

ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ SIEMENS V64.3A НА ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ И ПОД НАГРУЗКОЙ ПРИ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ПОТЕРЯНСКИЙ Л.И., ПОТЕРЯНСКИЙ С.Л.

ЗАО «КВАРЦ–Западная Сибирь», ООО «Тюменьинжиниринг»

Представлены результаты исследований вибрационного состояния газотурбинной установки (ГТУ) блока № 1 ПГУ 195 МВт Тюменской ТЭЦ-1. Исследования проводились в 2004 году (с 24.02.2004 г. по 28.06.2004 г.) в период пуско-наладочных работ после монтажа установки и дальнейшей ее опытно-промышленной эксплуатации.

ГТУ состоит из газовой турбины V64.3A Siemens (рис.1), мощностью 70 МВт и частотой вращения 5413 об/мин, понижающего редуктора и генератора ТЗФГ-63-2У3 «Электросила», смонтированных на виброизолированном фундаменте.

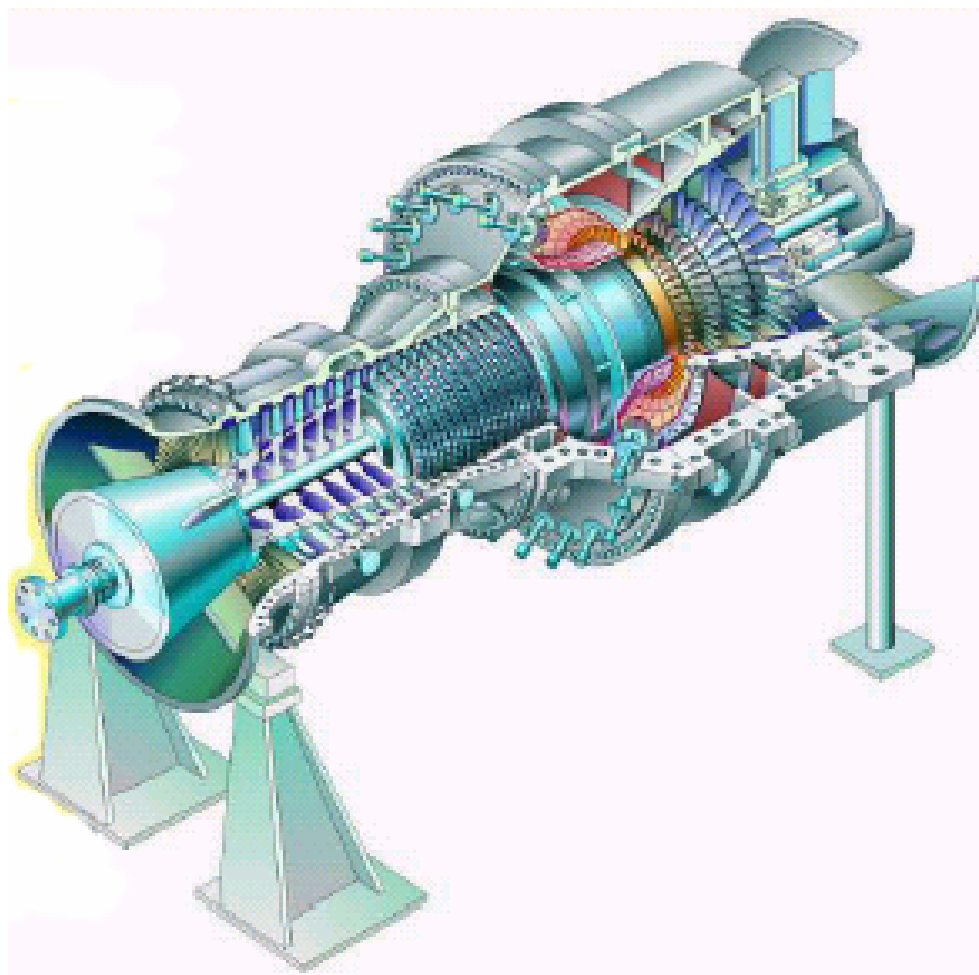


Рис. 1. Газовая турбина Siemens V64.3A.

Задачей вибрационных исследований являлось выявление и распознавание опасных колебаний, источников и причин появления этих колебаний.

Исследование вибрационного состояния ГТУ производилось с помощью переносной 16-ти канальной аппаратуры МІС-300М, производства фирмы НПП «МЕРА» г. Королев.

Аппаратура МІС-300М является измерительно-вычислительным комплексом для измерения, регистрации и анализа параметров вибрационных процессов со встроенными функциями записи/воспроизведения и экспресс-анализа быстропеременных аналоговых сигналов одновременно по 16 независимым измерительным каналам.

Обработка записанной информации, с расчетом необходимых вибрационных параметров, осуществлялись с помощью специальной программы «WinПОС-Expert» (НПП «МЕРА» г. Королев). Особенности программы WinПОС-Expert являются:

- пакетная обработка данных;
- более 50 алгоритмов обработки сигналов;
- мощный графический интерфейс (2D и 3D);
- средства оформления графиков и подготовки отчетов;
- анализ динамических процессов;
- пакет расчета и анализа любых вибрационных параметров и их характеристик (трендов, АФЧХ, каскадных спектров и др.);
- поддержка сценариев (VBSkript).

Вибрационное состояние ГТУ исследовалось на режимах пуска, выбега, холостого хода и под нагрузкой. Схема ГТУ и точек измерения вибрации представлены на рисунке 2.

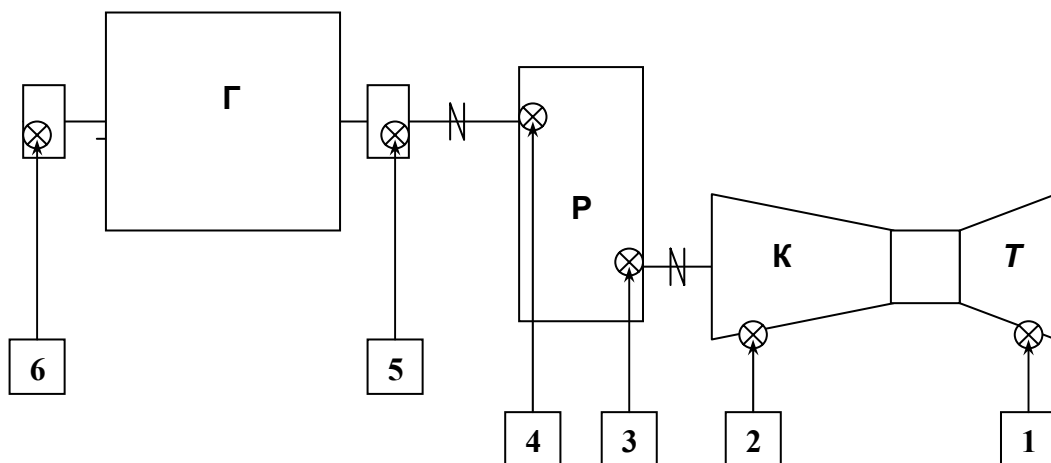


Рис. 2. Схема ГТУ и точек измерения вибрации.

