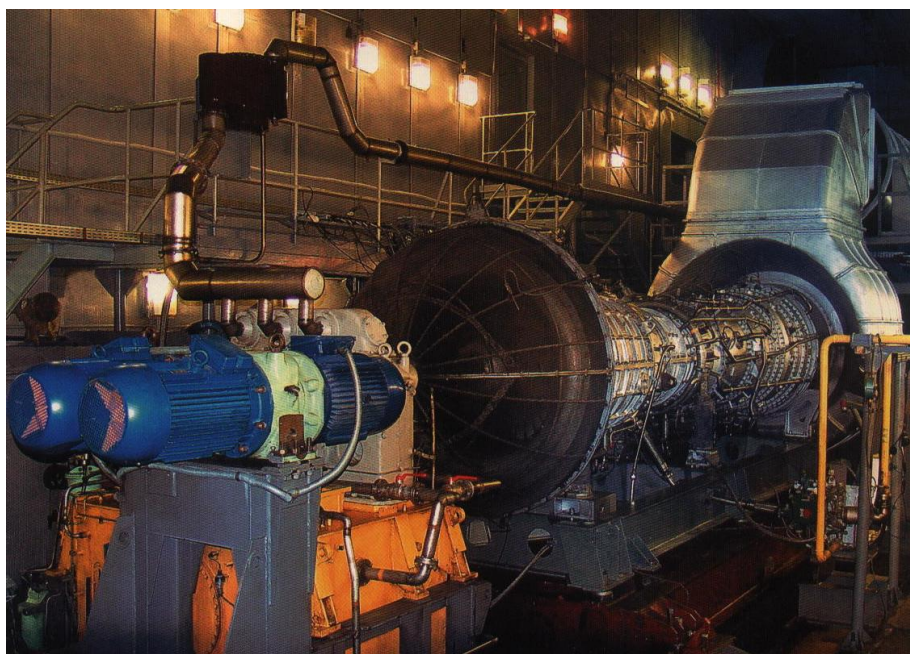


РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИСПЫТАНИЙ ПРИВОДОВ ГПА В УСЛОВИЯХ РЕМОНТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Задачи стендовых испытаний

- Проведение контрольных и приемо-сдаточных испытаний приводов ГПА
- Сопровождение восстановленных двигателей в эксплуатации по техническому состоянию
- Развитие преемственных методов и средств ведения контроля и диагностики для использования на испытательных стендах и компрессорных станциях
- Выявление “слабых” мест в технологических и производственных процессах цехов предприятия
- Использование стендов для обеспечения предприятия дешевой электроэнергией
- Разработка стратегии стендовых испытаний приводов ГПА в условиях ремонтного предприятия
- Разработка методов и средств САУ, вибрационного контроля и параметрической диагностики технического состояния газотурбинных двигателей в процессе контрольных и приемо-сдаточных испытаний
- Отработка методов и средств вибрационного контроля и параметрической диагностики для использования в условиях эксплуатации на КС

Общий вид стенда



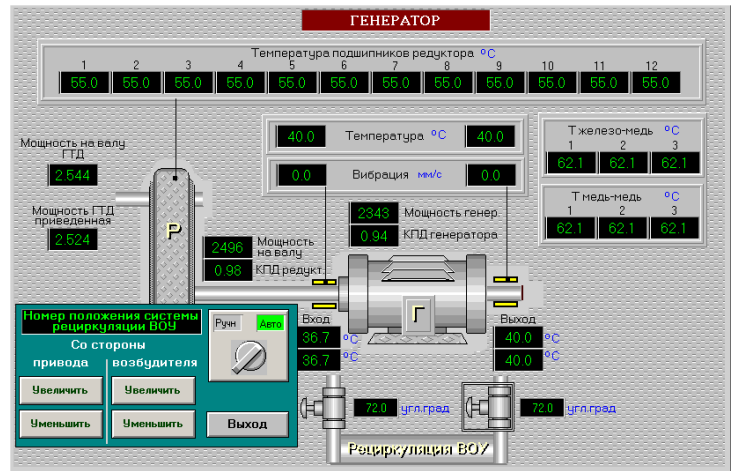
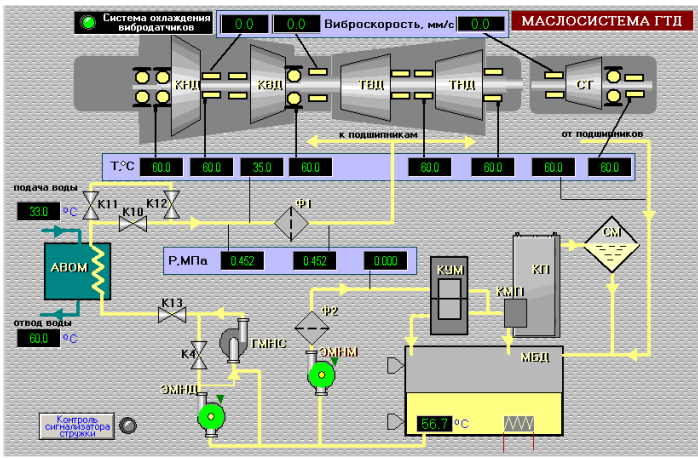
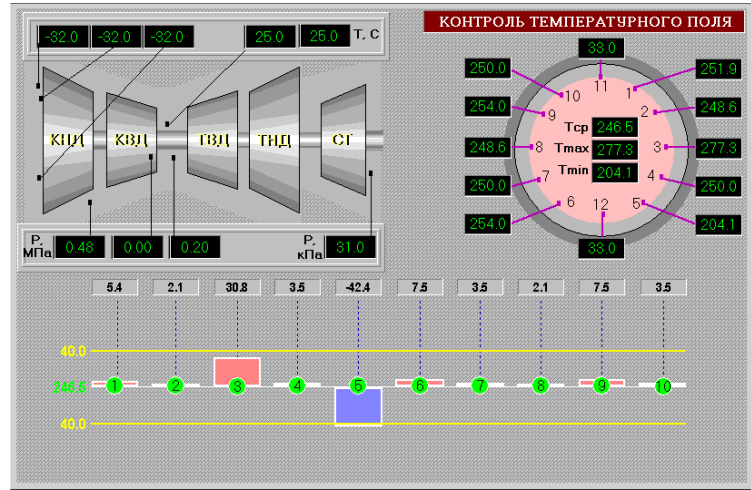
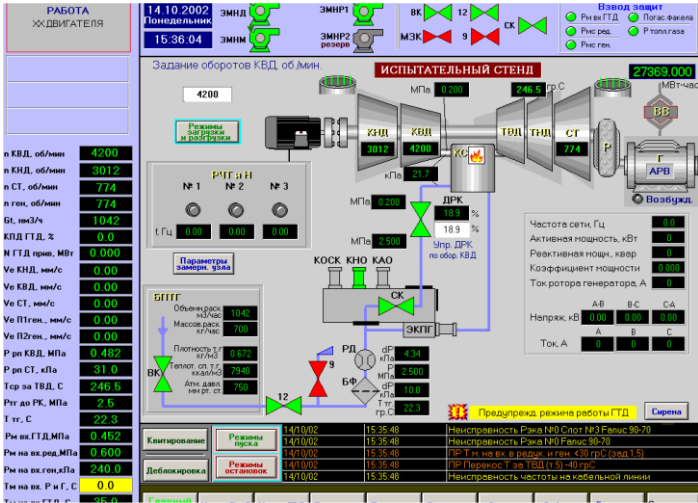
Объекты
испытаний –
ГТД
ДР59Л,
ДЖ59Л,
ДГ90

СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Матрица используемых технологий

Уровень	САУ ИС	Параметрический контроль и диагностика	Вибрационный контроль и диагностика
Датчики Измеряемые параметры	Давления Температуры Акселерометры Частоты вращения роторов Электрические параметры генератора	Все параметры из САУ Атмосферные условия Давление на входе – статическое, полное	Акселерометры Фазоотметчики Частоты вращения роторов Датчики перемещений
Первичная обработка	Вектор параметров Параметры эффективности	Вектор параметров Расход воздуха Дроссельные характеристики Параметры эффективности Статистический анализ	Вектор параметров FFT, прочие методы ... Линейная динамика (моделирование) Нелинейная динамика (моделирование) Статистический анализ
Мониторинг	Пороговый контроль	Пороговый контроль	Пороговый контроль
Диагностика состояния	Пороговый анализ	Трендовый анализ Причинный анализ - наборы правил для оценки состояния Статистический анализ	Пороговый анализ Трендовый анализ Причинный анализ - наборы правил для оценки состояния Статистический анализ Анализ выбега Нестационарный анализ
Прогноз состояния		Темпы снижения параметров эффективности График обслуживания	Темпы изменения критериев состояния График обслуживания
Сопровождение		Термодинамические модели Параметрические паспорта Коэффициенты влияния Алгоритмы диагностики Удаленная диагностика	Вибрационные паспорта Алгоритмы диагностики Удаленная диагностика
Представление	Визуализация Протоколирование Экспертная оценка	Визуализация Протоколирование Экспертная оценка	Визуализация Протоколирование Экспертная оценка

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ



Модели САУ

Мощность

$$N = \frac{N_{ген}}{\eta_{ред} \cdot \eta_{ген}}$$

Расход топливного газа

$$G_T = K_1 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{III} \cdot (p_{ТГ} + 1,033) \cdot \rho_H}{(t_{ТГ} + 273) \cdot K}}$$

Коэффициенты приведения

$$\alpha = \sqrt{\frac{t_H^P + 273}{t_{ИЗМ}^P + 273}}$$

$$\beta = \frac{P_H^P}{P_{ИЗМ}^P}$$

Приведенная мощность ГТД

$$N_{ПР} = N \cdot \alpha \cdot \beta$$

Эффективный КПД

$$\eta_e = \frac{8,6 \cdot N_{ПР} \cdot 10^4}{H_U \cdot Q_M^{ПР}}$$

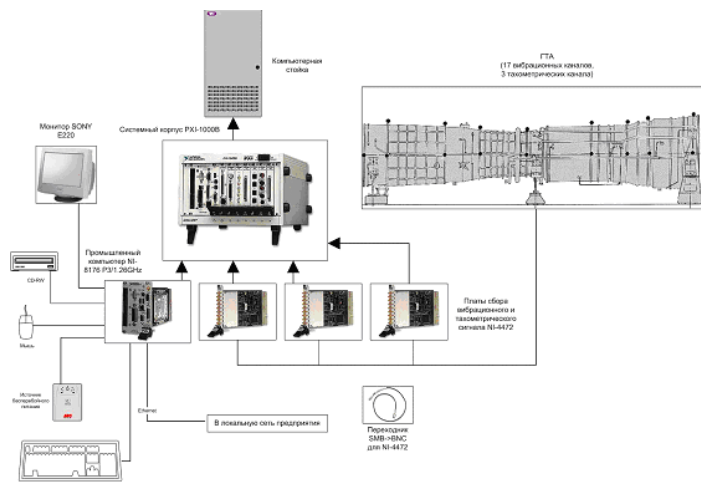
Выходные данные

$$P_{КВД пр} = f(N_{пр}); n_{КНД пр} = f(N_{пр});$$

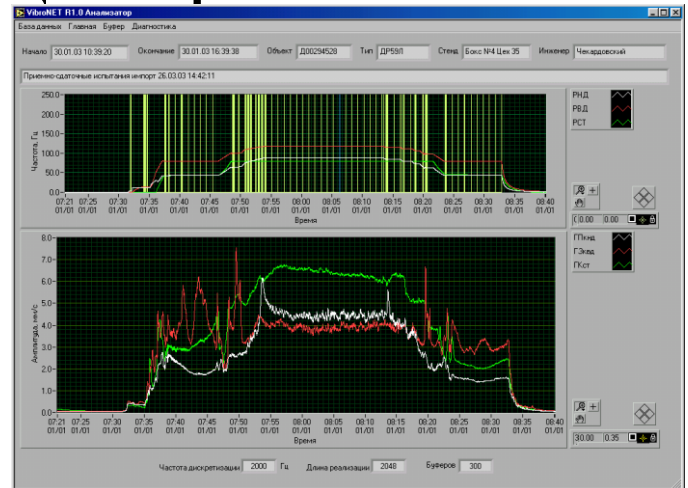
$$n_{КВД пр} = f(N_{пр}); t_{04 пр} = f(N_{пр})$$

ВИБРОМЕТРИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аппаратная архитектура



Циклограмма ПСИ



Программа приемо-сдаточных испытаний (ПСИ)

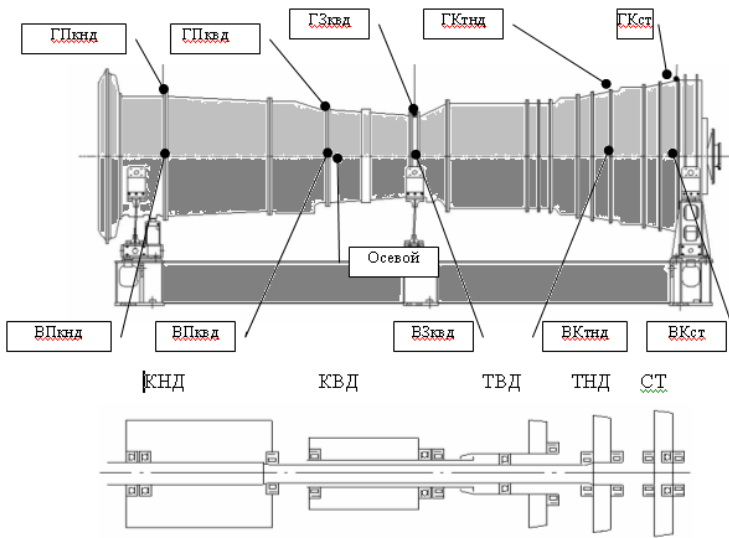
№	Режим (N - номинальная мощность)	Параметры режима, првд, об/мин	Продолжительность, сек	Способ контроля продолжительности режима	Режим сбора информации
1	Запуск		-	-	Реализации
2	Холостой ход	4800	1000-1500	До выхода на стационарный режим	Реализации
3	Ступенчатая нагрузка генератора 0.25N, 0.5N, 0.75N, 0.8N, 0.9N	4800-7080	1500-2000		Реализации
4	Режим полной загрузки генератора 1N	7080	1500-2000	До выхода на стационарный режим	Реализации
5	Холостой ход	4800	1000-1500	До выхода на стационарный режим	Реализации
6	Выбег	4800-0	500-600	До полной остановки	Непрерывный

Пороговый контроль ДР59Л

Полоса контроля, Гц	Дискретные составляющие спектра	Пороги СКЗ, м/сек			Номера двигателей					
		Н	У	О	294528	295244	298442	293187	294216	294530
65 - 80	1xPCT	5,1	7,0	11	1,11	1,45	1,03	1,21	1,39	3,84
80 - 95	1xPHD	6,0	7,3	9,8	1,11	1,65	1,60	3,11	1,98	3,98
95 - 130	1xPBД*	6,0	8,2	13,5	1,94	4,08	0,35	1,50	1,21	0,51
130 - 160	2xPCT*	2,0	2,4	3,2	1,13	0,89	0,85	0,65	0,61	1,14
160 - 190	2xPHD*	4,8	5,2	6,8	4,58	4,46	2,79	0,99	0,82	1,14
190 - 260	2xPBД*	2,4	4,9	6,4	0,53	1,37	0,22	0,41	0,31	0,15
130 - 160	1,5xPHD	3,0			0,58	2,73	0,24	1,40	1,15	0,16
160 - 190	1,5xPBД	5,0			4,58	4,42	2,79	0,71	0,43	0,89
190 - 260	PBД+PHD	1,5			0,21	1,47	0,23	0,48	0,12	0,14
260-400-1	1,5x(PHD+PBД)*	2,2	3,6	6,0	0,12	0,44	0,09	0,14	0,12	0,08
10 - 400	Общий	13	19	23	5,80	6,50	2,20	3,20	2,80	4,20

АЛГОРИТМЫ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Схема расположения акселерометров



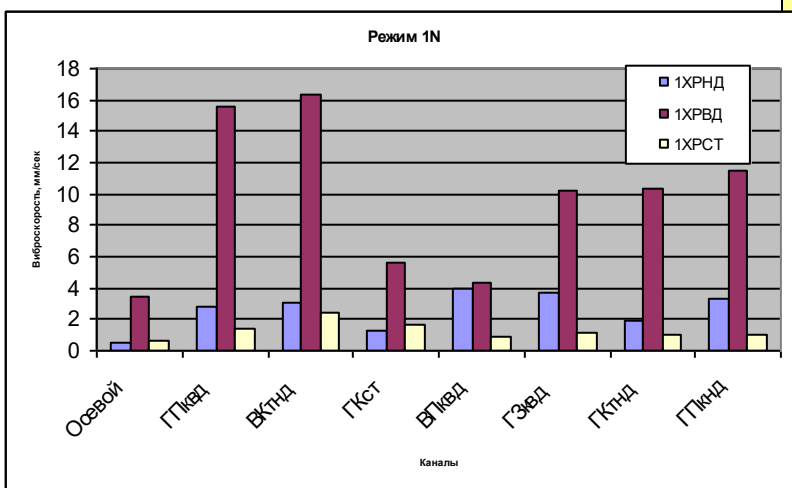
Имя	Место расположения	Направление
ВПкнд	Передняя опора КНД	Верт.
ВЗквд	Задняя опора КВД	Верт.
ВКтнд	Корпус ТНД	Верт.
ВКст	Корпус СТ	Верт.
ВПквд	Передняя опора КВД	Верт.
ГПкнд	Передняя опора КНД	Гориз.
ГЗквд	Задняя опора КВД	Гориз.
ГКтнд	Корпус ТНД	Гориз.
ГКст	Корпус СТ	Гориз.
ГПквд	Передняя опора КВД	Гориз.
Осевой	Передняя опора КВД	Осевое

Базовые положения для разработки алгоритмов

- максимальное число вибрационных каналов;
- использование гармонических компонент вибрационного сигнала в правилах определения состояния;
- использование известных в практике эксплуатации вращающихся машин связей компонент вибрационного сигнала с проявлениями различных неисправностей или состояний;
- использование коэффициентов усиления (ослабления), устанавливающих связь между источником вибраций и местом датчика, регистрирующего эти вибрации;
- использование в правилах диагностики результатов математического моделирования вибрационных характеристик двигателей ДР59Л и ДЖ59;
- проведение специальных экспериментов.

Инструментарий системы

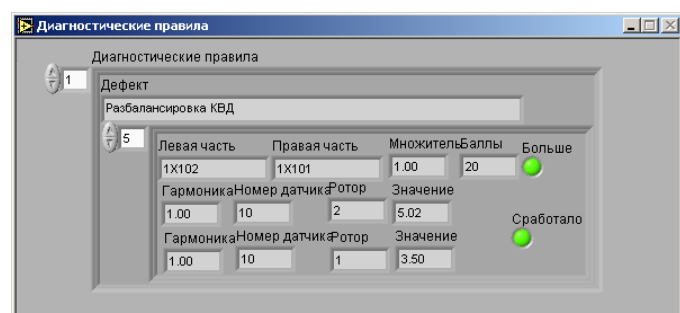
- статистика



Дефекты сборки

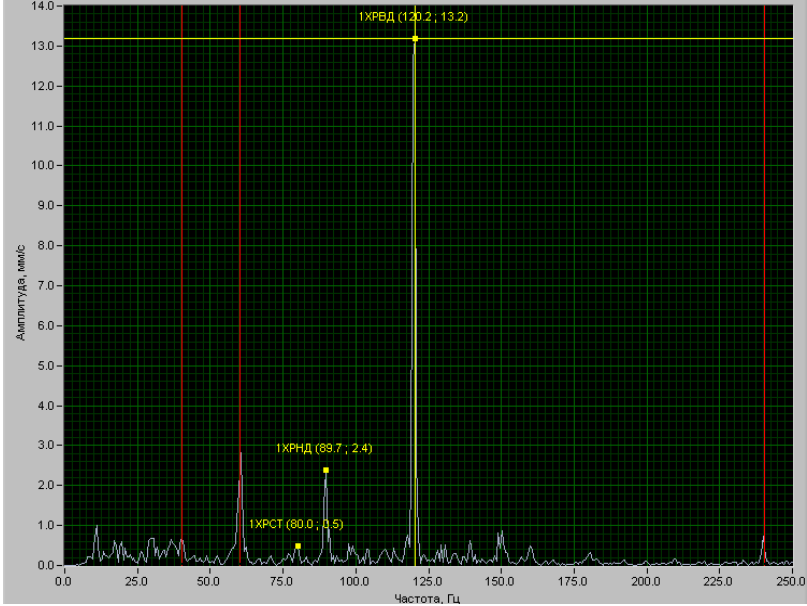
Неисправность канала	Разбалансировка ротора
Расцентровка	Ослабление соединений
Касания ротора о статор	Дефекты подшипника

- редактор правил



АЛГОРИТМЫ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Алгоритм 3

№	Диагностические правила	Информация оператору
1	1X032>0.50*L03=10	<p>Дисбаланс ТВД</p> <p>Диагностический признак - 1ХРВД</p>  <p>Весовой коэффициент</p> $K_i = 1xРВД_i / СКЗ_i$ $K_{i \text{ ИИТ}} = (K_1 + K_2 + \dots + K_n) / n$
2	1X112>0.50*L11=10	
3	1X032>1.00*1X031=20	
4	1X112>1.00*1X111=20	
5	1X032>1.00*1X033=20	
6	1X112>1.00*1X113=20	
7	1X032>1.00*2X032=10	
8	1X112>1.00*2X112=10	
9	2X032>1.00*3X032=10	
10	2X112>1.00*3X112=10	
11	3X032>1.00*4X032=10	
12	3X112>1.00*4X112=10	
13	1X032>1.00*1X011=10	
14	1X112>1.00*1X091=10	
15	1X032>1.00*1X051=10	
16	1X112>1.00*1X131=10	
17	1X032>1.00*1X012=10	
18	1X112>1.00*1X092=10	
19	1X032>1.00*1X052=10	
20	1X112>1.00*1X132=10	
21	1X032>1.00*1X013=10	
22	1X112>1.00*1X093=10	
23	1X032>1.00*1X053=10	
24	1X112>1.00*1X133=10	
25	1X032>1.00*1X021=10	
26	1X112>1.00*1X101=10	
27	1X032>1.00*1X022=10	
28	1X112>1.00*1X102=10	
29	1X032>1.00*1X023=10	
30	1X112>1.00*1X103=10	
31	1X032>1.00*1X024=10	
32	1X112>1.00*1X104=10	
33	1X032>1.00*1X025=10	
34	1X112>1.00*1X105=10	
35	1X032>1.00*1X026=10	
36	1X112>1.00*1X106=10	

Диагностика

Диагностический режим ● Время 5457.00 РНД 85.62 РВД 116.96 РСТ 79.99

Наименование	Вероятность	Наименование	Весовой коэффициент
Разбалансировка ТВД	70	Дисбаланс РНД	0.14
Разбалансировка КВД	52	Дисбаланс РВД	0.72
Разбалансировка КНД	38	Дисбаланс РСТ	0.07
Несоосность КВД относительно ТВД	36	Перекас РНД	0.15
Разбалансировка ТНД	35	Перекас РВД	0.86
Ослабление соединений ротора ТВД	22		
Ослабление соединений ротора КВД	20		
Касание РВД	13		
Несоосность КНД относительно ТНД	8		
Разбалансировка СТ	5		
Ослабление соединений ротора КНД	0		
Касание ТНД	0		
Касание КНД	0		
Касание СТ	0		
Дефект шарикового подшипника опоры СТ	0		
Дефект упорного подшипника задней опоры КВД	0		
Дефект роликового подшипника задней опоры КВД	0		
Дефект роликового переднего подшипника СТ	0		
Дефект роликового заднего подшипника СТ	0		
Дефект подшипника передней опоры КНД	0		
Дефект подшипника передней опоры КВД	0		

