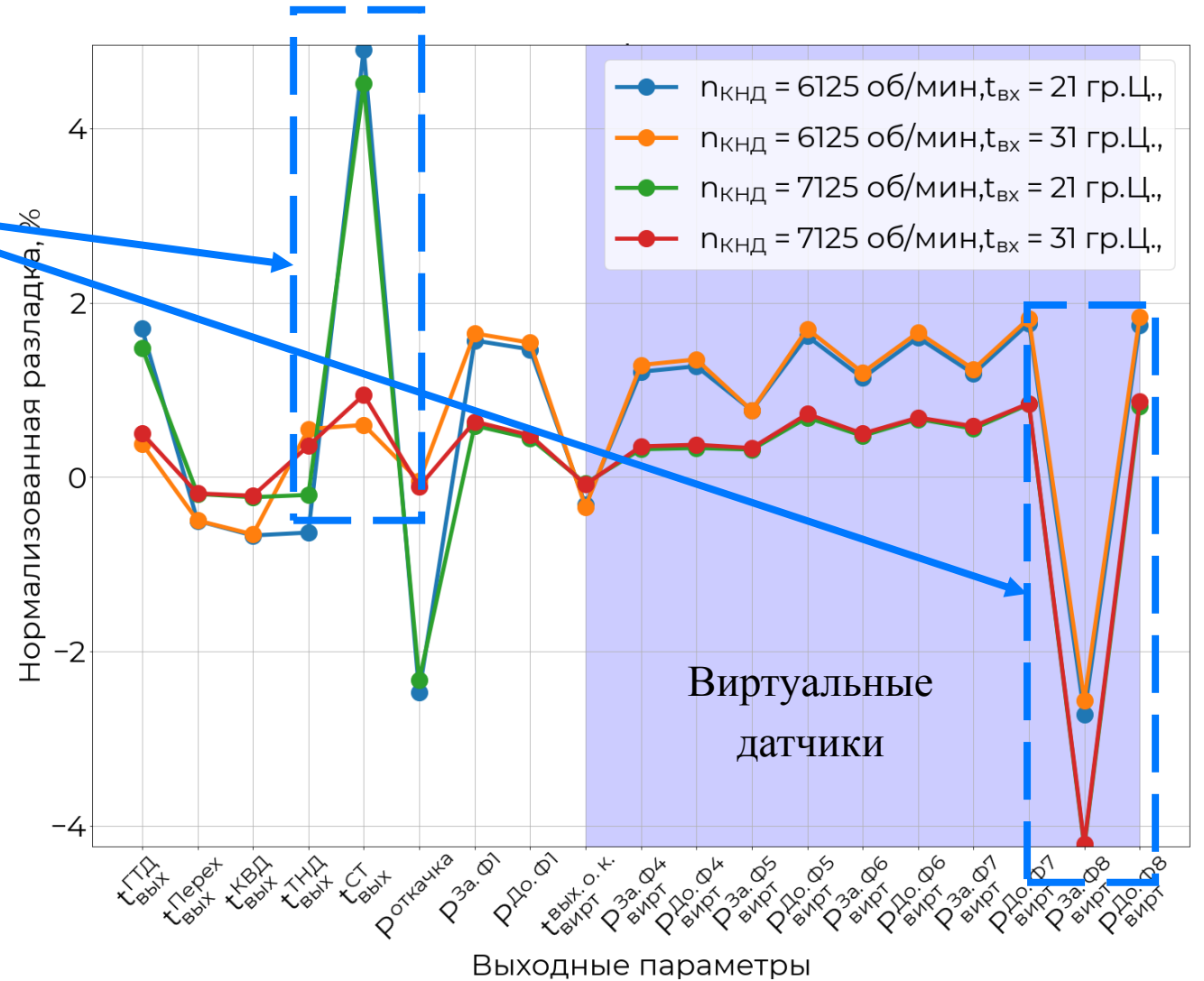
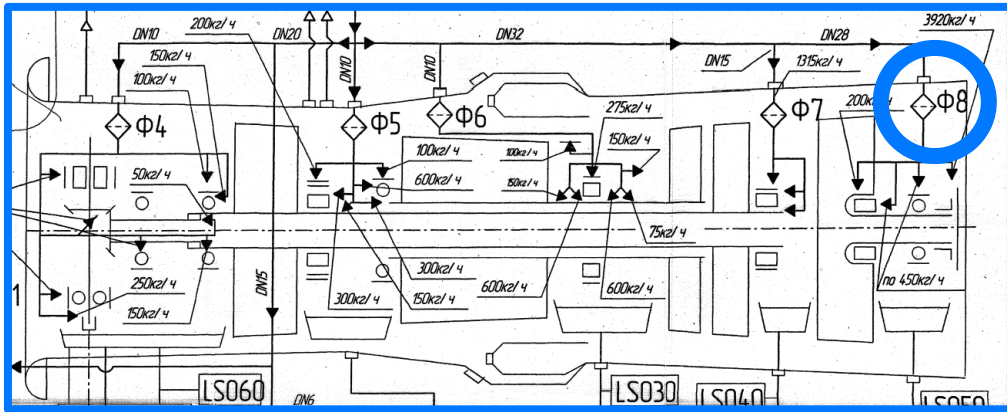


МОДЕЛЬ В SIMCENTER AMESIM



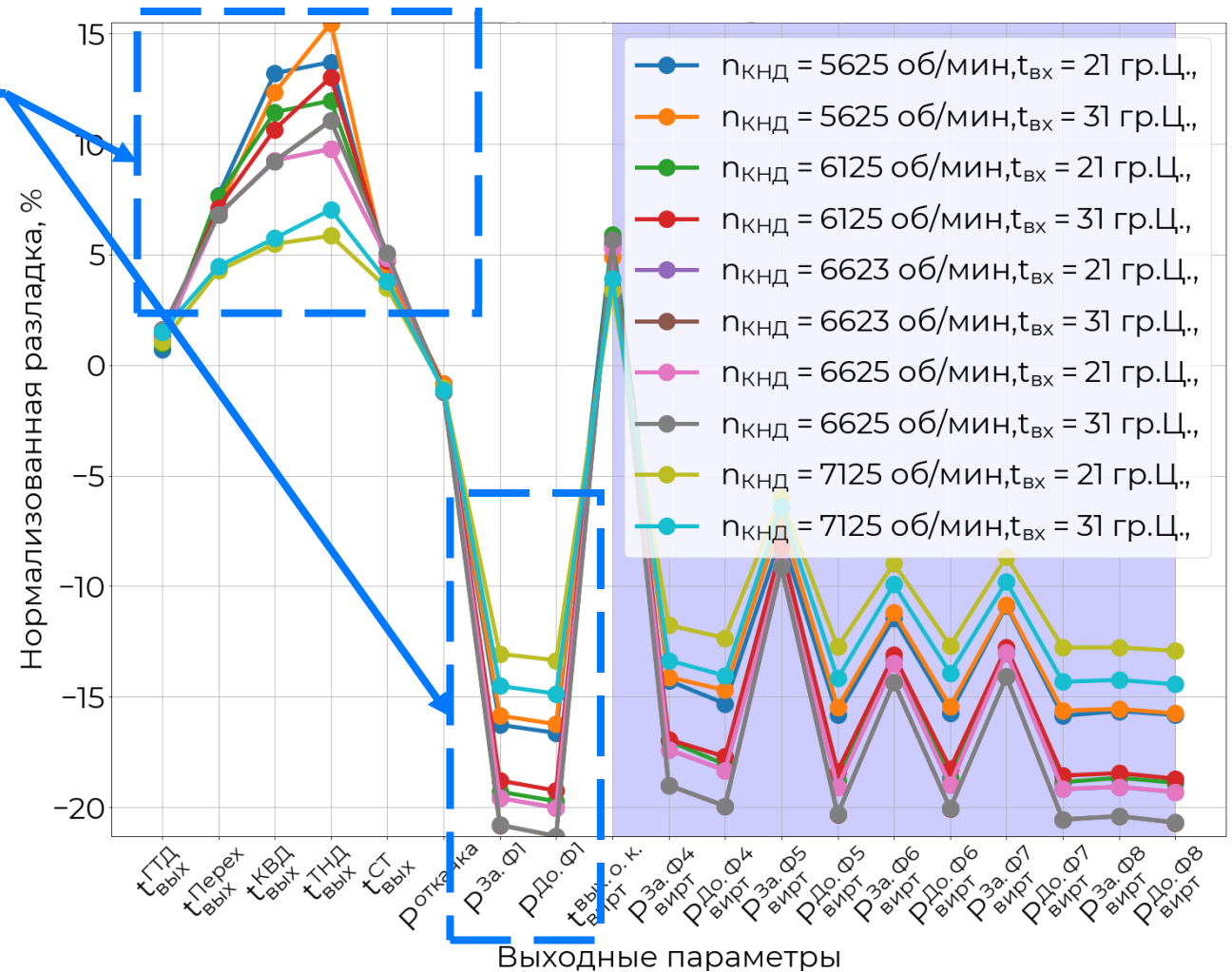
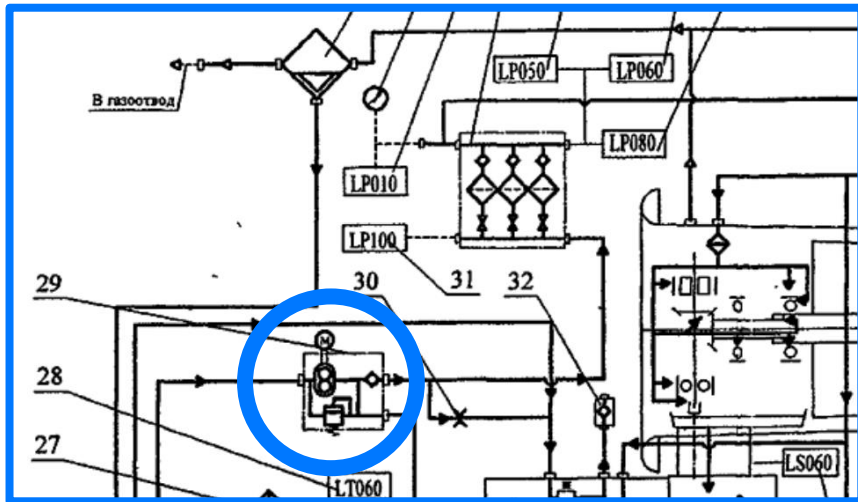
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ФИЛЬТРА Ф8 ПЕРЕД ОПОРОЙ СТ