На схеме обозначены: Т – турбина; К – компрессор; Р – редуктор; Г – генератор.

Точки измерения вибрации ГТУ:

- 1 – корпус турбины, на фланце горизонтального разъема, в плоскости расположения подшипника и опор корпуса газовой турбины;
- 2 – корпус компрессора, на фланце горизонтального разъема, в плоскости расположения подшипника и опоры корпуса компрессора;
- 3 – корпус редуктора со стороны компрессора, в месте расположения подшипника ведущего (высокооборотного) вала, на уровне горизонтального разъема корпуса и крышки редуктора;
- 4 - корпус редуктора со стороны генератора, в месте расположения подшипника ведомого (низкооборотного) вала, на уровне горизонтального разъема корпуса и крышки редуктора;
- 5 – передний подшипник генератора (со стороны редуктора), на уровне горизонтального разъема корпуса и крышки подшипника;
- 6 – задний подшипник генератора, на уровне горизонтального разъема корпуса и крышки подшипника.

Измерение вибрации производилось в вертикальном - **v**, поперечном – **p** и аксиальном – **a** направлениях. Запись вибрационных сигналов осуществлялась синхронно с частотой дискретизации $F_s = 21\,333$ Гц, что позволяет производить спектральный анализ вибрации в диапазоне до 10 000 Гц.

Общая характеристика вибрационного состояния ГТУ

При первых пусках ГТУ были выявлены специфические особенности виброактивности газовой турбины V64.3A Siemens на режимах пуска, холостого хода и выбега. На рисунке 3 изображены тренды среднеквадратических значений (СКЗ) виброскорости V_e и виброускорения A_e опор турбины и компрессора при пуске ГТУ на режимах набора оборотов и холостого хода.

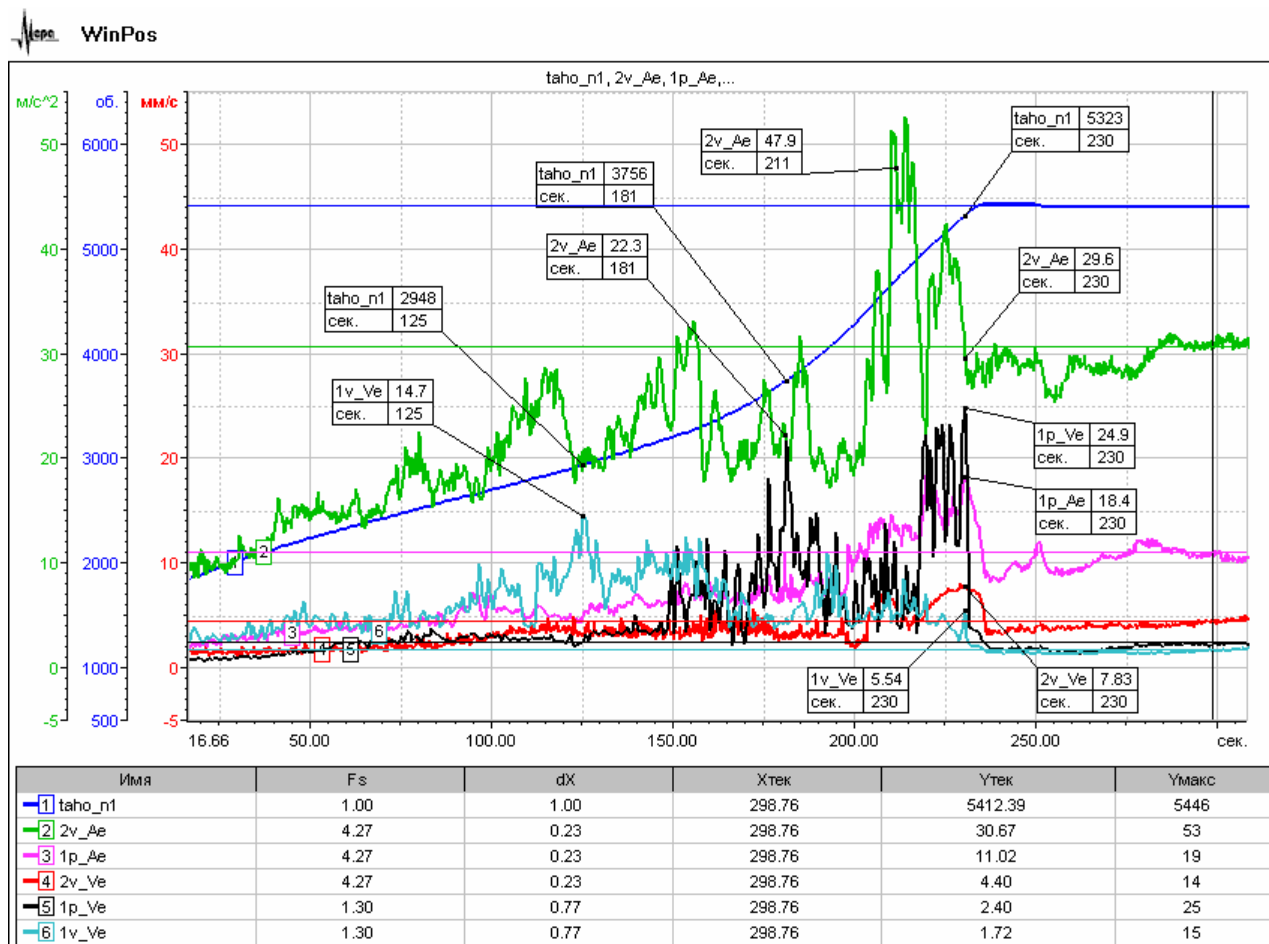


Рис.3. Изменение СКЗ виброскорости V_e и виброускорения A_e опор турбины и компрессора при пуске ГТУ

При наборе оборотов до номинальной частоты вращения, наблюдается высокий уровень вибрации опор турбины и компрессора (СКЗ виброскорости $V_e = 8 - 25$ мм/с, СКЗ виброускорения $A_e = 10 - 50$ м/с²); характер вибрации – нестабильный, с хаотичными колебаниями уровня вибрации, не связанными с частотой вращения ротора. В нескольких случаях высокий уровень вибрации газовой турбины на режимах набора оборотов приводил к останову ГТУ защитой по предельному уровню вибрации (14,7 мм/с). При выходе на режим холостого хода, уровень вибрации резко снижался в 4 – 5 раз до значений $V_e = 2,0 - 4,0$ мм/с.