Диагностические правила

**Окно вывода
диагностического
результата
(Почему?)**

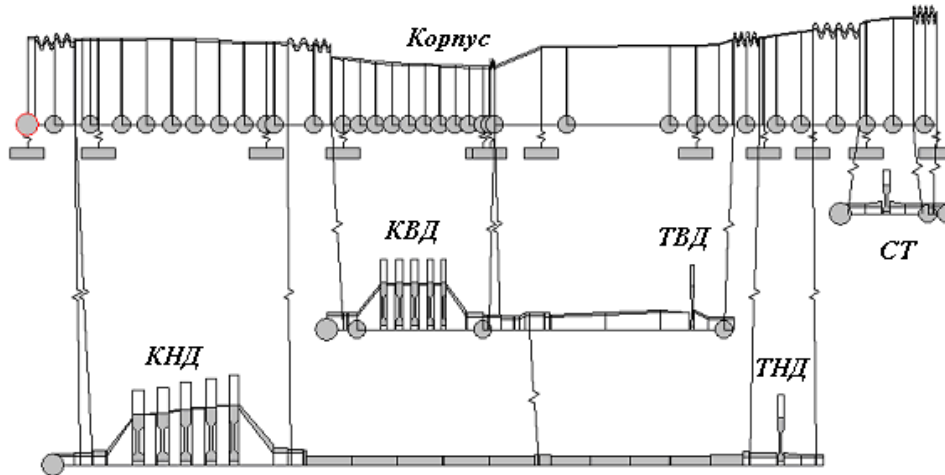
Результат = Вероятность * Весовой коэффициент

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ ГТД

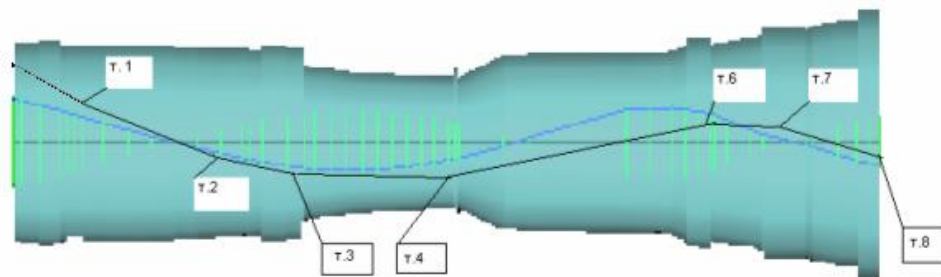
Линейная постановка задачи

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{Q\}$$

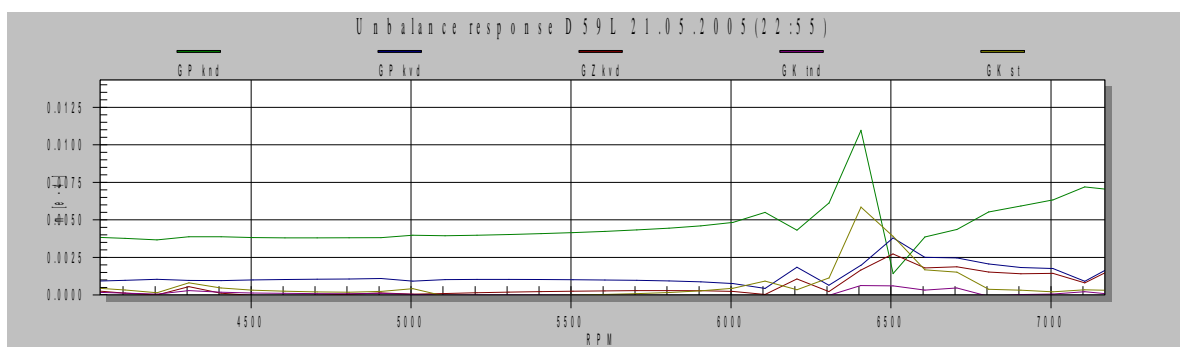
Расчетная модель ДР59Л



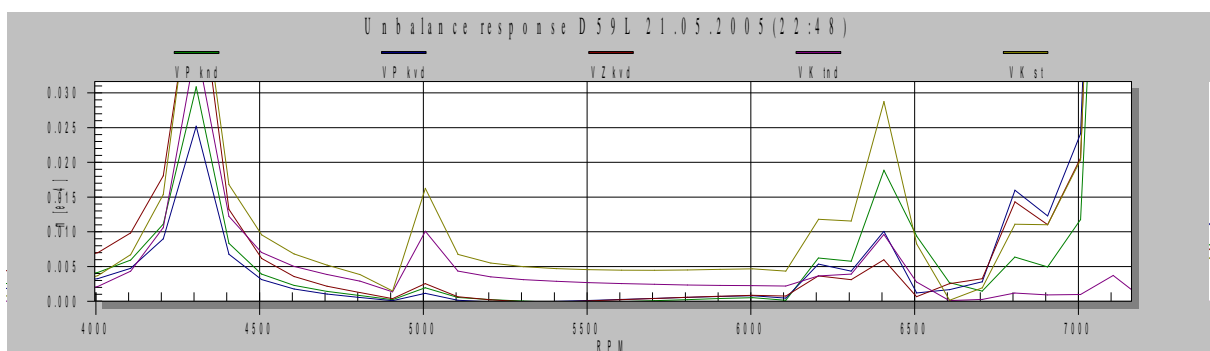
Форма колебаний корпуса на режиме 1N



Дисбаланс КНД

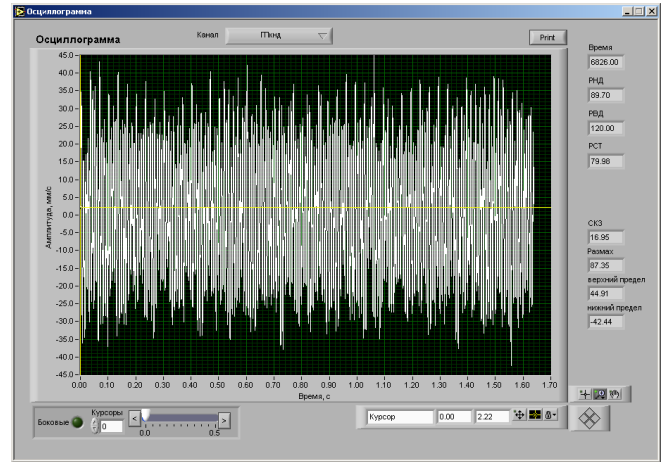
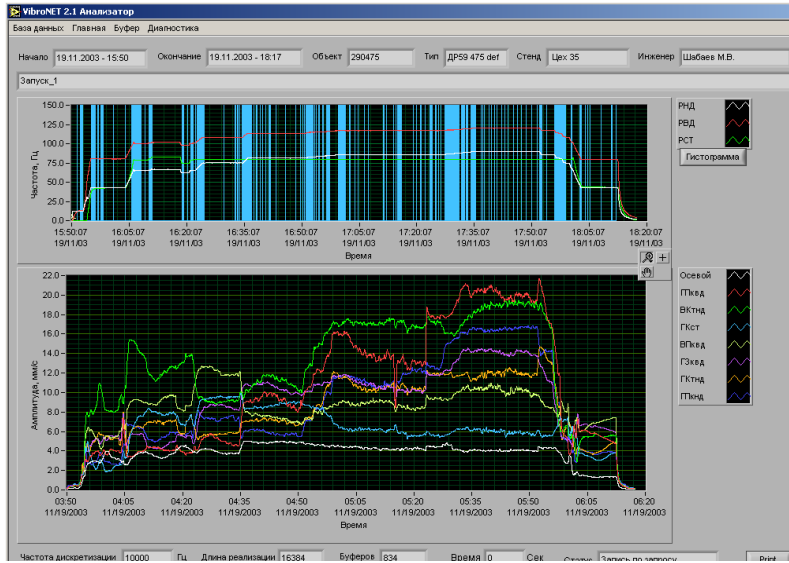


Дисбаланс ТНД

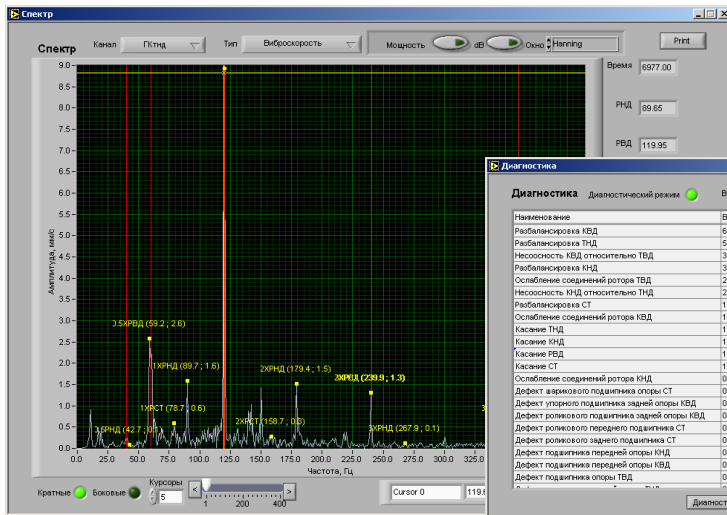


ДИАГНОСТИКА НА СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

ДР59Л № Д00290475 Нарботка 4946 час КС19А Башкирия



Повреждения, обнаруженные после разборки ТВД



Диагностика

Диагностический режим

Время: 20:00:00

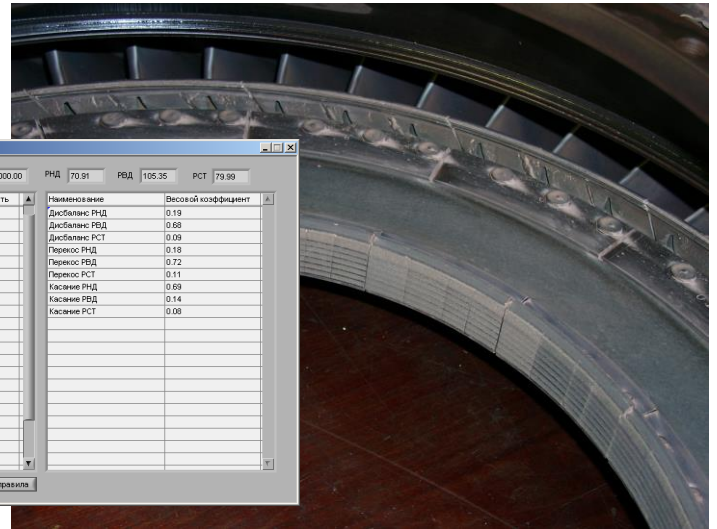
РЧД: 70.91

РВД: 105.35

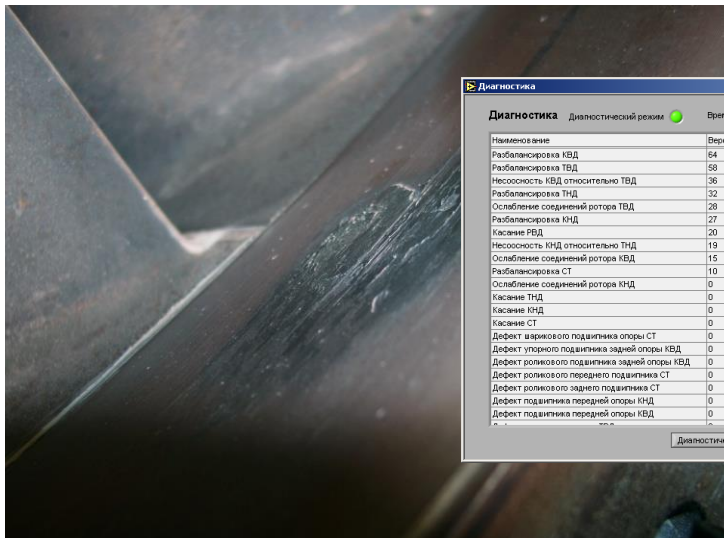
РСТ: 79.99

Наименование	Вероятность	Наименование	Весовой коэффициент
Разбалансировка КВД	68	Дисбаланс РЧД	0.19
Разбалансировка ТВД	62	Дисбаланс РВД	0.68
Несоосность КВД относительно ТВД	33	Дисбаланс РСТ	0.09
Разбалансировка КНД	32	Перекос РЧД	0.18
Ослабление соединений ротора ТВД	22	Перекос РВД	0.72
Несоосность КНД относительно ТНД	21	Перекос РСТ	0.11
Разбалансировка СТ	18	Касание РЧД	0.69
Ослабление соединений ротора КВД	15	Касание РВД	0.14
Касание ТНД	15	Касание РСТ	0.08
Касание КНД	12		
Касание РВД	12		
Касание СТ	10		
Ослабление соединений ротора КНД	0		
Дефект шарнирного подшипника опоры СТ	0		
Дефект шарнирного подшипника опоры КВД	0		
Дефект роликового подшипника задней опоры КВД	0		
Дефект роликового подшипника передней опоры СТ	0		
Дефект роликового подшипника задней опоры СТ	0		
Дефект подшипника передней опоры КНД	0		
Дефект подшипника передней опоры КВД	0		
Дефект подшипника опоры ТВД	0		