- Недостаточное охлаждение подшипника
- Легко выявить с дополнительным датчиком
- Легко устранять



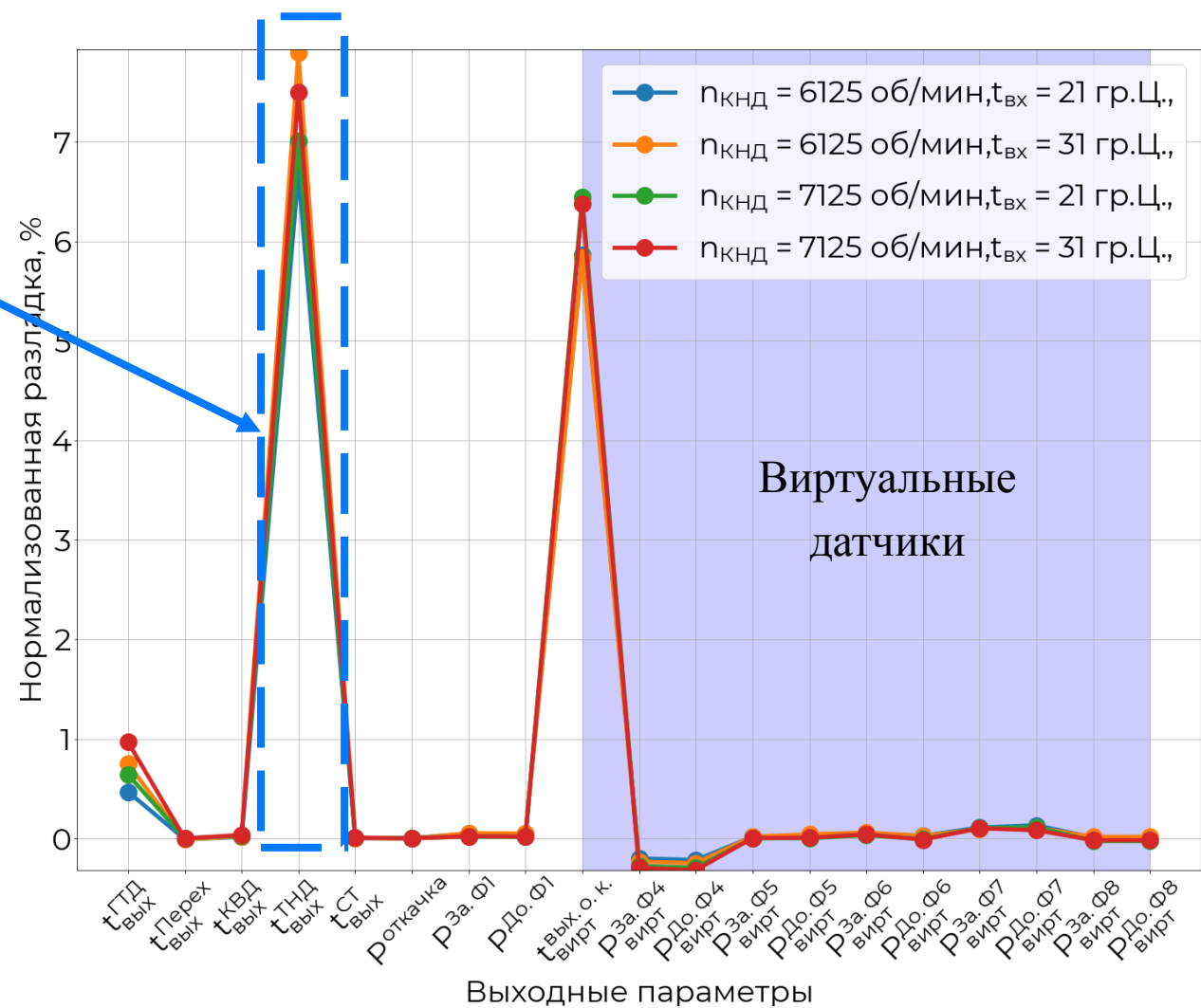
ДЕГРАДАЦИЯ НАГНЕТАЮЩЕГО НАСОСА

- Перегрев **всех** подшипников
- Пониженное давление фильтра Φ_1
- Легко выявить
- Средне тяжело устранить



ПЕРЕГРЕВ ОПОРЫ КОМПРЕССОРА

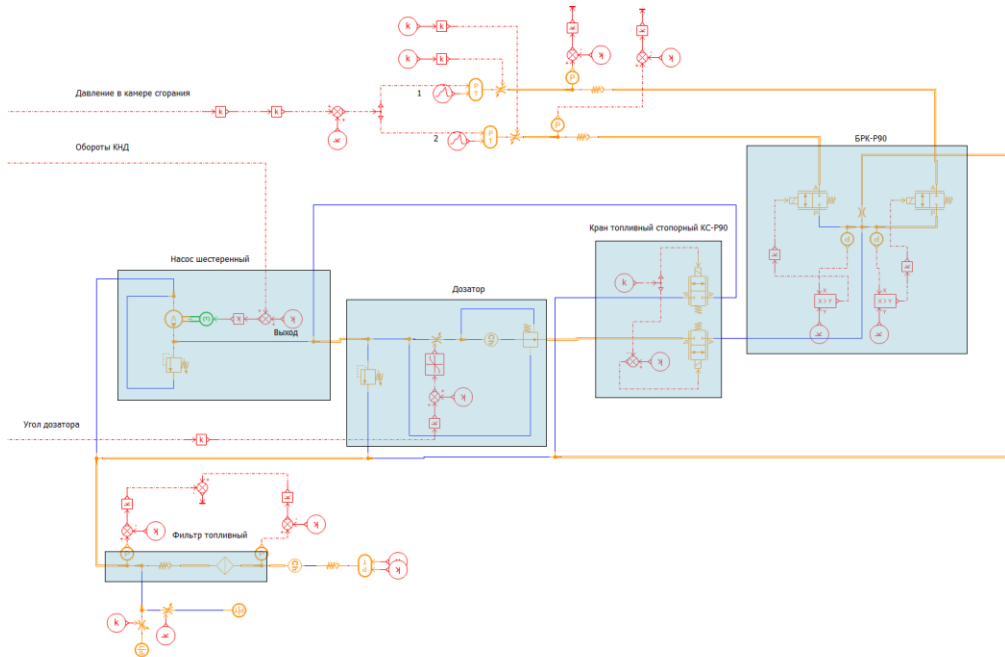
- **Изолированный дефект**
- **Легко выявить**
- **Потенциальная замена подшипника**



Апробация ПО в части:

- Система ГВТ
- Система смазки
- Топливная система

ТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА



- Модель подачи топлива
- Идеальный топливный насос
- Моделирование дефектов

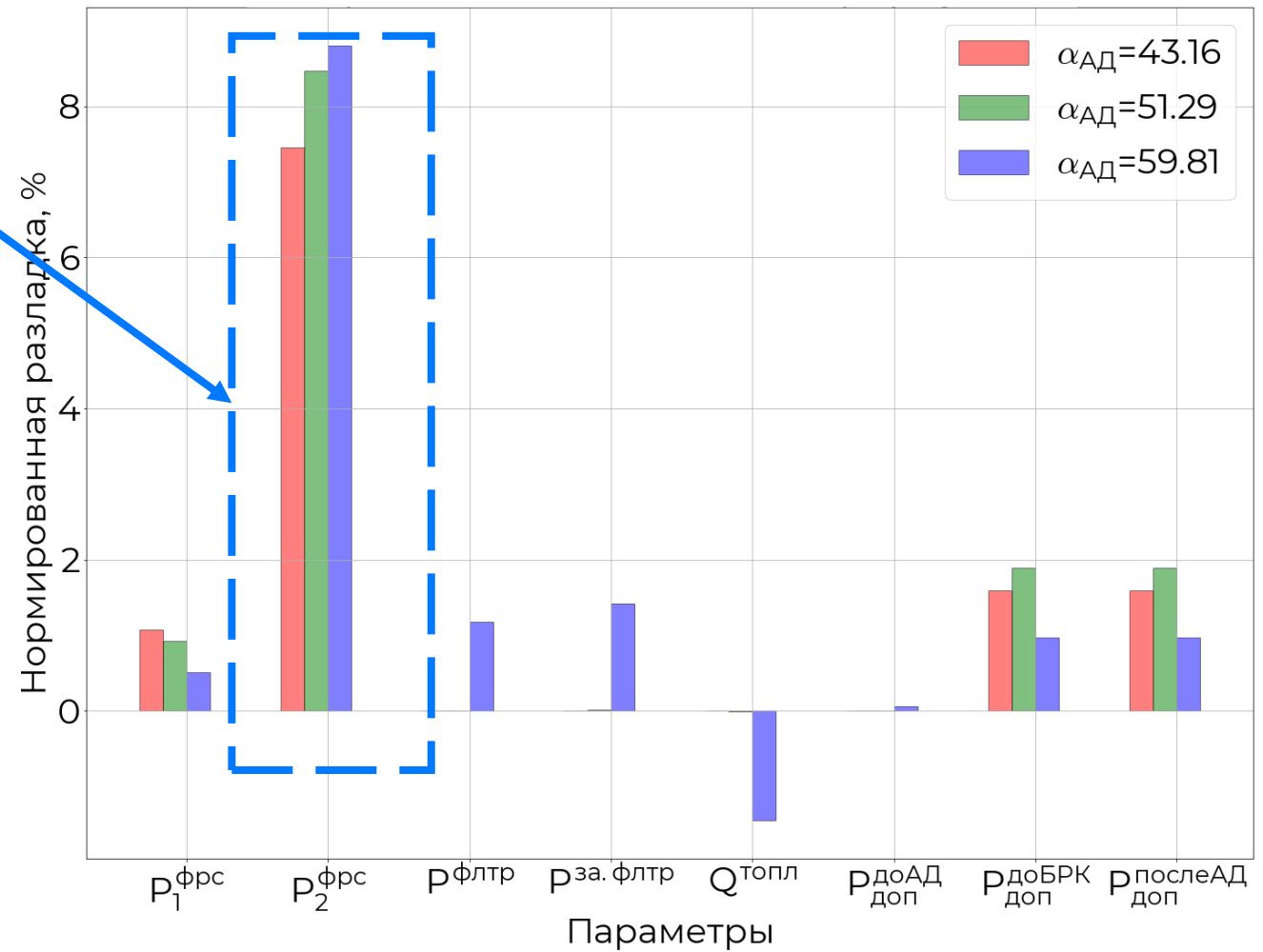


Архитектура модели

№ п/п	Наименование параметра	Тип параметра
1	Угол поворота АД	Вход
2	Частота вращения КВД	Вход
3	Давление за КВД	Вход
4	Расход топлива через дозатор	Выход
5	Давление топлива в 1 канале форсунок	Выход
6	Давление топлива во 2 канале форсунок	Выход
7	Давление топлива перед топливным фильтром	Выход
8	Давление топлива после топливного фильтра	Выход

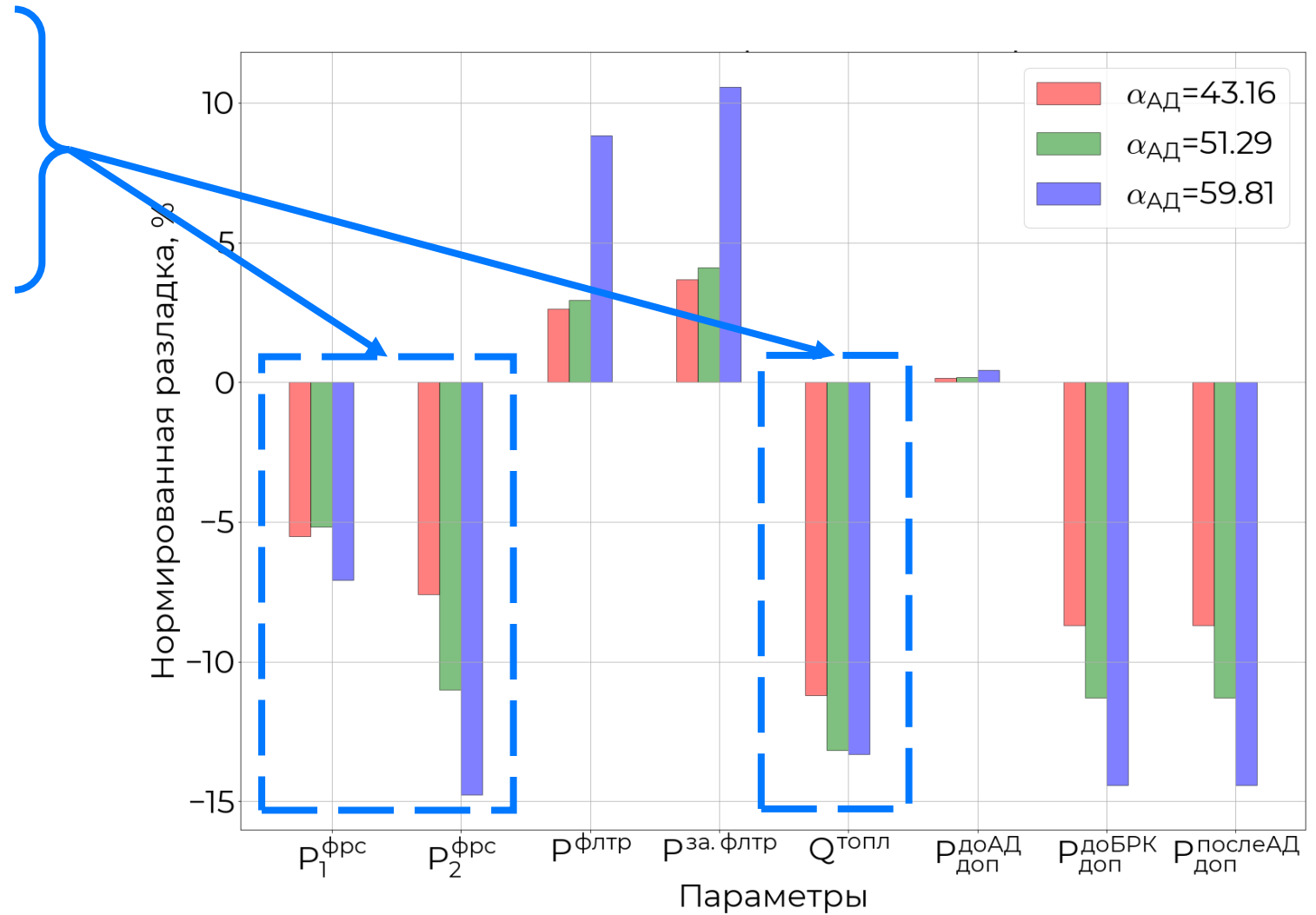
ЗАГРЯЗНЕНИЕ 2 КАНАЛА ФОРСУНОК

- Давление выше нормы
- Дегградация характеристик
- Легко выявлять
- Легко устранять