На режимах холостого хода была выявлена большая нестабильность вибрационного состояния опоры компрессора. Изменение общего уровня вибрации V_e составляло от 3 мм/с до 10 - 15 мм/с, что в некоторых случаях вызывало срабатывание защиты по повышению уровня вибрации. При последующем анализе было установлено, что определяющий вклад в изменение вибрации опоры компрессора вносила составляющая вибрации оборотной частоты. Характер изменения вибрации на режиме холостого хода зависел от исходного (холодного или горячего) состояния ГТУ перед пуском: при пусках ГТУ из холодного состояния уровень оборотной составляющей вибрации увеличивался в течение 5-и минут с

2,0 мм/с до (10 – 15) мм/с, а при пусках ГТУ из горячего состояния уровень оборотной составляющей вибрации изменялся от 1,0 мм/с до 4,0 мм/с (рис.4).

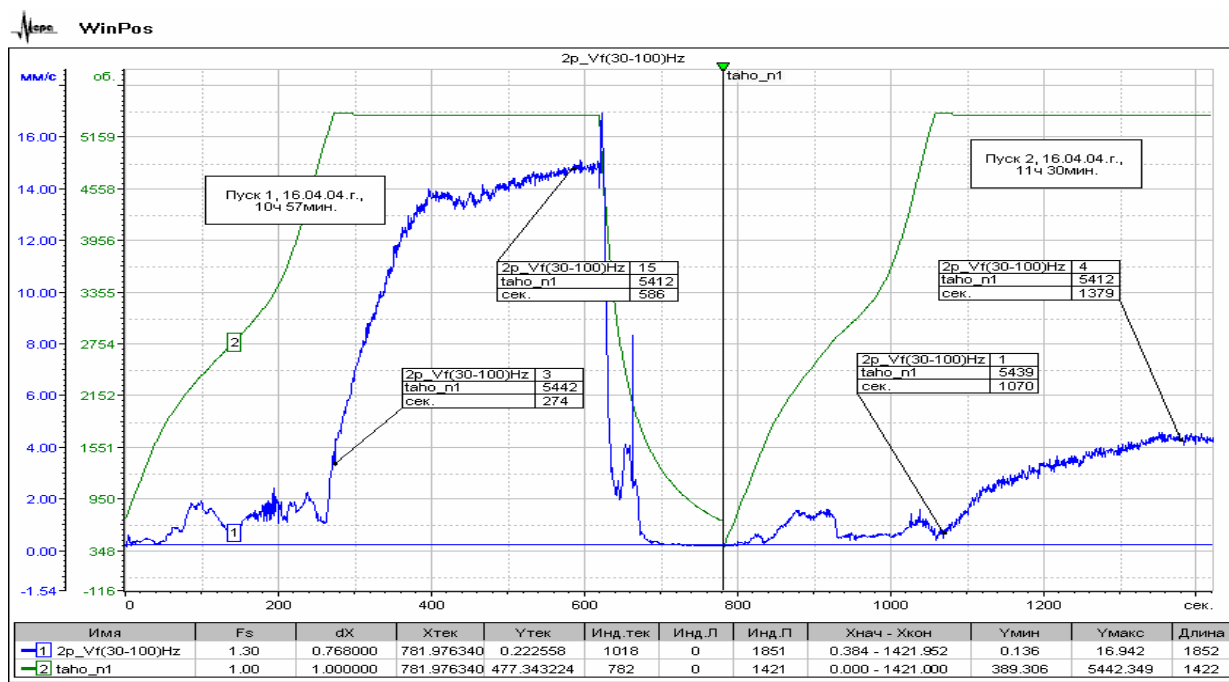


Рис.4. Изменение уровня оборотной вибрации опоры компрессора при пусках ГТУ из холодного и горячего состояния:

пуск 1, 16.04.04.г., 10ч.57 мин. – пуск из холодного состояния;

пуск 2, 16.04.04.г., 11ч.30 мин. – повторный пуск из горячего состояния.

Особенностью вибрационного состояния генератора является повышенный уровень вибрации до 200 мкм опор генератора в аксиальном направлении при критической частоте вращения (25 Гц) ротора генератора (РГ), а также при совпадении частоты вращения РГ с резонансной частотой (31 Гц) опор.

Анализ вибрационных характеристик ГТУ на режимах холостого хода

В таблице 1 приведены максимальные значения параметров вибрации ГТУ при номинальной частоте вращения на режимах холостого хода, за период проведения наладочных пусков (с 25.02.04 г. по 28.06.04 г.).

Высокий уровень СКЗ виброускорения ($A_e = 15 - 43 \text{ м/с}^2$) опор газовой турбины и компрессора свидетельствует о существовании довольно значительных вибродинамических процессов, происходящих в ГТУ и являющихся источником высокочастотных колебаний, с частотами свыше 1000 Гц. Полученные спектральные характеристики вибрации опор компрессора и турбины подтвердили наличие широкого спектра частот, который занимает диапазон от 5 Гц до 8000 Гц.

Таблица 1. Вибрация ГТУ при номинальной частоте вращения.

Точка измерения		Общий уровень			1-я гармоника			2-я гармоника	
		a_e	V_e	S_r	V_{e1}	S_{r1}	φ	V_2	S_2
		м/с ²	мм/с	мкм	мм/с	мкм	град	мм/с	мкм
№ 1	1v	15,44	3,31	113	2,13	11	103	0,17	0,42
	1p	11,03	3,62	115	1,65	9	336	0,07	0,17
№ 2	2v	33,65	13,50	127	9,97	51	11	1,47	3,66
	2p	43,80	15,30	183	3,87	19	294	0,51	2,31
	2a	32,65	12,70	96	12,12	60	32	0,93	2,31
№ 3	3v	5,84	2,92	32	1,07	10	322	0,10	0,40
	3p	3,70	2,00	40	1,41	7	30	0,13	0,31
№ 4	4v	3,49	3,59	36	0,96	9	257	0,28	1,0
	4a	4,87	5,56	64	5,45	52	140	0,01	0,30
№ 5	5v	2,00	2,75	29	2,52	26	111	1,08	4,80
	5p	2,10	3,65	33	2,23	21	285	1,81	7,80
	5a	1,27	3,59	36	2,32	22	290	0,40	1,80
№ 6	6v	2,01	3,15	18	0,52	5	328	0,85	3,30
	6p	3,93	4,95	53	4,53	45	333	0,71	2,80
	6a	1,52	2,61	25	2,00	18	292	0,31	1,30

На режимах холостого хода ГТУ спектры частот вибрации опор турбины и компрессора состоят преимущественно из гармонических составляющих, кратных частоте вращения ротора турбины (90,2 Гц); преобладающие частоты – это частоты, соответствующие гармоникам, кратным числу рабочих лопаток турбины и компрессора (рис.5 и 6).