Диагностические правила



Повреждения, обнаруженные после разборки ТНД



Диагностика

Диагностический режим

Время: 05:57:00

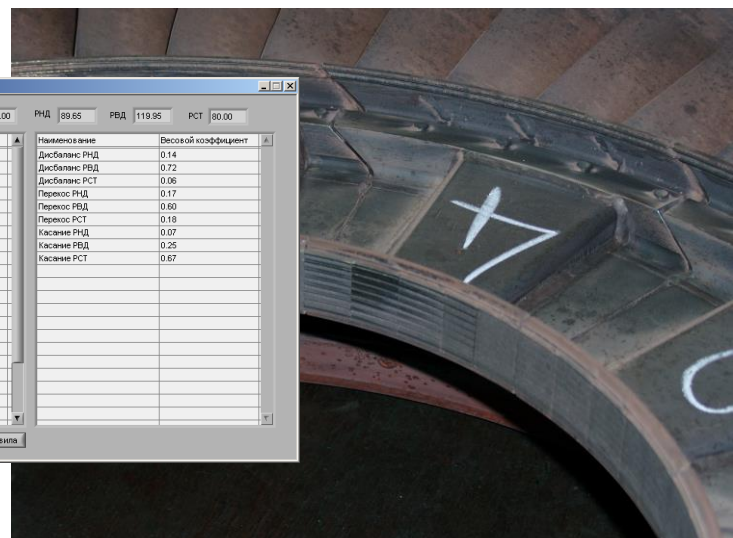
РЧД: 89.65

РВД: 119.95

РСТ: 80.00

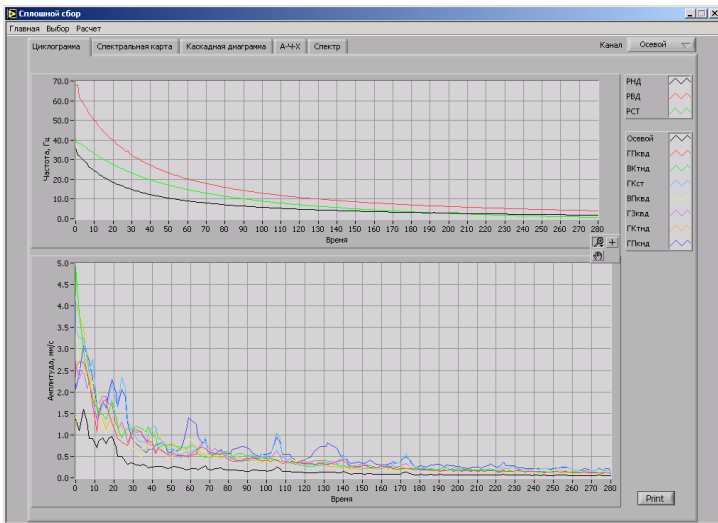
Наименование	Вероятность	Наименование	Весовой коэффициент
Разбалансировка КВД	64	Дисбаланс РЧД	0.14
Разбалансировка ТВД	58	Дисбаланс РВД	0.72
Несоосность КВД относительно ТВД	36	Дисбаланс РСТ	0.06
Разбалансировка ТНД	32	Перекос РЧД	0.17
Ослабление соединений ротора ТВД	28	Перекос РВД	0.60
Разбалансировка КНД	27	Перекос РСТ	0.18
Касание РВД	20	Касание РЧД	0.07
Несоосность КНД относительно ТНД	19	Касание РВД	0.25
Ослабление соединений ротора КВД	15	Касание РСТ	0.67
Разбалансировка СТ	10		
Ослабление соединений ротора КНД	0		
Касание ТНД	0		
Касание КНД	0		
Касание СТ	0		
Дефект шарнирного подшипника опоры СТ	0		
Дефект шарнирного подшипника опоры КВД	0		
Дефект роликового подшипника задней опоры КВД	0		
Дефект роликового подшипника передней опоры СТ	0		
Дефект роликового подшипника задней опоры СТ	0		
Дефект подшипника передней опоры КНД	0		
Дефект подшипника передней опоры КВД	0		
Дефект подшипника опоры ТВД	0		

Диагностические правила

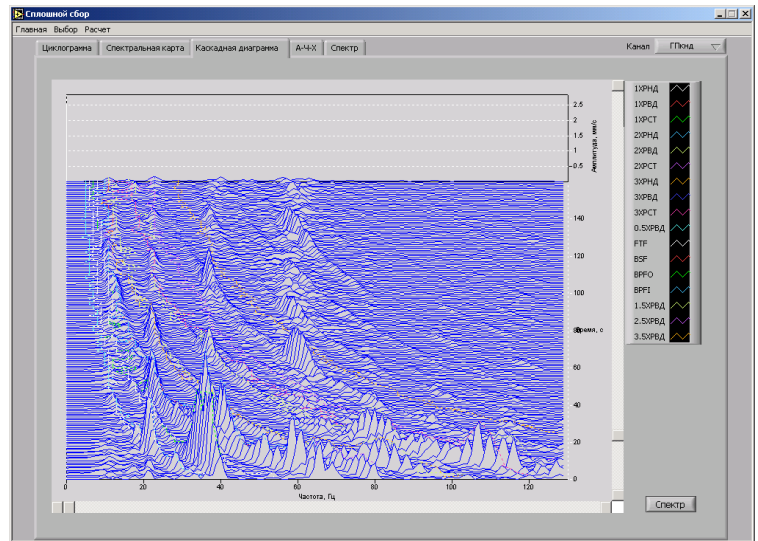


ВЫБЕГ - РЕЗОНАНСНЫЕ РЕЖИМЫ

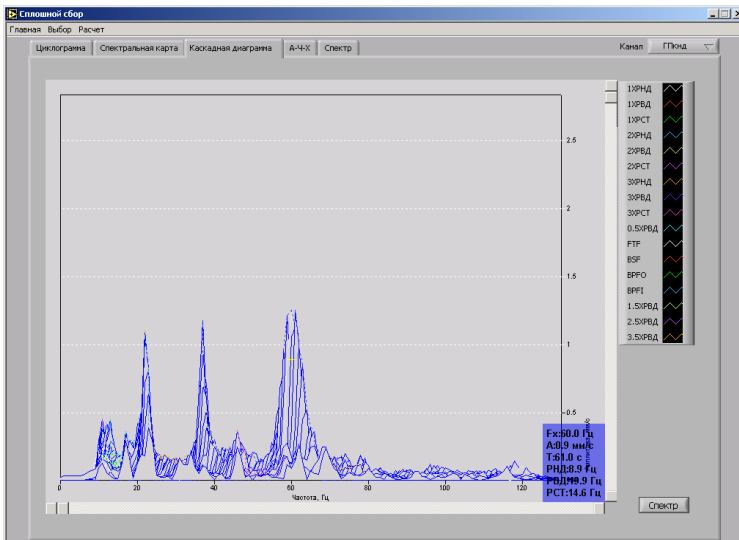
Циклограмма выбега



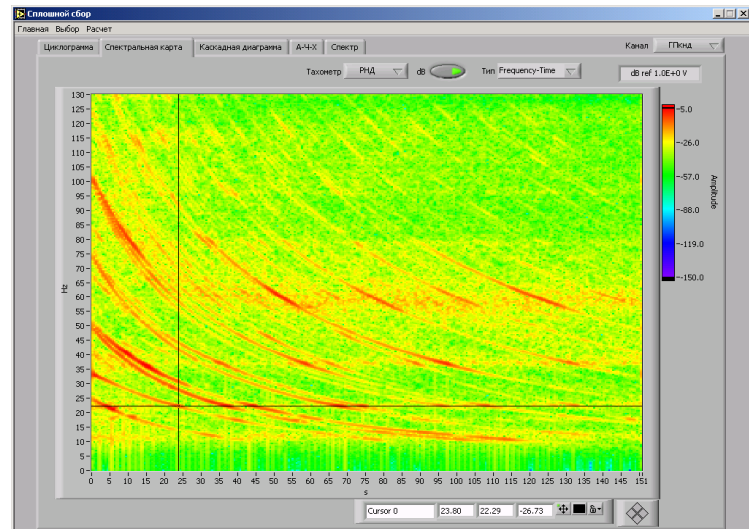
Каскадная диаграмма



Средства анализа – 3D



Спектральная карта



Резонансные режимы ДР59Л № Д00290475

№	Резонансная частота по различным каналам, Гц							
	Осевой	ГПкнд	ГПквд	ВПквд	ГЗквд	ГКтнд	ВКтнд	ГКст
1	11	12..13	11	11...12	11	11	11	11
2	22	17	17	20...21	17	17..18	20	17
3	26	22	22	29	20...22	22	30	22
4	37	37	37	36...37	37	35...37	37...38	37
5	50	47	-	48	47	47	47	-
6	56	59...60	56...57	59	56	-	57	57...58
7	67...76	78...79	-	77	71	69...76	65...70	78...79
8	99	97	90...96	106...107	87...93	92...100	80...106	99
9	120	115...120	116..120	117...120	113...120	113...120	117...120	120
10	-	140	132	-	-	160	150	140
11	-	170	-	-	180	175	176	170

ДИАГНОСТИКА НА ВЫБЕГЕ

17/11/2004

ДР59Л № Д00292120

Шум на выбеге

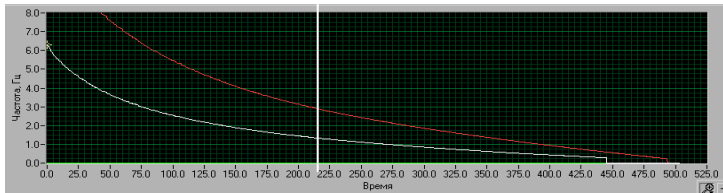
Контролируется:

Время выбега

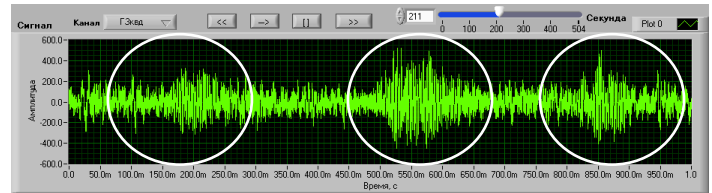
ХП - с 700 об/мин до 0 об/мин: КНД > 360сек, КВД > 460сек

ГЗ - с 1500 об/мин до 500 об/мин: КНД > 56сек, КВД > 104...154сек

Циклограмма выбега



Временной сигнал (211 сек)