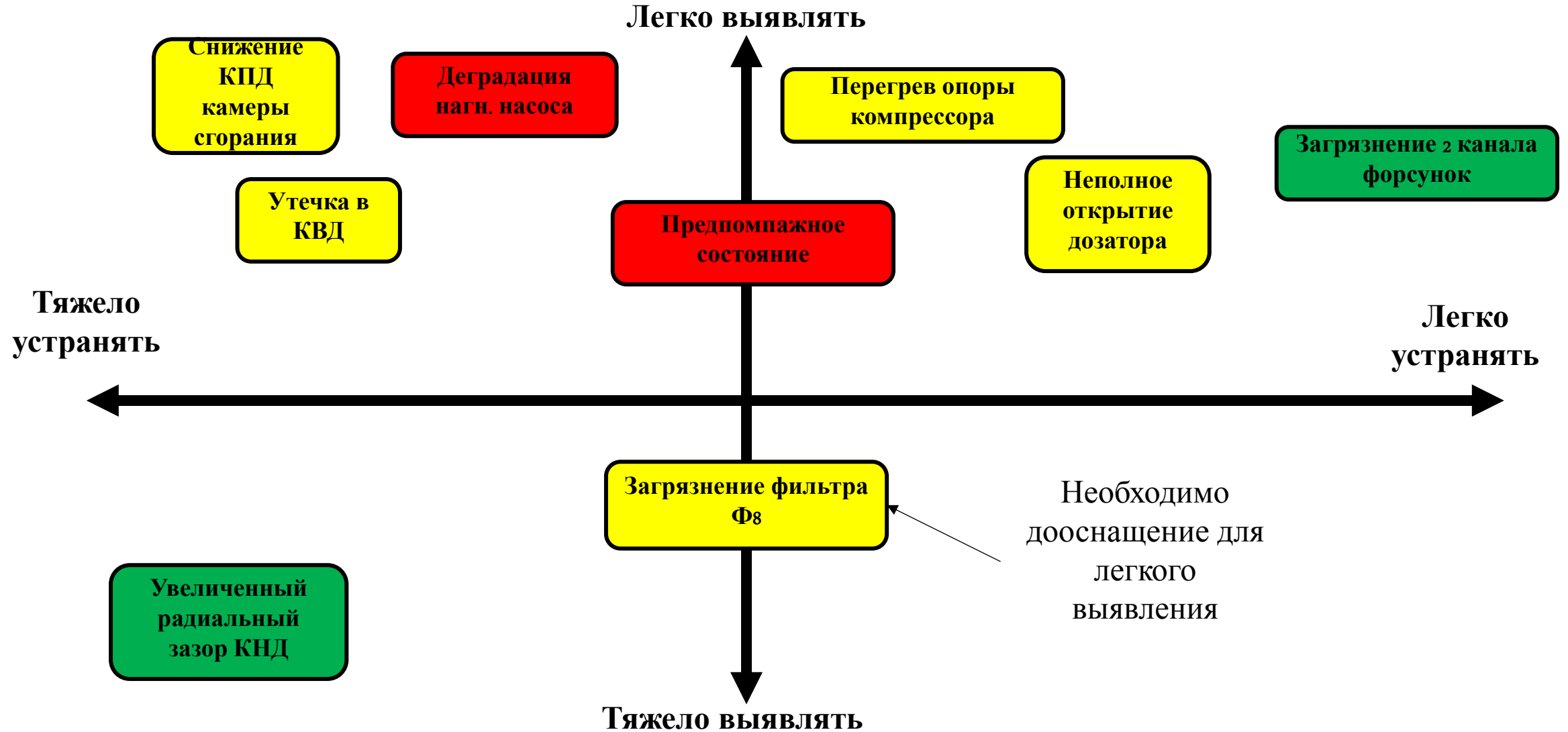


НЕПОЛНОЕ ОТКРЫТИЕ ДОЗАТОРА

- Нехватка топлива
- Легко выявлять
- Деградация характеристик
- Легко устранять



ТОЧНОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ И ТОИР



Легкий
дефект

Средний
дефект

Тяжелый
дефект

ВЫВОДЫ

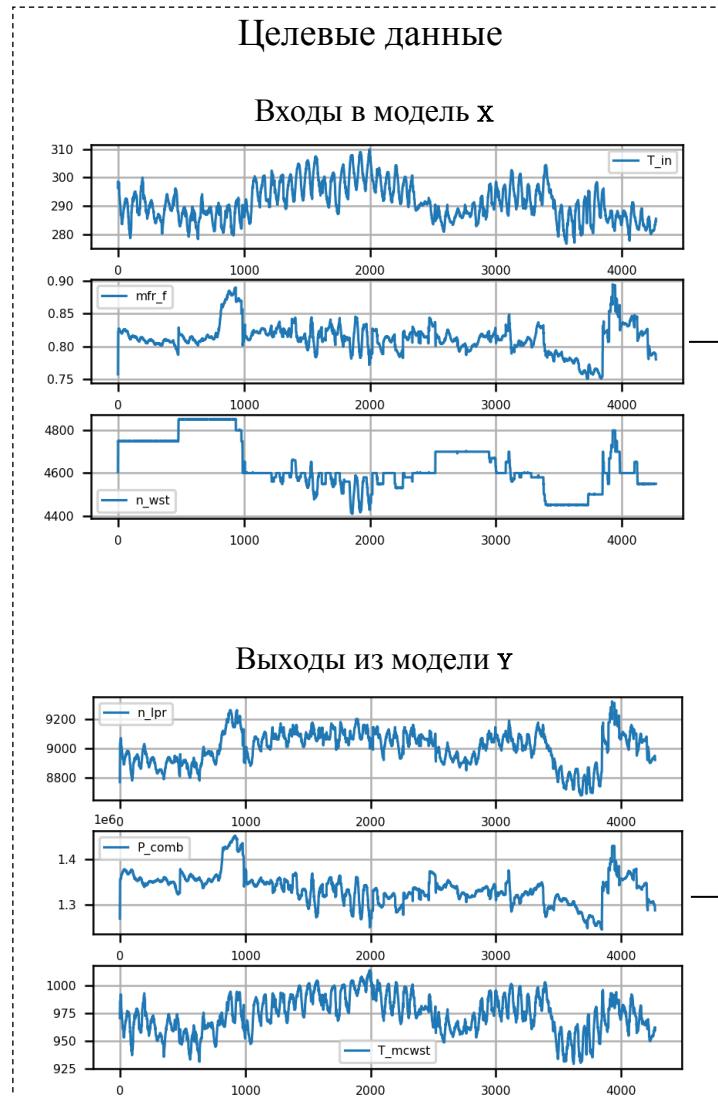
- △ **Необходима интеграция с CAE системами**
- △ Необходимо бортовое исполнение ПО для работы на изделии в эксплуатации
- △ ПО может подсказать оптимальное дооснащение для большей выявляемости дефектов
- △ Возможность выявления дефектов различается в зависимости от рабочих режимов и степени оснащенности датчиками
- △ **Необходима интеграция с ТОиР системами и внедрение в процессы ТОиР**





ПРИЛОЖЕНИЕ

УТОЧНЕНИЕ (ИДЕНТИФИКАЦИЯ) МОДЕЛИ ГВТ



X

Y

Модель



Расчет выходов модели y при заданных входах x и внутренних параметрах P :
 $y = f(X, P)$

Функция оптимизации

Расчет целевой функции (например, нормализованная среднеквадратичная ошибка):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{точек}}} \times \sum_{i=1}^{N_{\text{точек}}} \frac{\sum_{j=1}^{m_{\text{вых.парам.}}} \left(\frac{y_j^m - y_j^m}{y_j^m} \right)^2}{m_{\text{вых.парам.}}}}$$

Оптимизируемые параметры:

- Коэффициенты масштабирования характеристик компрессоров/турбин
- Коэффициенты утечек/выпусков
- Потери давления в переходниках
- КПД камеры сгорания, роторов

P_{new}

Оптимизатор

Оптимизация с ограничениями
 P_{\min}, P_{\max}
на выбранные параметры

$$P_{\text{opt}} = P \mid \min(R(P))$$

$$P = (P_{\min}, P_{\max})$$

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ГВТ

Абсолютная средняя погрешность модели в % от диапазона					Мощность СТ, МВт	
Давление за КВД	Температура за ТНД	Мощность СТ	Частота вращения ротора ТКНД	Частота вращения ротора ТКВД	Свыше	До
0.6	1.2	0.5	0.4	0.4	0	0.2
0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.4
0.4	0.1	0.6	1	0.3	0.4	0.6
0.5	0.1	0.7	1.2	0.2	0.6	0.8
0.3	0.1	0.3	0.7	0.1	0.8	1
0.5	0.2	1	0.3	0.3	1	1.2
0.5	0.2	1.1	0.3	0.3	1.2	1.4
0.4	0.2	1.3	0.2	0.1	1.4	1.6
0.3	0.4	0.7	0.5	0.2	1.8	2