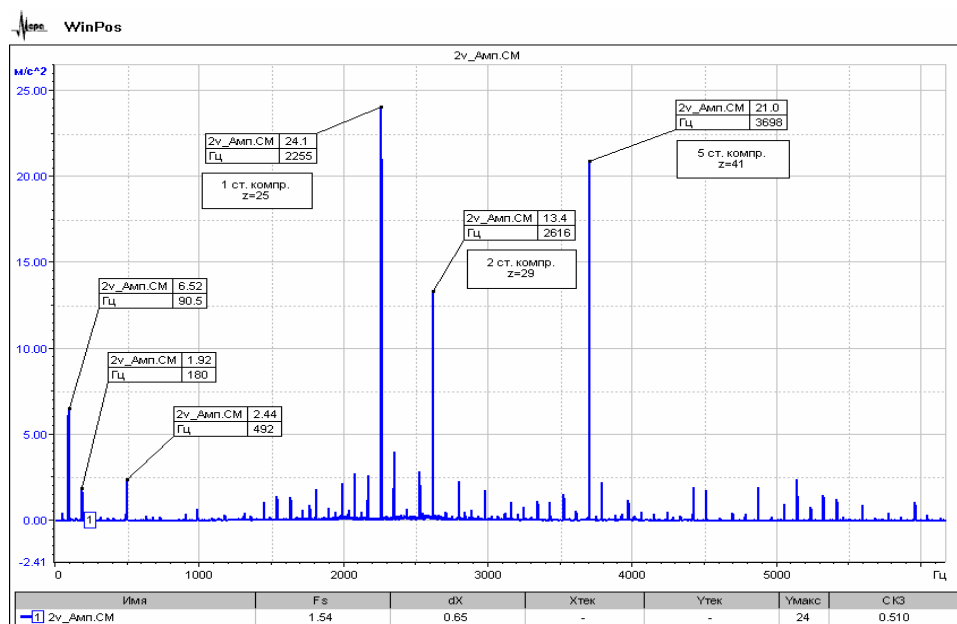


Рис.5. Пуск 3, 23.05.04г. Спектр вибрации (СКЗ виброускорения – A_e) опоры компрессора в вертикальном направлении на холостом ходу.

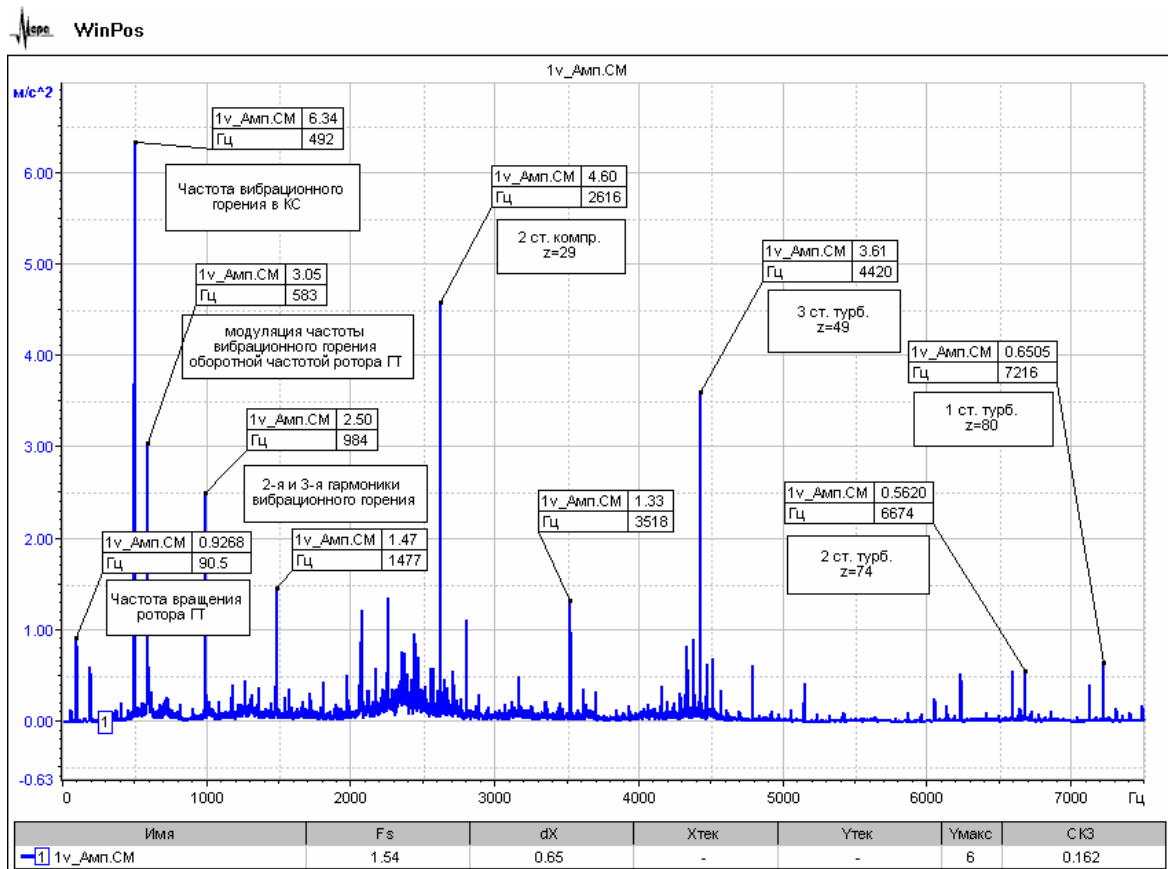


Рис.6. Пуск 3, 23.05.04г. Спектр вибрации (СКЗ виброускорения –Ае) опоры турбины в вертикальном направлении на холостом ходу.

Анализ высокочастотных колебаний опор газовой турбины V64.3А в амплитудно-частотной и временной областях дает основания диагностировать их, как вибрацию аэродинамического происхождения. Эта вибрация обуславливается в основном двумя причинами: неидентичностью аэродинамических характеристик лопаток и неравномерностью потока среды, обтекающего лопатки; интенсивность вибрации пропорциональна квадрату частоты вращения, плотности среды. Каждая рабочая ступень (компрессора, турбины) с числом рабочих лопаток, равном Z_p , генерирует вибрацию, частоты которой равны частоте вращения ротора и в iZ_p раз больше нее, ($i = 1, 2, \dots$).

На рисунке 5 представлен спектр вибрации (СКЗ виброускорения – Ае) опоры компрессора в вертикальном направлении. В низкочастотной части спектра колебаний опоры компрессора преобладают первая и вторая гармоники частоты вращения ротора турбины, а в области высоких частот – гармоники с кратностями 25, 29, 41, соответствующими числу рабочих лопаток на 1-й, 2-й и 5-й ступенях компрессора.