Повреждения, обнаруженные после разборки ТВД

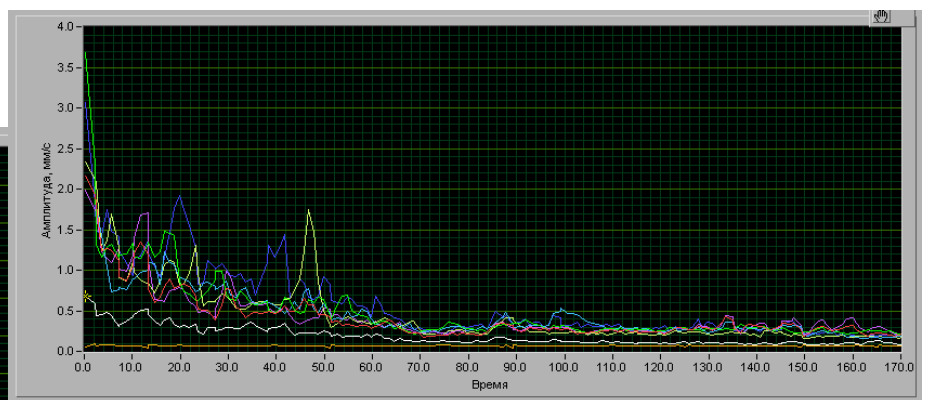
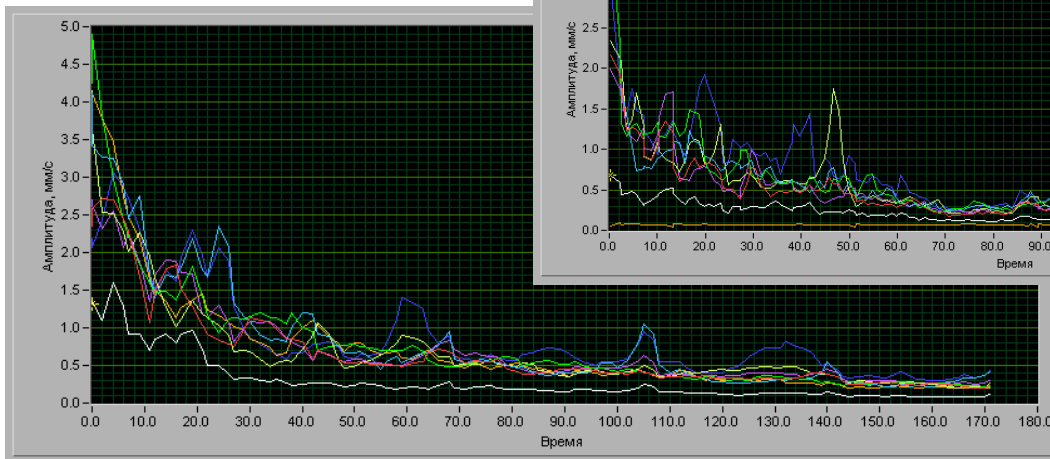


Вибрации на выбеге

- Общий уровень по каналам
- Гармоники

ДР59Л № Д00296535

ДР59Л № Д00290475



ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ НА ВЫБЕГЕ

Подшипники ДР59Л

База данных по подшипникам

Изделие: ДР59

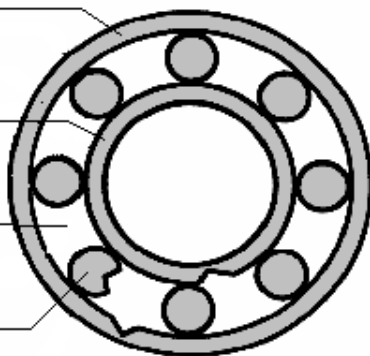
Кнопки: Рассчитать коэффициенты, Добавить, Удалить, Перенести в конфигурацию

Подшипники

ID	Тип	Обозначение	Место установки	d1, mm	D2, mm	Dw, mm	z, шт	α, град	n1	n2	FTF1	FTF2	FTF3	BSF1	BSF2	BSF3	BPF
1	ДР59	шариковый	П.О. КНД, ш	150	225	22.225	22	26	1	0	0.461659	0	0	4.193419	0	0	10.1
2	ДР59	роликовый	З.О. КНД, р	160	240	20	24	0	1	0	0.45	0	0	4.95	0	0	10.8
3	ДР59	321	П.О.КВД, р	160	240	20	24	0	2	0	0	0.45	0	0	4.95	0	0
4	ДР59	32Б	З.О.КВД, р	160	240	20	24	0	2	0	0	0.45	0	0	4.95	0	0
5	ДР59	176	З.О.КВД, ш	160	240	23.812	22	26	2	0	0	0.461489	0	0	4.17465	0	0
6	ДР59	167	промеж, р	120	165	11	30	0	1	2	0.461404	0.538596	0	6.438676	-6.438676	0	13.8
7	ДР59	132	З.О.ТВД, р	160	240	20	24	0	2	0	0	0.45	0	0	4.95	0	0
8	ДР59	БТ2	П.О.ТНД, р	160	240	20	24	0	1	0	0.45	0	0	4.95	0	0	10.8
9	ДР59	103	З.О.ТНД, р	120	200	20	18	0	1	0	0.4375	0	0	3.9375	0	0	7.87
10	ДР59	272	П.О.ТН, р	120	200	20	18	0	3	0	0	0	0.4375	0	0	3.9375	0
11	ДР59	4Б1	З.О.ТН, р	120	200	20	18	0	3	0	0	0	0.4375	0	0	3.9375	0
12	ДР59	Б72	З.О.ТН, ш	120	200	28.575	15	36	3	0	0	0	0.511427	0	0	2.798188	0

Основные подшипниковые частоты

BPFO	Частота мелькания тел качения по наружному кольцу
BPFI	Частота мелькания тел качения по внутреннему кольцу
FTF	Частота вращения сепаратора
BSF	Частота вращения тел качения



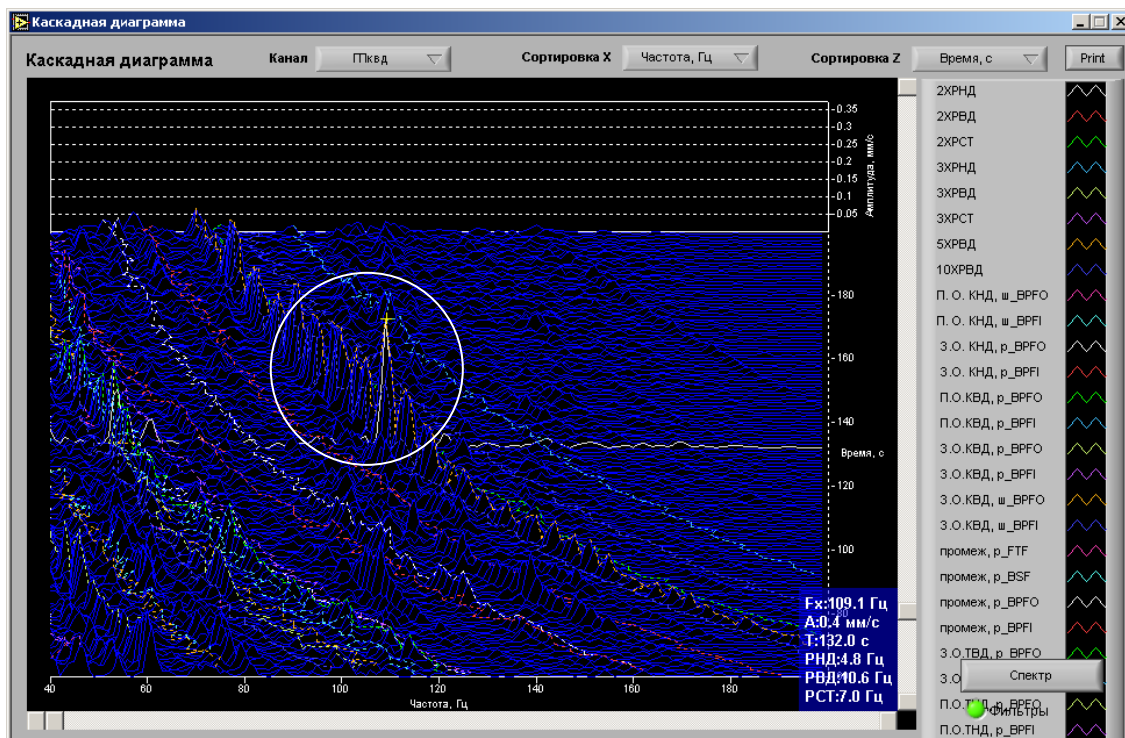
$$bpfo = 0.5 \cdot fr \cdot zrol \cdot \left(1 - \frac{drol}{dcg} \cdot \cos(\alpha) \right)$$

$$bpfi = 0.5 \cdot fr \cdot zrol \cdot \left(1 + \frac{drol}{dcg} \cdot \cos(\alpha) \right)$$

$$ftf = 0.5 \cdot fr \cdot \left(1 - \frac{drol}{dcg} \cdot \cos(\alpha) \right)$$

$$bsf = \left(\frac{dcg}{2 \cdot drol} \right) \cdot fr \cdot \left[1 - \left(\frac{drol}{dcg} \right)^2 \cdot (\cos(\alpha))^2 \right]$$

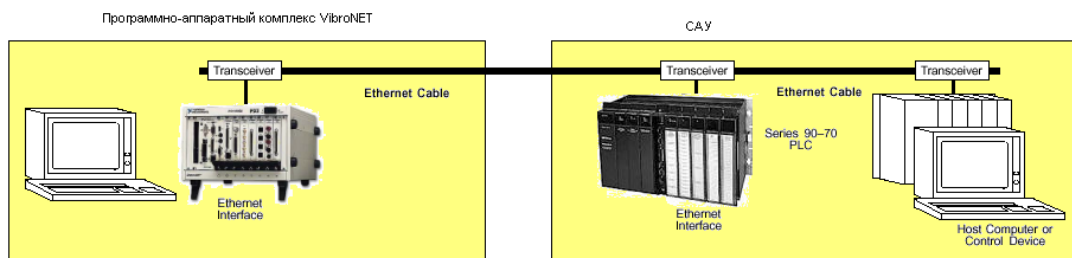
Диагностика подшипников на выбеге



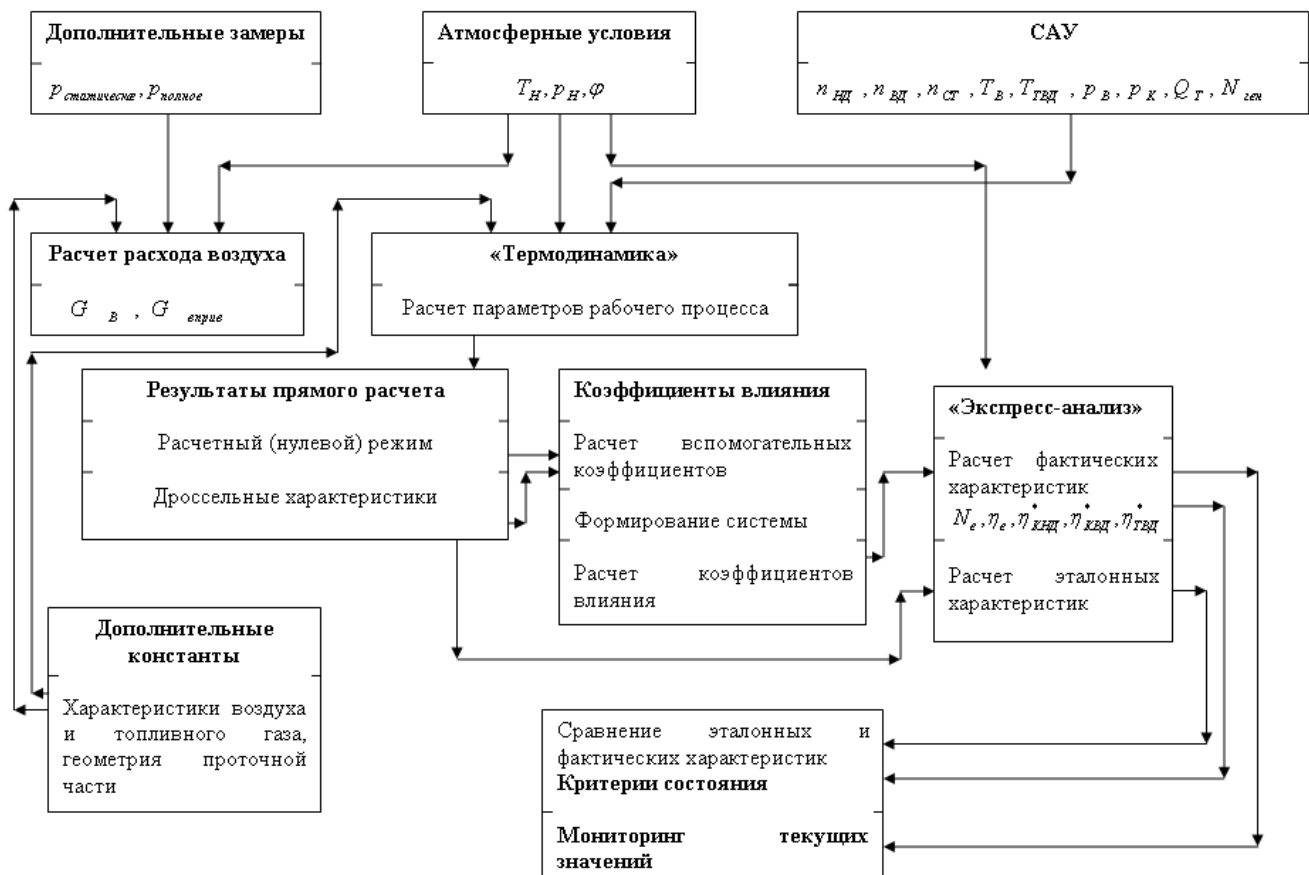
ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Основные задачи