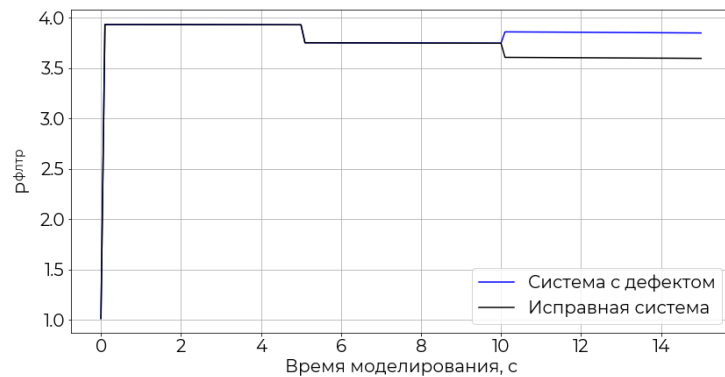
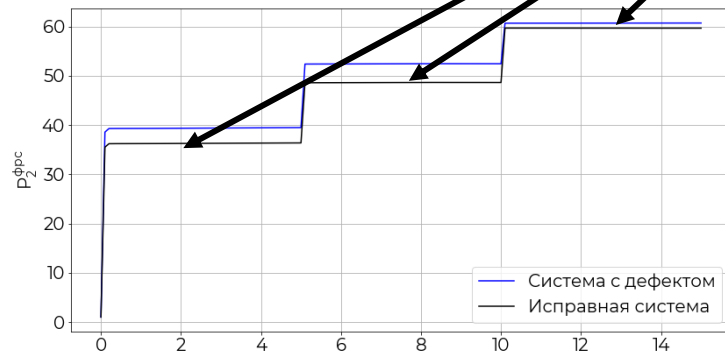
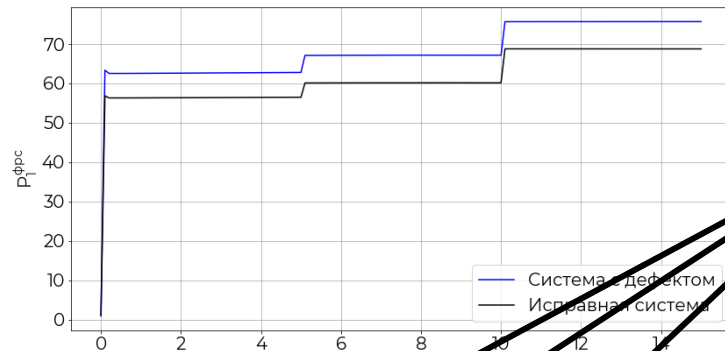


ВЕРИФИКАЦИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ

Абсолютная средняя погрешность модели в % от диапазона					Частота вращения КНД, об/мин	
Давление в ¹ канале форсунок	Давление во ² канале форсунок	Давление топлива за фильтром	Давление топлива перед фильтром	Расход топлива	Свыше	До
9.35	22.5	1.55	0.76	8.05	0	4500
0.95	3.71	1.03	0.99	3.51	4500	5000
1.29	1.76	0.77	0.84	1.17	5000	5500
1.27	2.81	1.29	1.31	3.55	5500	6000
1.28	4.28	1.13	0.97	4.07	6000	6500
0.81	1.31	4.09	3.22	0.91	6500	7000
0.4	1.01	2.99	2.4	1.08	7000	8000



СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ДЕФЕКТАМИ



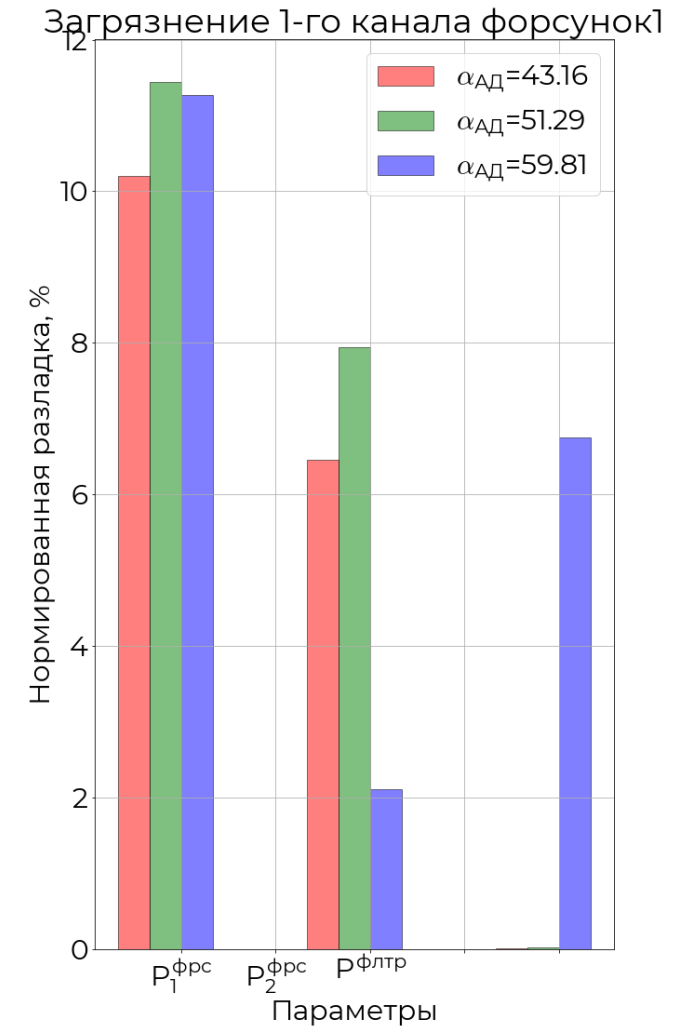
Различные рабочие режимы, например, угол поворота АД

Выборка значений разрядки для каждого рабочего режима по всем выходным параметрам

Вычисление средней разрядки для каждого рабочего режима

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i} \times 100\%, \text{ где}$$

δ_i - разрядка в i точке рабочего режима
 P_i - значение параметра в i точке рабочего режима