В спектре вибрации опоры турбины присутствуют частоты гармоник, кратные количеству рабочих лопаток ступеней, как турбины (3 ст. - $z = 49$; 2 ст. – $z = 74$; 1 ст. – $z = 80$), так и компрессора (2 ст. – $z = 29$). Кроме того, в среднечастотной части спектра вибрации опоры турбины наблюдаются колебания с высоким уровнем ($A_e = 1,5 - 6,3 \text{ м/с}^2$) и частотами 492 Гц, 583 Гц, 984 Гц, 1477 Гц, не кратными оборотной частоте (рис.5).

Наиболее вероятной причиной и источником вибрации с частотой 492 Гц может быть процесс вибрационного горения в камере сгорания (КС) газовой турбины и возбуждаемые этим процессом резонансные колебания элементов КС.

Неустойчивое (вибрационное) горение в камерах сгорания возникает вследствие взаимодействия процесса горения с акустической колебательной системой и представляет собой акустический автоколебательный процесс. В газовом объеме, заключенном в камере сгорания, возможны собственные продольные и поперечные (тангенциальные и радиальные) колебания, частоты которых прямо

пропорциональны местной скорости звука и зависят от размеров камеры сгорания. Вибрационное горение в ГТД объясняется возникновением переменного теплоподвода вследствие зависимости полноты сгорания от коэффициента избытка воздуха и от скорости потока воздуха перед зоной горения. Наиболее вероятно возникновение вибрационного горения при очень богатых и очень бедных смесях.

Из анализа соотношений амплитуд и частот рассматриваемых спектральных составляющих вибрации следует, что частоты колебаний 984 Гц и 1477 Гц являются 2-й и 3-й гармониками основной частоты 492 Гц, возбуждаемой процессом горения в КС, а частота 583 Гц – это модуляционная частота основной частоты 492 Гц, модулированной частотой вращения (90,5 Гц) ротора турбины.

На режимах останова ГТУ характеристики зависимости параметров вибрации опор газовой турбины от частоты вращения принципиальным образом отличаются от соответствующих характеристик при пуске. При останове ГТУ, на режимах выбега, хаотические скачки уровня вибрации отсутствуют, уровень вибрации определялся только неуравновешенностью ротора газовой турбины и не превышает 2,0 мм/с.

Для выявления и устранения причин повышенной вибрации опор газовой турбины, фирмой Siemens было организовано свое собственное проведение вибрационных исследований ГТ. Эти исследования проводились с помощью 2-х комплектов (по 8 каналов) переносной виброаппаратуры Bently Nevada, в частотном диапазоне от 10 Гц до 2000 Гц.

В период опытной эксплуатации ГТУ проводились регламентные работы по осмотру и проверке технического состояния частей и узлов установки.

Исследование вибрационного состояния ГТУ на режимах пуска

Сложность и специфический характер вибрационных характеристик ГТУ на режимах пуска, вызвали необходимость проведения анализа параметров вибрации в отдельных диапазонах частот:

- низкочастотном, (5-20) Гц;
- изменений 1-й гармоники роторной вибрации, (20-100) Гц;
- среднечастотном, (100-1000) Гц;
- высокочастотном, (1000 – 10000) Гц.

Результаты обработки вибрационных сигналов в различных полосах частот для опоры компрессора (2p,2v) представлены на рисунках 7, 8 и 9 в виде зависимостей от времени СКЗ виброскорости (V_e , V_f) и виброускорения (A_e , A_f). Анализ зависимостей позволил установить, что высокий уровень вибрации (V_e) неустойчивого характера, при пуске ГТУ на режиме набора оборотов, обусловлен низкочастотными колебаниями с частотой 5–20 Гц.

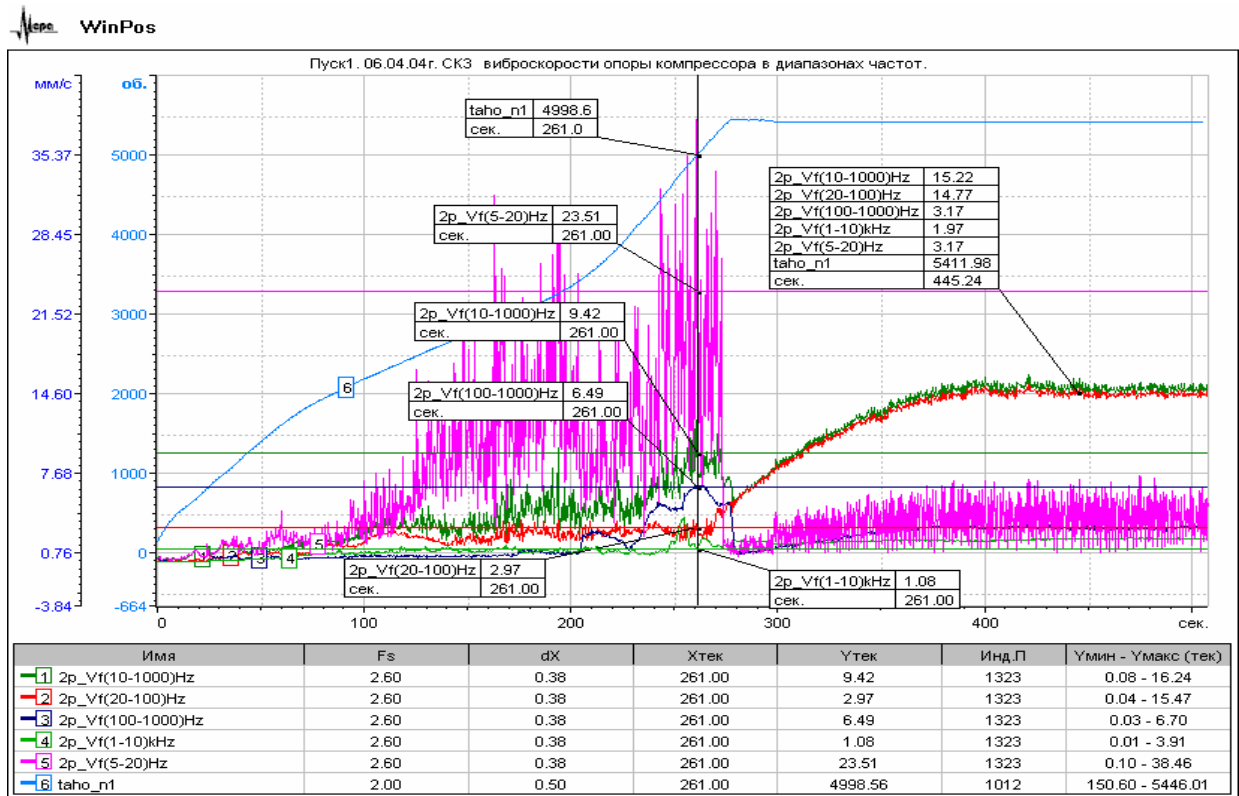


Рис. 7. Изменение СКЗ виброскорости опоры компрессора (поперечное направление) в различных диапазонах частот при пуске ГТУ V64.3A