- разработка общей стратегии взаимодействия ремонтного предприятия и КС, при использовании систем параметрической диагностики;
- разработка архитектуры системы параметрической диагностики для решения задач стендовых испытаний
- разработка методов и математических моделей для создания параметрического паспорта двигателя в процессе контрольных испытаний на стенде ОАО “Газтурбосервис”
- разработка методов и математических моделей для определения технического состояния двигателя в условиях ограниченного количества измеряемых параметров на КС
- разработка диагностических алгоритмов оценки состояния проточной части с использованием параметров эффективности двигателя
- разработка программных модулей системы параметрической диагностики для использования как на стенде ОАО “Газтурбосервис”, так и на КС

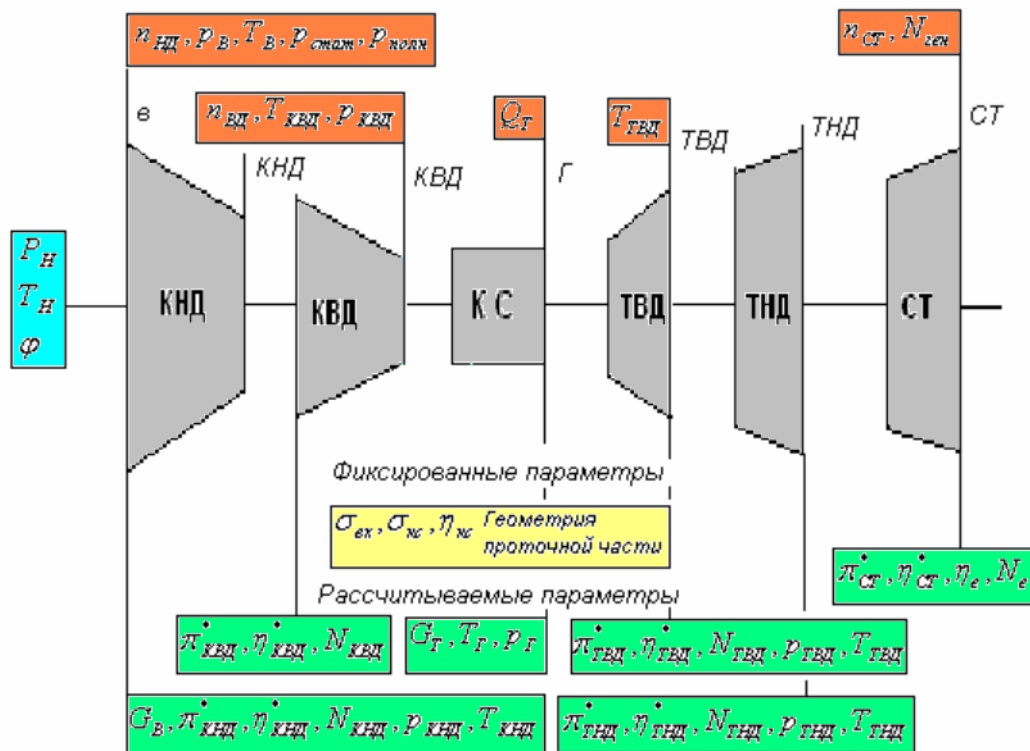


Архитектура системы параметрической диагностики

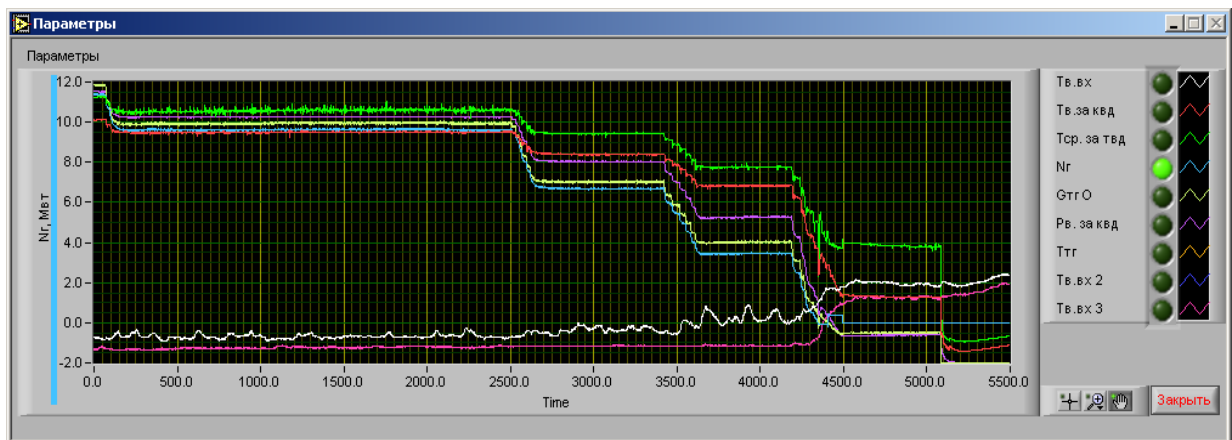


МОДЕЛЬ “ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА – СТЕНД”

Проводимые замеры и рассчитываемые параметры



Параметры САУ



Модели расхода воздуха

Модель 1 Полное давление Плотность воздуха	Модель 2 Полное давление Газодинамические функции	Модель 3 Электрическая мощность генератора
$G_B = \rho_B \cdot Q_B$ $G_B = G_B \cdot \frac{1}{k_\omega^R} \cdot \frac{1,0003}{k_z} \cdot \frac{101325}{P_H} \cdot \sqrt{\frac{T_H}{288}}$	$G_B = 241,6 \cdot q(\lambda) \cdot F_0$	$G_B \cdot C_{pB} \cdot (T_K - T_H) =$ $((G_B + G_T) \cdot C_{pT} \cdot (T_\Gamma - T_{CT}) - N_{CT}) \eta_m$ $T_\Gamma = T_K + \frac{Q \cdot G_T \cdot \eta_{КС}}{G_B \cdot C_{pB}}$

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Основные термодинамические соотношения

$$T_{\Gamma} = T_{КВД} + \frac{Q_{MIN} \cdot G_{\Gamma} \cdot \eta_{KC}^*}{G_B \cdot C_{pB}}$$

$$q_{\Gamma} = \frac{G_{\Gamma}}{G_B}$$

$$N_{ТВД} = G_{\Gamma} \cdot L_{ТВД} = (G_B + G_{\Gamma}) \cdot C_{p\Gamma} \cdot (T_{\Gamma} - T_{КВД})$$

$$N_{КВД} = N_{ТВД} \cdot \eta_{мех}$$

$$T_{КНД} = T_{КВД} - \frac{N_{КВД}}{G_B \cdot C_{pB}}$$

$$P_{КНД} = P_H \cdot \left(\frac{T_{КНД}}{T_H} \right)^{\frac{n_{OK}}{n_{OK}-1}}$$

$$\pi_{КНД}^* = \frac{P_{КНД}}{P_H}$$

$$\pi_{КВД}^* = \frac{P_{КВД}}{P_{КНД}}$$

$$\eta_{КНД}^* = \frac{T_H \cdot \left(\pi_{КНД}^{*k} - 1 \right)}{T_{КНД} - T_H}$$

$$\eta_{КВД}^* = \frac{T_{КНД} \cdot \left(\pi_{КВД}^{*k} - 1 \right)}{T_{КВД} - T_{КНД}}$$

$$N_{ТНД} = \frac{N_{OK}}{\eta_{мех}} - N_{ТВД};$$

$$T_{ТНД} = T_{ТВД} - \frac{N_{ТНД}}{G_{\Gamma} \cdot C_{p\Gamma}}$$

$$T_{СТ} = T_{ТНД} - \frac{N_{ген}}{\eta_{мех} \cdot G_{\Gamma} \cdot C_{p\Gamma}}$$

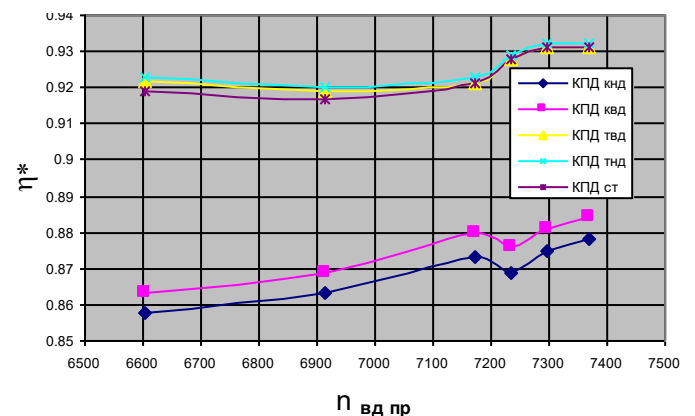
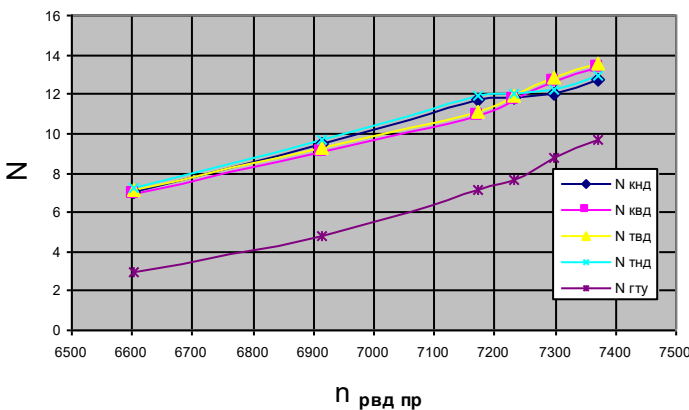
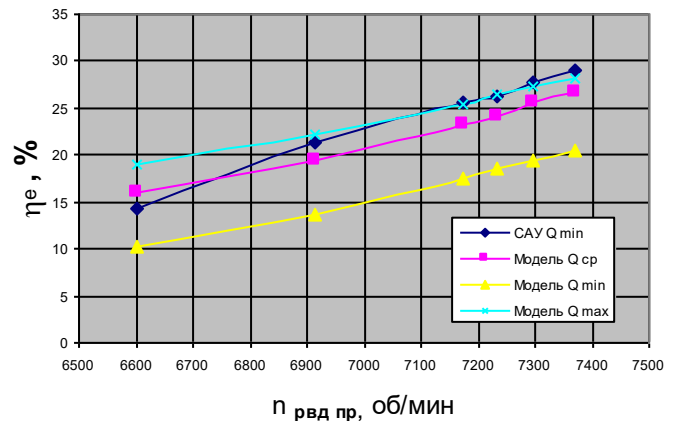
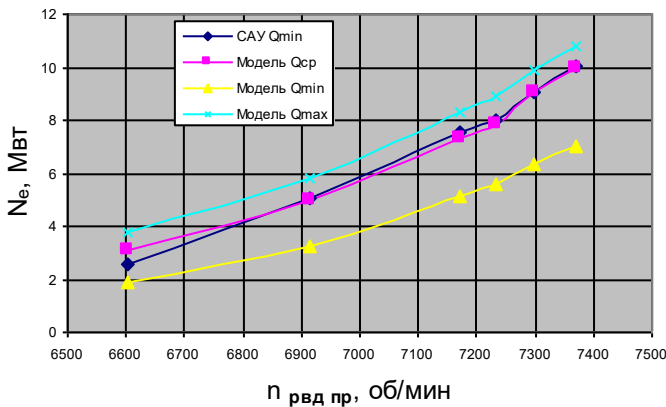
$$\pi_{ТВД}^* = \left(\frac{T_{\Gamma}}{T_{ТВД}} \right)^{\frac{n_{\Gamma}}{n_{\Gamma}-1}};$$