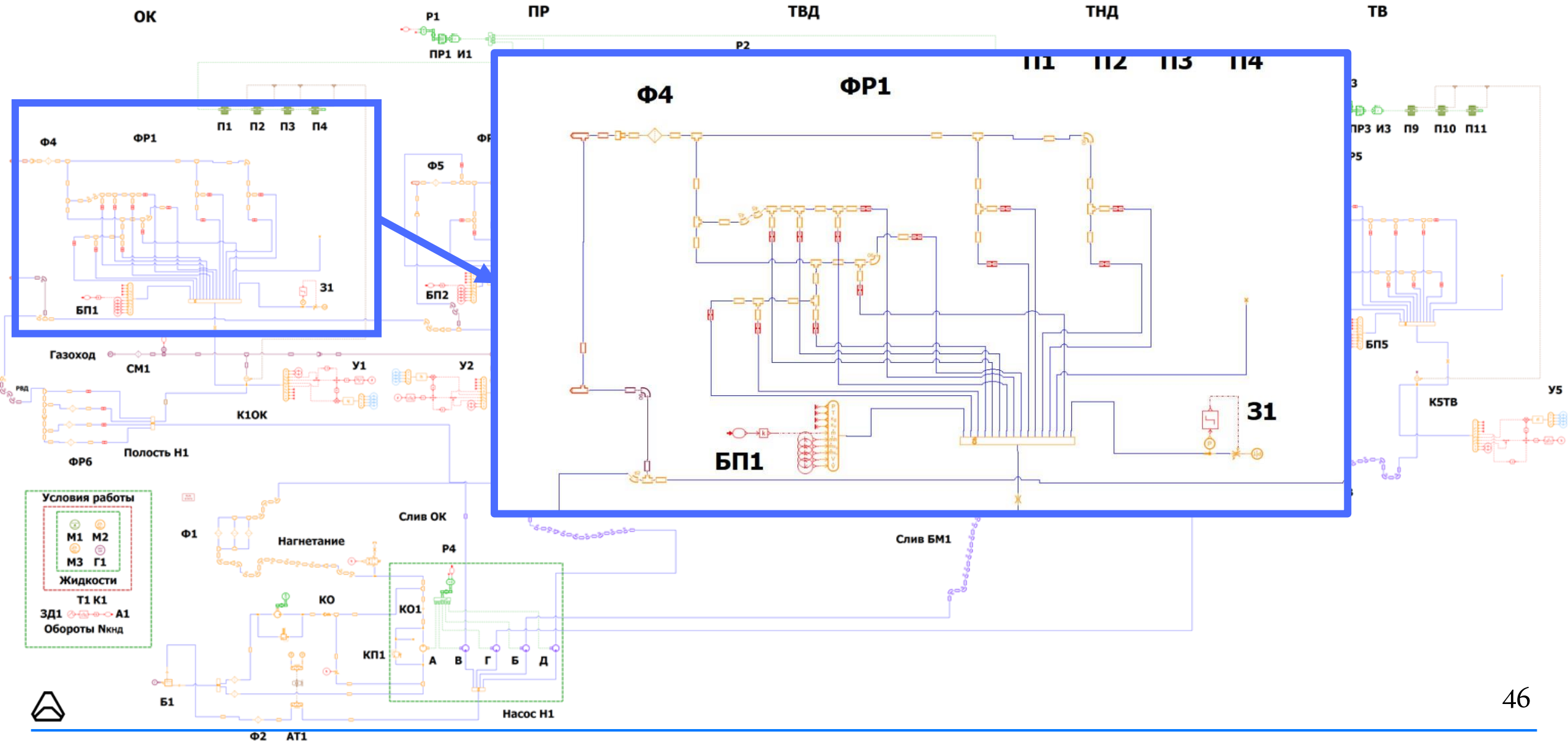


МОДЕЛИРУЕМЫЕ ДЕФЕКТЫ ГВТ

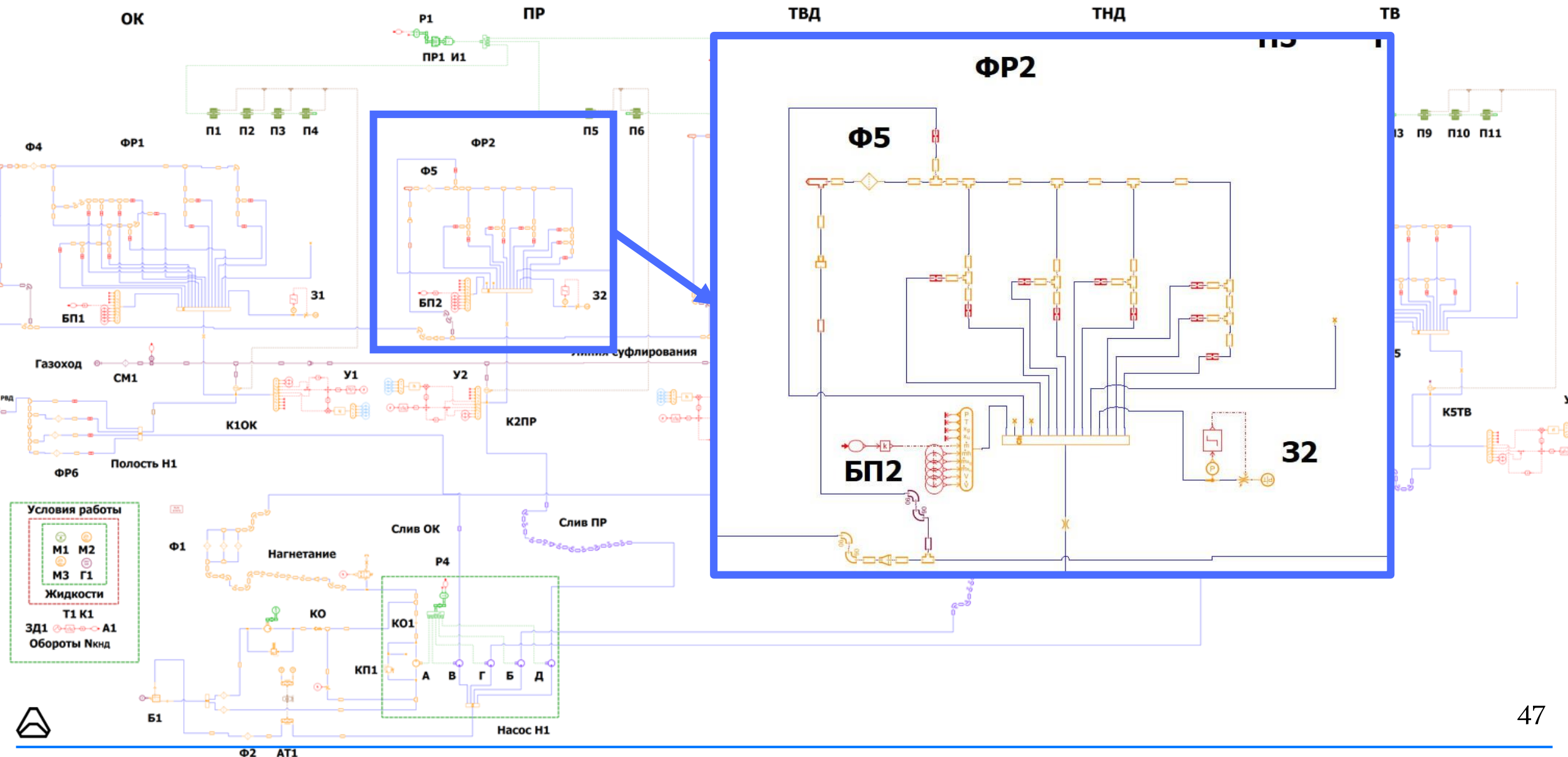
Наименование дефекта	Смещение характеристики				Узел
	Смещение по оси расхода	Смещение по оси π_K	Смещение по оси η	Коэфф. утечки	
Нештатное положение ВНА (отклонение от номинального положения минус 5 градусов)	-0,02	0,006	0,005	-	КНД
Нештатное положение ВНА (отклонение от номинального положения плюс 5 градусов)	0,005	0,01	-0,006	-	КНД
Увеличенные зазоры КНД	-0.0036	-	-0.0075	-	КНД
Утечка в КНД	-	-	-	0,02	КНД
Утечка в КВД	-	-	-	0,02	КВД
Увеличенные зазоры ТВД	-	-	-0,016	-	ТВД
Увеличенные зазоры ТНД	-	-	-0.013	-	ТНД
Увеличенные зазоры СТ	-	-	-0.014	-	СТ
Снижение КПД КС	Снижение КПД на 2%				