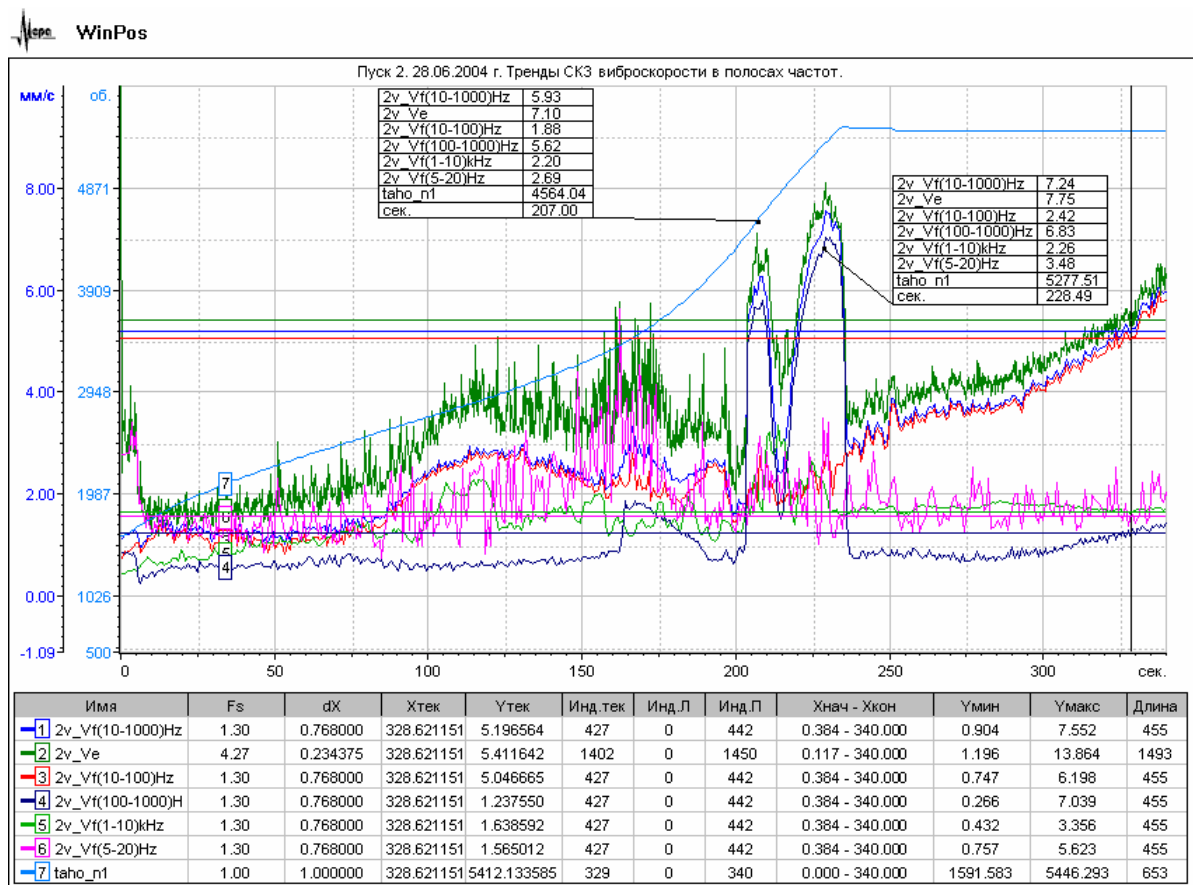


Рис. 8. Изменение СКЗ виброскорости опоры компрессора (вертикальное направление) в различных диапазонах частот при пуске ГТУ V64.3A

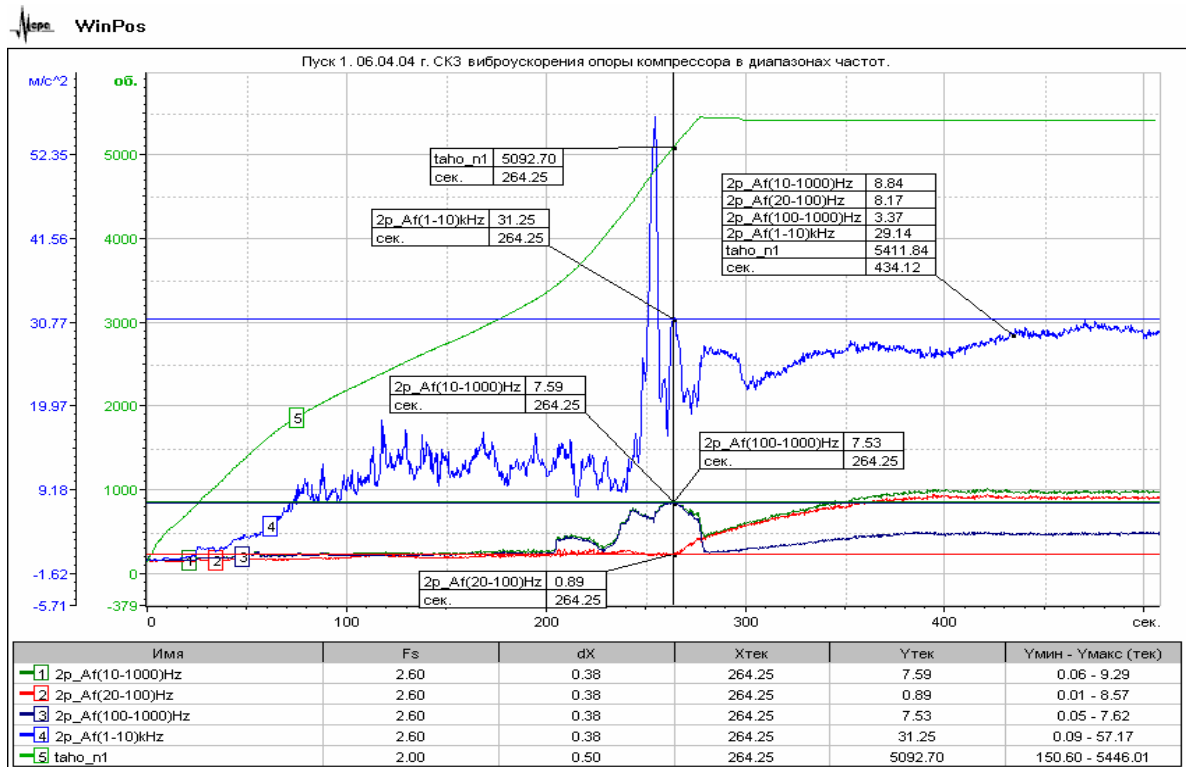


Рис. 9. Изменение СКЗ виброускорения опоры компрессора в различных диапазонах частот при пуске ГТУ V64.3A

Кроме того, при частотах вращения ротора турбины от 4400 об/мин до 5400 об/мин, происходит резкое увеличение уровня вибрации в среднечастотном спектре колебаний. Изменения уровня вибрации (СКЗ виброскорости - V_e) составляет от (1,0 – 2,0) мм/с до (3,5 - 9,0) мм/с. Спектральный состав вибрации опор ГТУ при частоте вращения ротора турбины равной 4766 об/мин (79,4 Гц) представлен на рис.10.