$$\eta_{ТВД}^* = \frac{T_{\Gamma} \cdot \left(1 - \pi_{ТВД}^{*1-k_{\Gamma}} \right)}{T_{\Gamma} - T_{ТВД}}$$

$$N_e = N_{СТ}, N_e = \frac{N_{ген}}{\eta_{мех}}$$

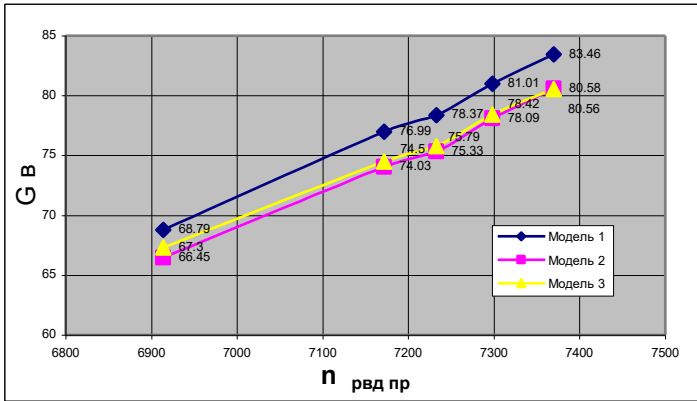
$$\eta_y = \frac{N_e}{G_{\Gamma} \cdot Q_{MIN}}$$

Результаты моделирования (Модель 1)



ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Расход воздуха



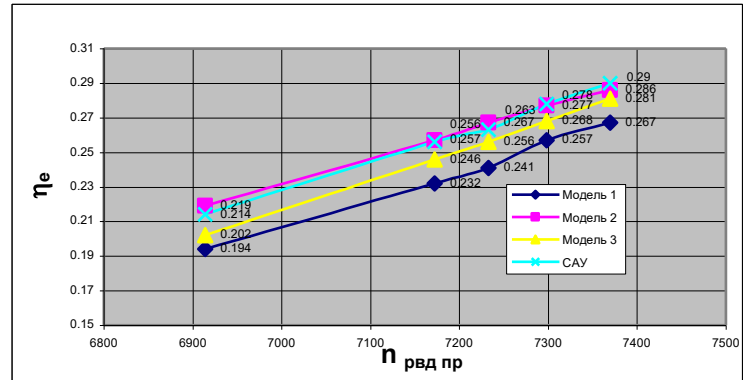
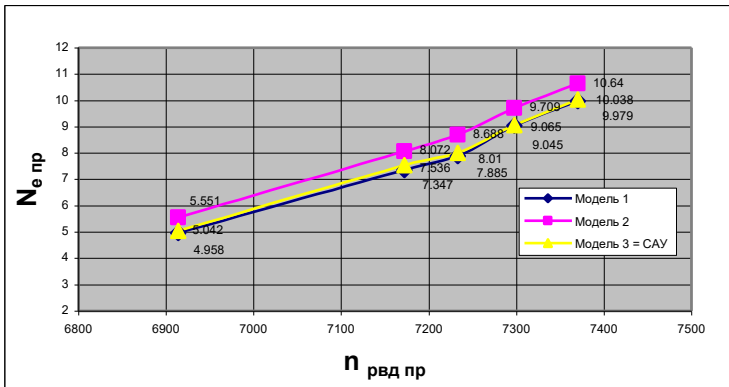
Диагностические признаки

$$K_e = \frac{N_e^H}{N_e^Э}$$

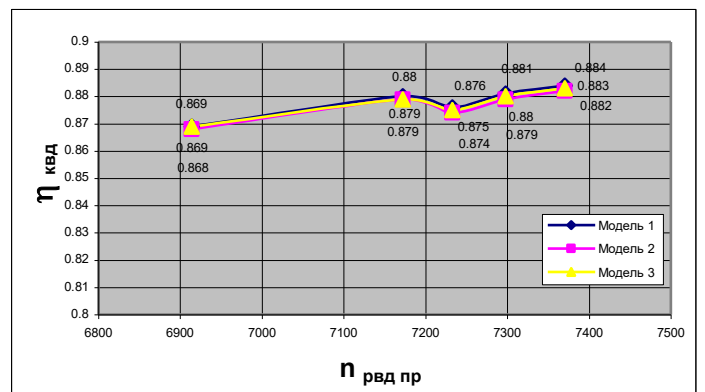
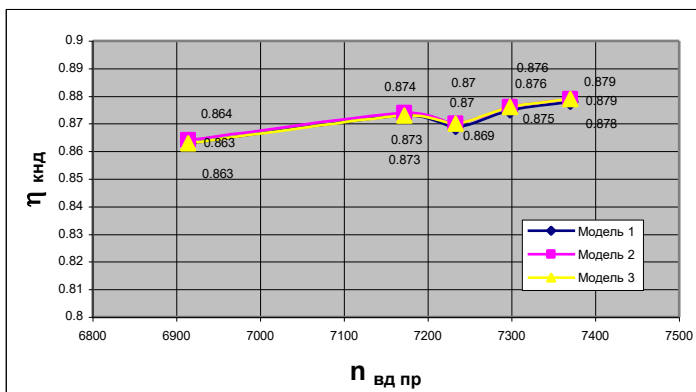
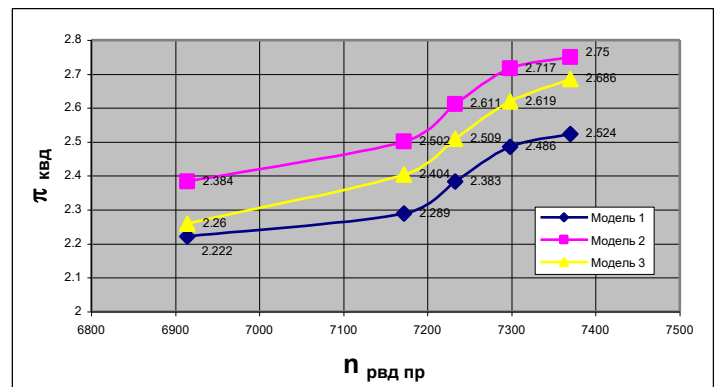
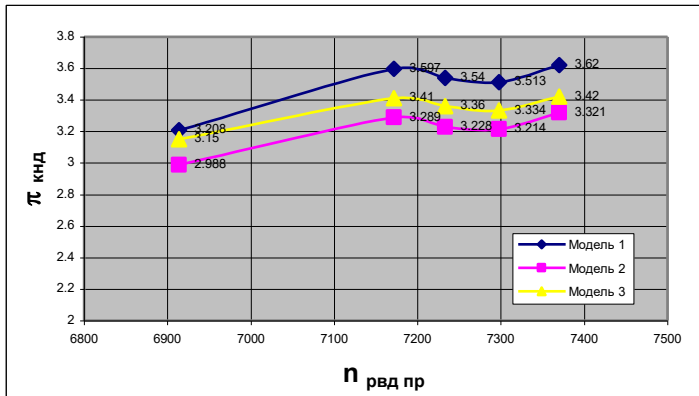
$$K_{КНД} = \frac{\eta_{КНД}^H}{\eta_{КНД}^Э} \cdot \frac{1}{K_e}, \quad K_{ТНД} = \frac{\eta_{ТНД}^H}{\eta_{ТНД}^Э} \cdot \frac{1}{K_e} \dots$$

$$K_{ГТУ} = \frac{\eta_e^H}{\eta_e^Э} \cdot \frac{1}{K_e}$$

Параметры эффективности ГТУ



Параметры эффективности узлов

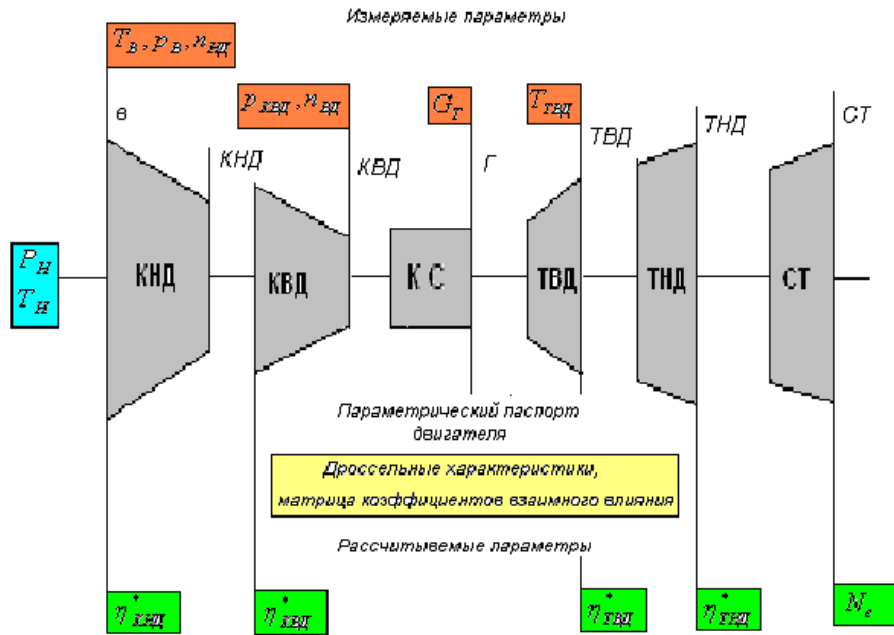


ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ

Дата: «30» сентября 2004 г.			Заводской № двигателя: Д00299017					
№ п/п	Измеряемые параметры	Единицы измерения	Режим работы ГТД					
			0,25 N	0,5 N	0,75 N	0,8 N	0,9 N	1,0 N
Параметры, поступающие с САУ								
1	$n_{КВД}$	об/мин	6627	6944	7198	7238	7316	7395
2	$n_{КНД}$	об/мин	4545	4943	5263	5316	5420	5521
3	$n_{СТ}$	об/мин	4800	4798	4800	4801	4799	4800
4	G_T	нм ³ /ч	1810	2442	3038	3156	3402	3634
5	$N_{ГТД}$	МВт	2,540	5,020	7,520	8,010	9,000	10,050
6	$N_{ГЕН}$	МВт	2,270	4,600	6,960	7,450	8,370	9,350
7	$\eta_{ГТД}$	%	14,5	21,3	25,6	26,3	27,6	28,6
8	T_T	°С	27,1	30,7	30,6	29,7	29,5	29,2
9	$P_{КВД}$	МПа	0,484	0,607	0,716	0,735	0,773	0,812
10	$T_{КВД}$	°С	245,0	273,0	296,0	300,0	307,5	315,0
11	$T_{ТВД}$	°С	426,5	478,3	518,5	524,2	539,6	552,8
12	$T_{ВХ}$	°С	17,6	17,2	16,9	16,7	16,7	16,6
Параметры, регистрируемые вручную								
13	P_H	мм рт.ст.	752					
14	φ	%	60					
Дополнительные замеры								
15	$P_{см1}$	мм вод.ст.	5	7	9	10	10	10
16	$P_{см2}$	мм вод.ст.	8	10	13	13	15	16
17	$P_{см3}$	мм вод.ст.	7	9	10	10	11	11
18	$P_{см4}$	мм вод.ст.	5	9	9	9	10	10
19	P^*_1	мм вод.ст.	264	360	458	477	513	550
20	P^*_2	мм вод.ст.	272	371	469	487	523	562
21	P^*_3	мм вод.ст.	270	368	463	480	517	554
22	P^*_4	мм вод.ст.	265	360	458	477	513	550
23	$T_{СТ1}$	°С	278	292	308	309	314	317
24	$T_{СТ2}$	°С	271	293	305	307	313	317
25	$T_{СТ3}$	°С	271	292	310	309	312	317
26	$T_{СТ4}$	°С	281	295	307	309	311	316
Характеристики топливного газа								
27	Q_{MIN}	ккал/м ³	7920					
28	Q_{MAX}	ккал/м ³	8790					
29	ρ	кг/м ³	0,6861					
Параметры, полученные расчетом								
32	G_B	кг/с	59,34	69,48	77,63	78,98	81,63	84,20
34	$\eta^*_{КНД}$		0,849	0,861	0,866	0,866	0,868	0,869
39	$\eta^*_{КВД}$		0,860	0,871	0,876	0,875	0,876	0,877
45	$\eta^*_{ТВД}$		0,893	0,904	0,912	0,916	0,924	0,928
49	$\eta^*_{ТНД}$		0,897	0,907	0,915	0,919	0,926	0,930
54	$\eta^*_{СТ}$		0,889	0,902	0,912	0,916	0,924	0,929
55	η_e		0,118	0,175	0,216	0,225	0,244	0,258
61	N_e	МВт	2,179	4,367	6,710	7,256	8,481	9,566