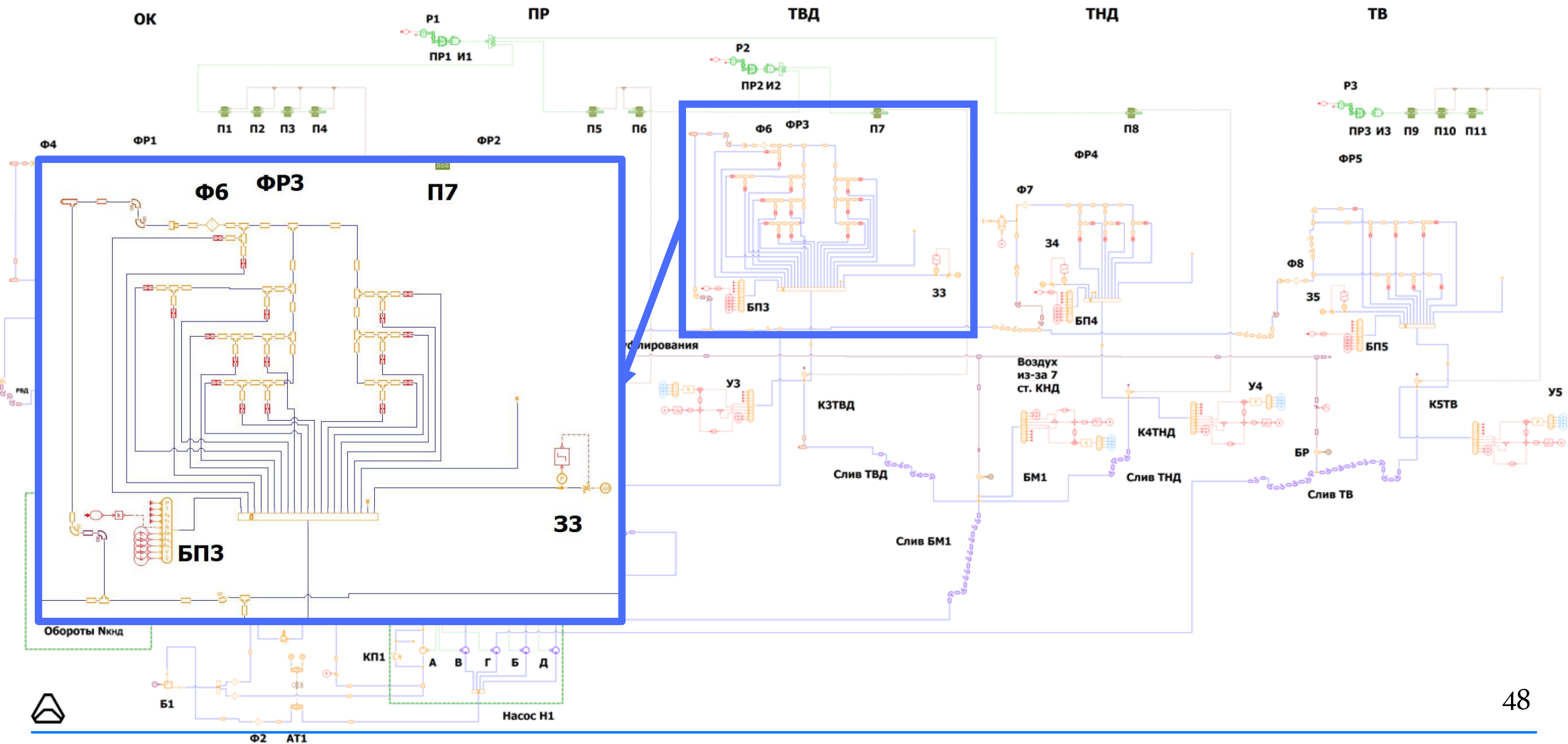
Модель масляной системы: ОК



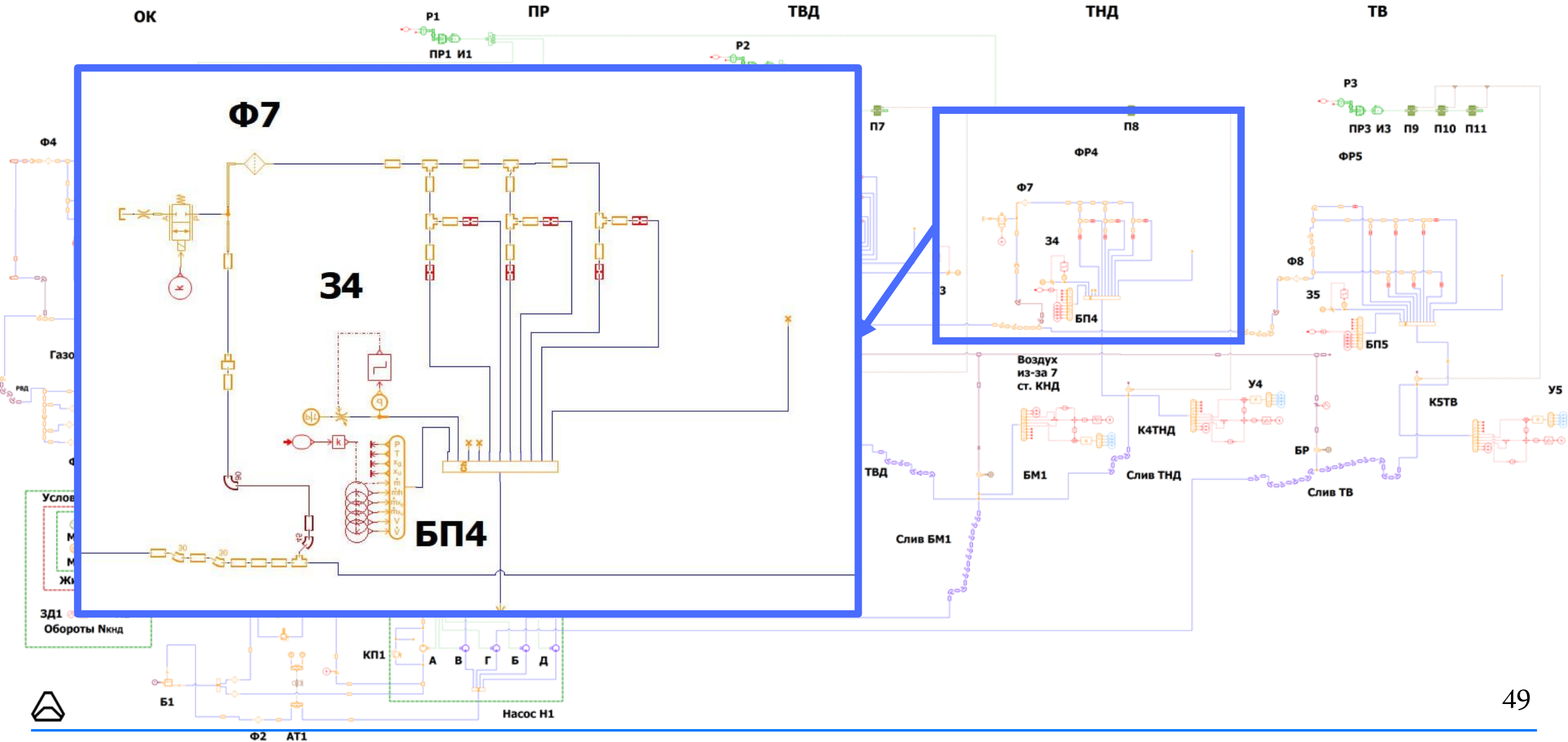
Модель масляной системы: переходник



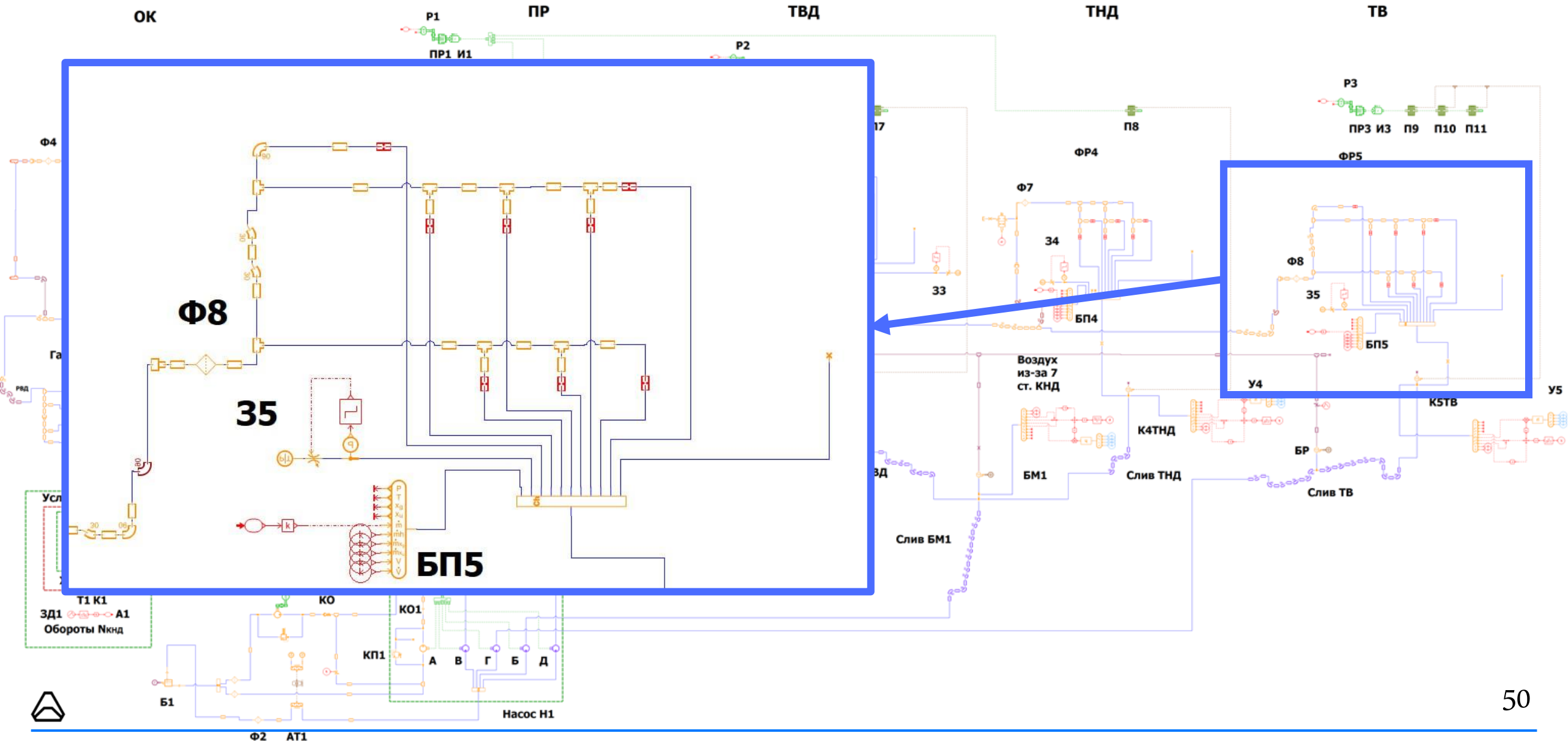
Модель масляной системы:ТВД



Модель масляной системы:ТНД

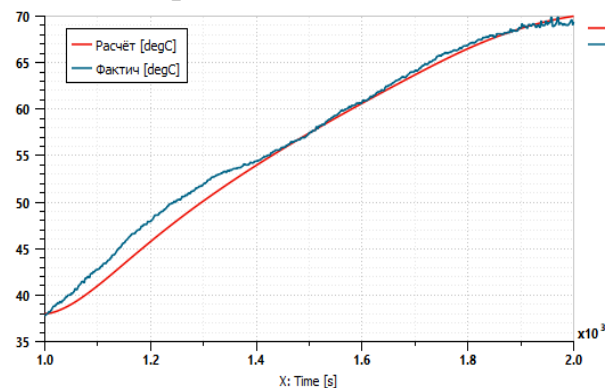


Модель масляной системы: СТ

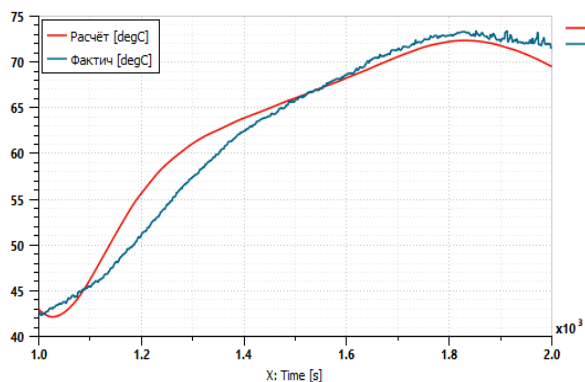


ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ СМАЗКИ

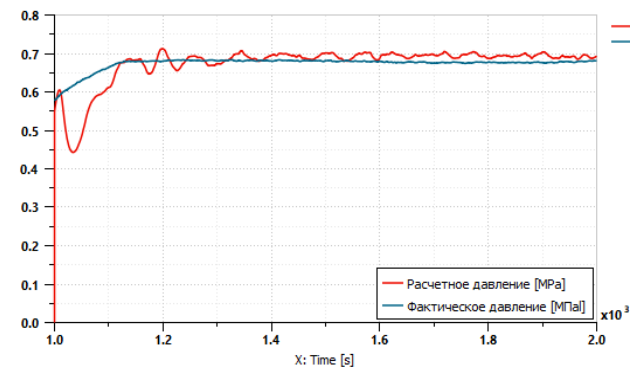
Температура масла на выходе из
переходника, °C



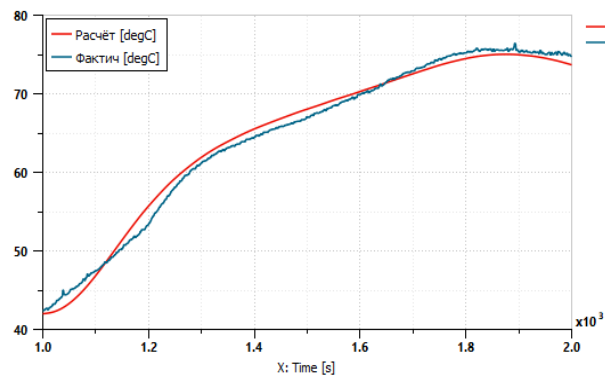
Температура масла на выходе из