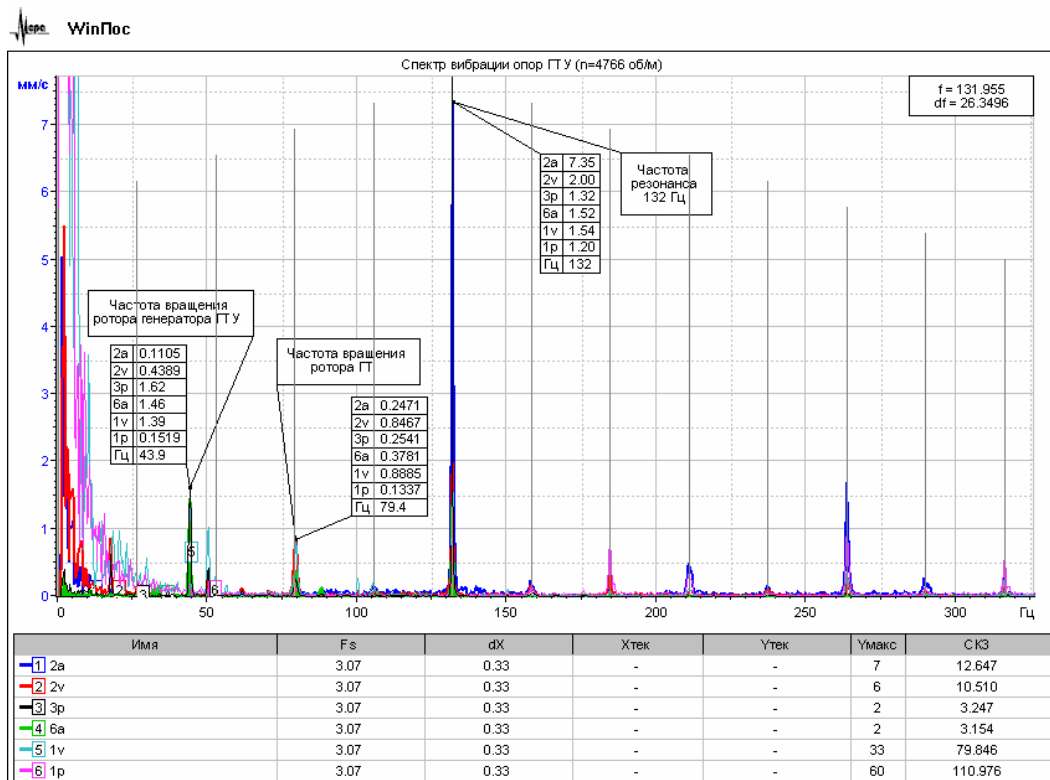


Рис.10. Совмещенные спектры вибрации опор ГТУ при частоте вращения турбины 4766 об/мин.

Преобладающими частотами колебаний в спектре вибрации являются частота равная 132 Гц и ее гармоники. Кроме того, наблюдаются гармоники кратные 26,3 Гц.

На рисунке 11 изображены графики изменений уровня СКЗ виброскорости (Vf) спектральных составляющих вибрации опор в диапазоне частот (120-140) Гц при пуске ГТУ. Специфической особенностью возбуждения колебаний опор ГТУ с частотой 120-140 Гц, является то, что они возникают только при пуске ГТУ, а при останове ГТУ, на режиме, выбега эти колебания не возбуждаются.

Специалистами фирмы Сименс было выдвинуто предположение, что источником вибрации с частотой около 130 Гц является камера сгорания, в которой, при данном режиме работы ГТУ, процесс горения носит импульсный характер.