МОДЕЛЬ “ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА – КС”

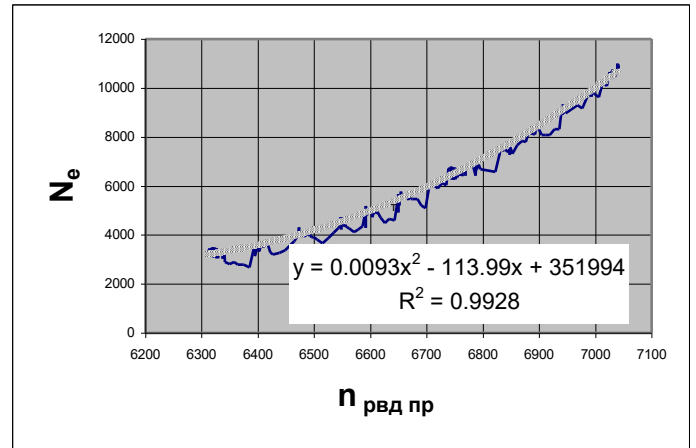
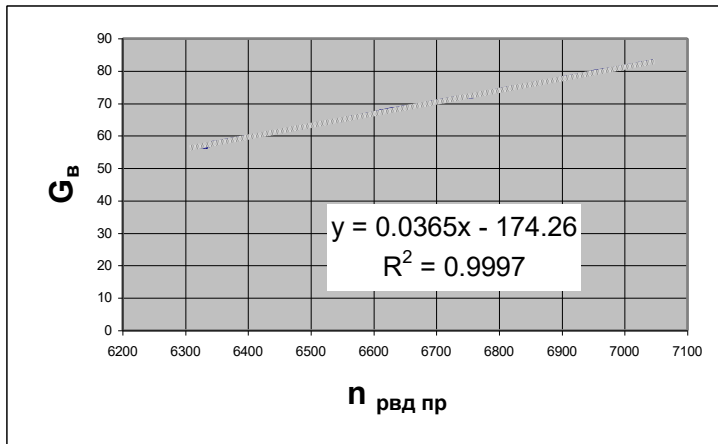
Проводимые замеры и рассчитываемые параметры



Дроссельные характеристики ГТУ

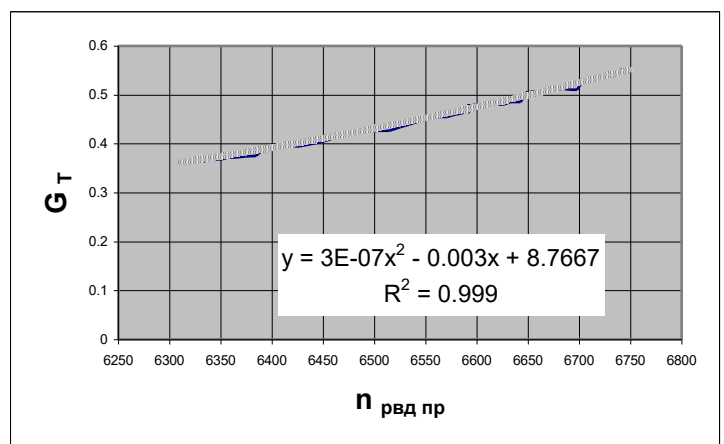
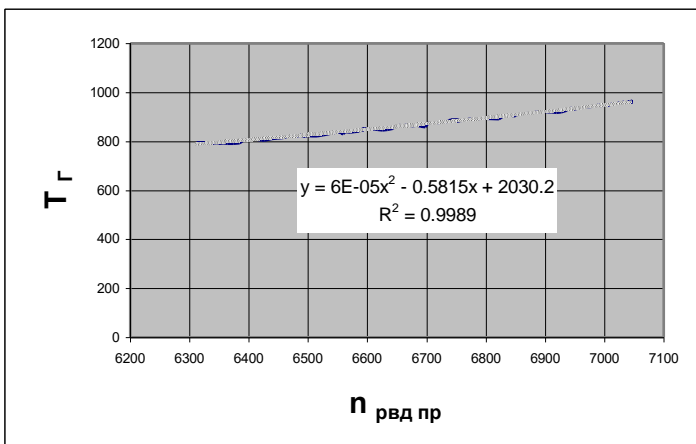
Расход воздуха

Мощность СТ



Температура Т_Г

Расход топлива



МЕТОД МАЛЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

$$P_i = f(x_1, x_2 \dots x_k); k = 1 \dots k$$

$$P_\phi = \left[1 + \left(\frac{\delta P}{\delta x_1} \right) \cdot \delta x_1 + \left(\frac{\delta P}{\delta x_2} \right) \cdot \delta x_2 + \dots + \left(\frac{\delta P}{\delta x_k} \right) \cdot \delta x_k \right] \cdot P_0$$

Основные уравнения

Связь давлений в основных сечениях двигателя

$$\delta \pi_{СТ}^* = \delta \pi_{КНД}^* + \delta \pi_{КВД}^* - \delta \pi_{ТВД}^* - \delta \pi_{ТНД}^*,$$

Баланс мощности на роторе НД

$$A_n \cdot \delta n_{НД} + A_l \cdot \delta \pi_{КНД}^* - \delta \eta_{КНД}^* + (1 - 0,5 \cdot A_n) \cdot \delta T_B = \delta T_{ТВД} + A_3 \cdot \delta \pi_{ТНД}^* + \delta \eta_{ТНД}^*;$$

Баланс мощности на роторе ВД

$$B_n \cdot \delta n_{ВД} + B_l \cdot \delta \pi_{КВД}^* - \delta \eta_{КВД}^* + (1 - 0,5 \cdot B_n) \cdot \delta T_{КНД} = \delta T_\Gamma + B_3 \cdot \delta \pi_{ТВД}^* + \delta \eta_{ТВД}^*;$$

Уравнения неразрывности потока

$$A_m \cdot \delta n_{НД} - (1 - A_{10}) \cdot \delta \pi_{КНД}^* - 0,5 \cdot (1 + A_m) \cdot \delta T_B = B_m \cdot \delta n_{ВД} + B_{10} \cdot \delta \pi_{КВД}^* - 0,5 \cdot (1 + B_m) \cdot \delta T_{КНД};$$

$$A_m \cdot \delta n_{НД} - (1 - A_{10}) \cdot \delta \pi_{КНД}^* - 0,5 \cdot (1 + A_m) \cdot \delta T_B = \delta q(\lambda_{CA})_{ТВД} + \delta \pi_{КВД}^* - 0,5 \cdot \delta T_\Gamma;$$

$$(1 - 0,5 \cdot B_3 \cdot B_4) \cdot \delta \pi_{ТВД}^* - 0,5 \cdot B_4 \cdot \delta \eta_{ЕВД}^* = \delta q(\lambda_{CA})_{ТВД} - \delta q(\lambda_{CA})_{ТНД};$$

$$(1 - 0,5 \cdot A_3 \cdot A_4) \cdot \delta \pi_{ТНД}^* - 0,5 \cdot A_4 \cdot \delta \eta_{ТНД}^* = \delta q(\lambda_{CA})_{ТНД} - \delta q(\lambda_{CA})_{СТ};$$

Изменение расхода топлива в камере сгорания

$$A_m \cdot \delta n_{НД} + A_{10} \cdot \delta \pi_{КНД}^* + \delta p_B - 0,5 \cdot (1 + A_m) \cdot \delta T_B + K_5 \cdot \delta T_\Gamma - (K_5 - 1) \cdot \delta T_{КВД} = \delta G_T.$$

Матричное представление

$\delta Y = M \cdot \delta X$, M - матрица коэффициентов влияния

$$\delta X = \left\{ \delta T_B, \delta p_B, \delta \pi_{КС}^*, \delta p_{КВД}, \delta T_{ТВД}, \delta n_{НД}, \delta n_{ВД}, \delta G_T \right\}^T$$

$$\delta Y = \left\{ \delta \eta_{КНД}^*, \delta \eta_{КВД}^*, \delta \eta_{ТВД}^*, \delta \eta_{ТНД}^*, \delta \pi_{КВД}^* \right\}^T$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Измеренные и рассчитанные отклонения для режима 1N

$$\delta X = \{\delta n_{НД}, \delta n_{ВД}, \delta \pi_{КС}^*, \delta T_{ТВД}, \delta T_B, \delta P_B, \delta G_T\}^T =$$

$$\{-0.017, -0.01, -0.044, -0.017, 0, 0, -0.057\}^T$$

Характеристики турбин

$$q(\lambda_{CA}) = Const$$

$$\delta Y = \{\delta \eta_{КНД}^*, \delta \eta_{КВД}^*, \delta \eta_{ТВД}^*, \delta \eta_{ТНД}^*, \delta \pi_{КВД}^*\}^T =$$

$$\{-0.004, 0.087, -0.075, 0.006, 0.026\}^T$$

$$q(\lambda_{CA}) = a \cdot \delta \pi_T^*$$

$$\delta Y = \{0.001, -0.03, 0.021, -0.008, -0.024\}^T$$

Эффективные мощность и КПД

$$\delta G_{B_{КВД}} = B_m \cdot \delta n_{ВД} + B_{10} \cdot \delta \pi_{КВД}^* + \delta \pi_{КНД} + \delta p_H - 0,5 \cdot (1 + B_m) \cdot \delta T_{КНД}$$

$$\delta L_{СТ} = \delta T_{ТНД} + C_3 \cdot \delta \pi_{СТ}^* + \delta \eta_{СТ}^*$$

$$\delta N_e = \delta G_B + \delta L_{СТ},$$

$$\delta \eta_e = \delta N_e - \delta G_T,$$

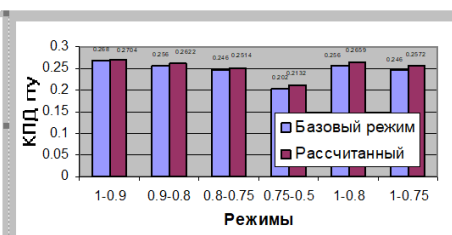
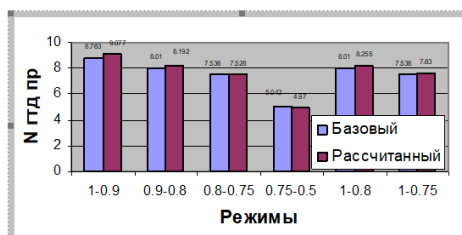
$$N_e = N_{e0} \cdot (1 + \delta N_e)$$

$$\eta_e = \eta_{e0} \cdot (1 + \delta \eta_e)$$

Оценка точности

КПД

Расход воздуха



Эффективная мощность ГТУ

Эффективный КПД ГТУ