опоры КВД, °C



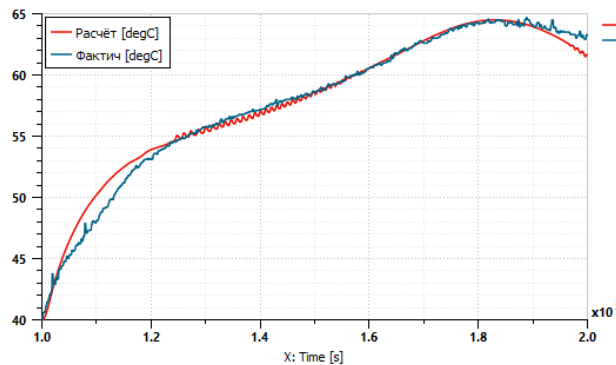
Давление до фильтра Ф₁



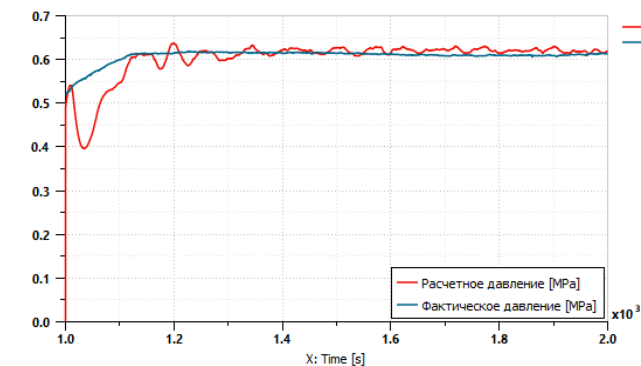
Температура масла на выходе опоры
ТНД, °C



Температура масла на выходе из
опоры СТ, °C

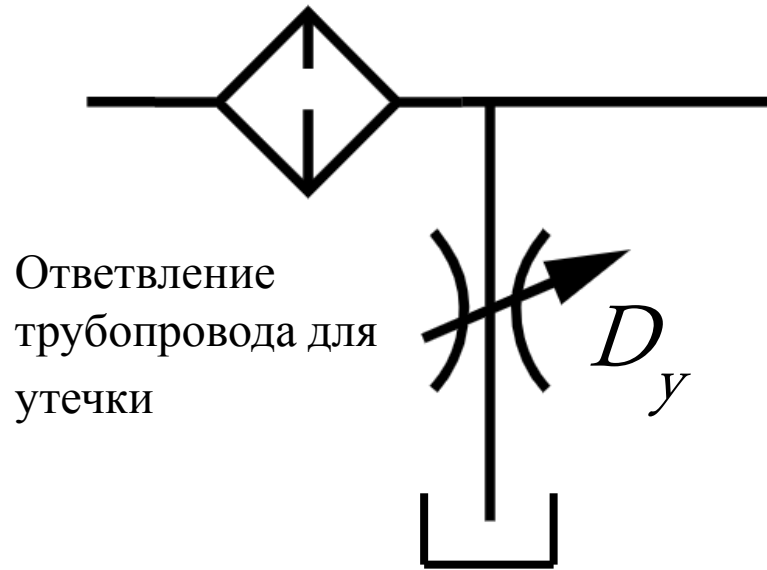


Давление за фильтром Ф₁

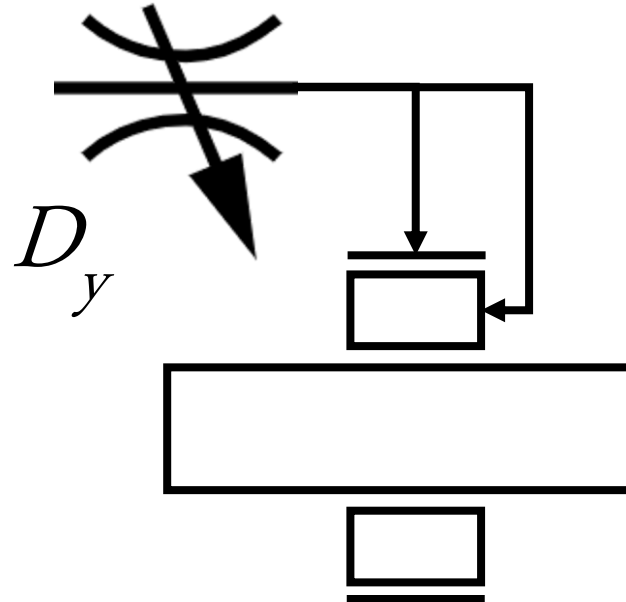


МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СИСТЕМЫ СМАЗКИ

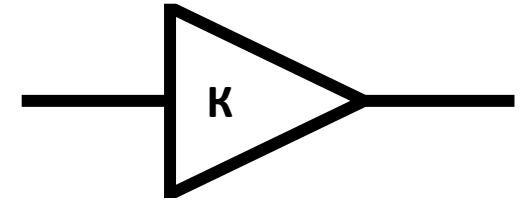
Утечка



Засорение



Деградация характеристик



Изменение модельных констант ~ степень дефекта

D_y дросселя ~ степень дефекта