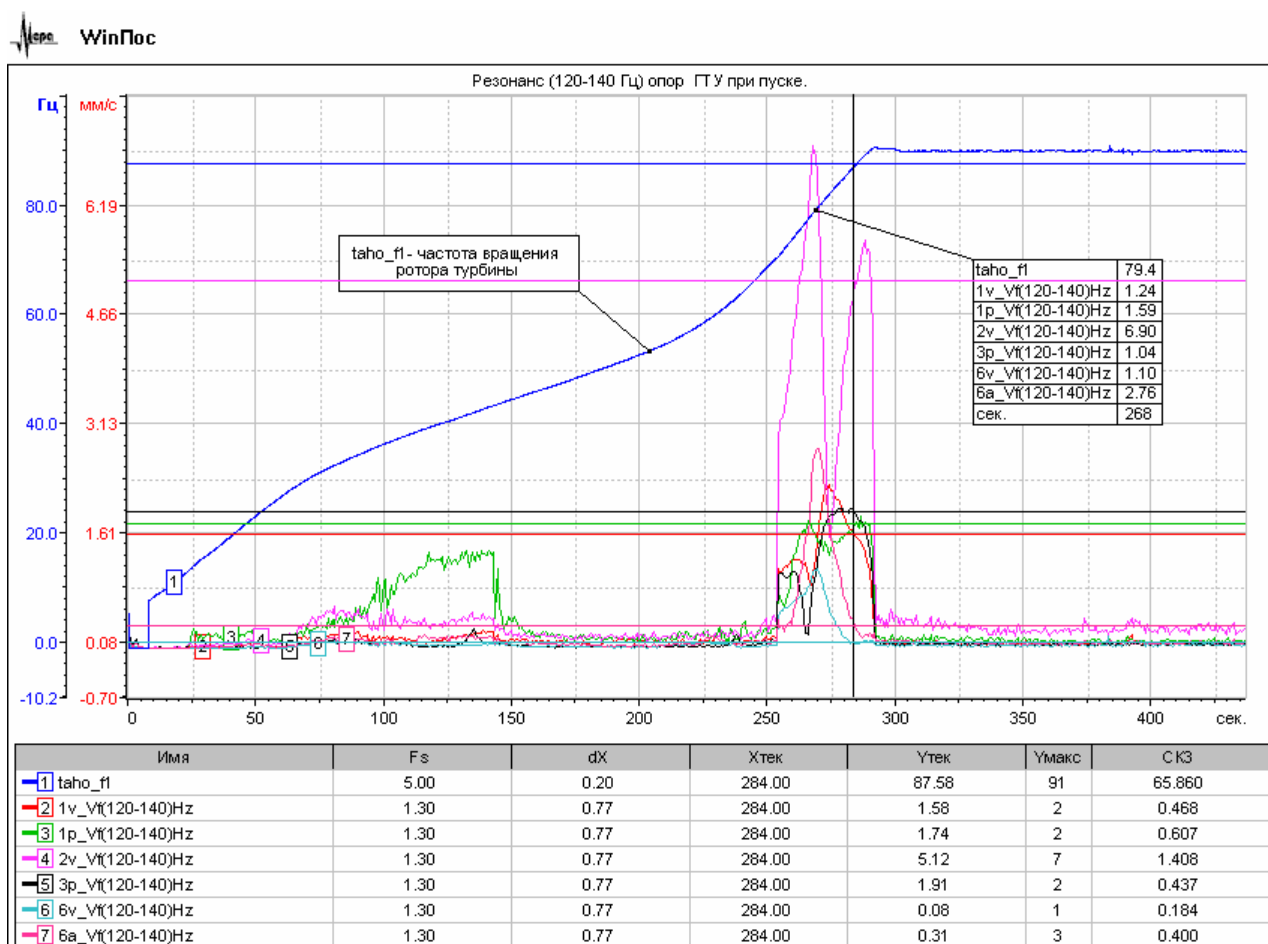


Рис.11. Изменение СКЗ виброскорости опор в диапазоне частот (120-140) Гц при пуске ГТУ .

Однако, последующий анализ и обработка вибрационных сигналов с применением алгоритмов программы «WinПос» (одновременный расчет мгновенных спектров для нескольких сигналов; частотно-временное разделение сигналов (каскадные спектры); получение взаимных спектров и функций когерентности), позволили установить, что причиной вибрации опор ГТУ с основной частотой около 130 Гц являются резонансные колебания виброизолированного фундамента с установленной на нем ГТУ, т.е. системы «ГТУ-фундамент», собственная резонансная частота которой равна 132 Гц.

На рисунке 12 показаны графики изменений во времени при пуске ГТУ, параметров, которые устанавливают факт возбуждения резонансных колебаний системы «ГТУ-фундамент» с частотой 129-137 Гц и один из основных источников возбуждения резонанса.

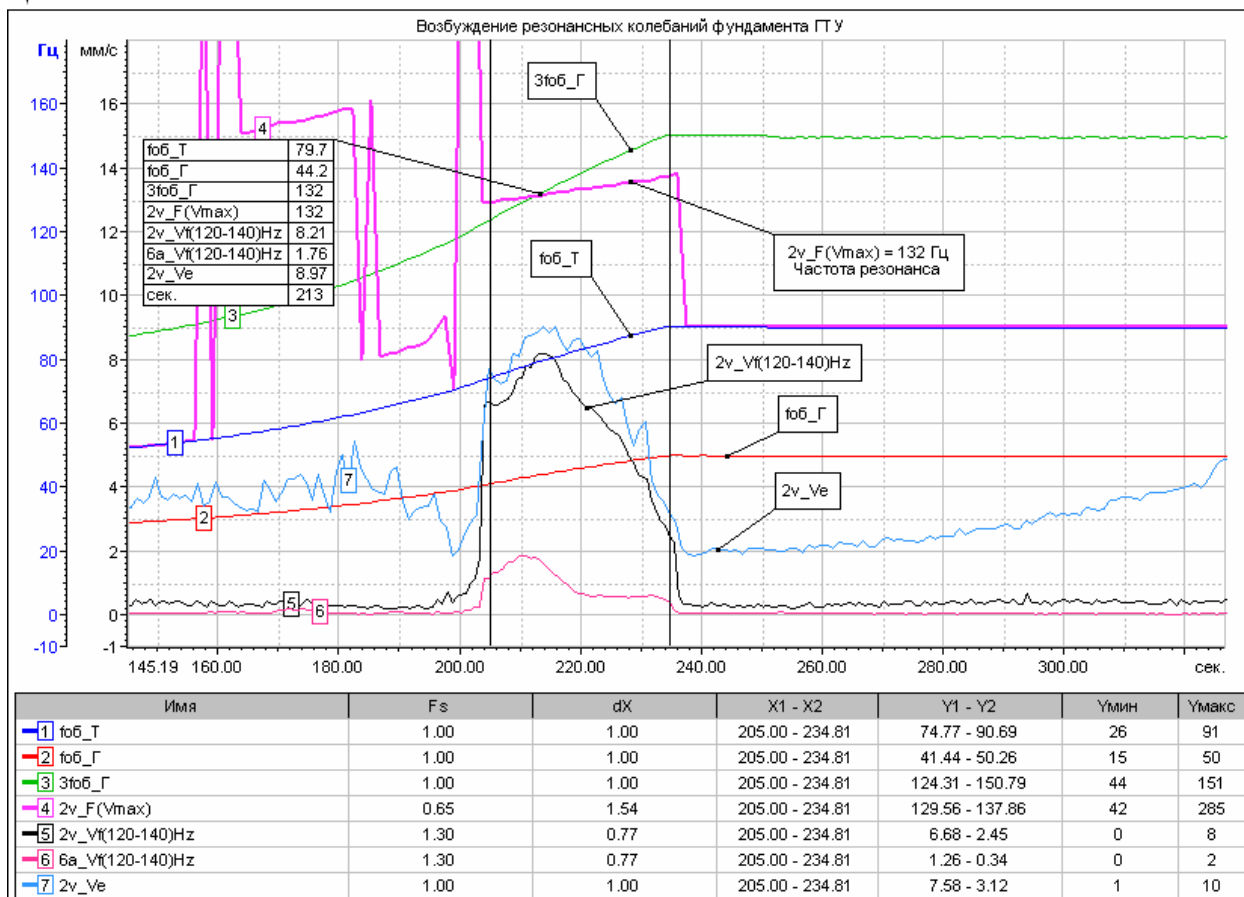


Рис.12. Возбуждение резонансных колебаний опор генератора и компрессора на режимах пуска ГТУ при частотах вращения ротора турбины 4400 - 5400 об/мин.

Изменение частоты:

- 1 – вращения ротора турбины (foб_Т);
- 2 – вращения ротора генератора (foб_Г);
- 3 – третьей гармоники частоты вращения ротора генератора (3foб_Г);
- 4 – максимальной спектральной составляющей вибрации опоры компрессора (2v_F[Vmax]), в диапазоне частот вращения ротора турбины 4400 - 5400 об/мин – это частота резонанса.

Изменение вибрации:

- 5 – опоры компрессора (2v_Vf(120-140)Hz), СКЗ виброскорости в диапазоне частот 120-140 Гц;
- 6 – опоры генератора (6a_Vf(120-140)Hz), СКЗ виброскорости в диапазоне частот 120-140 Гц;
- 7 – опоры компрессора 2v_Ve, СКЗ виброскорости в диапазоне частот 10-1000 Гц

Результаты анализа, представленные в виде графиков на рис.12, показывают, что максимальный уровень СКЗ виброскорости резонансных колебаний соответствует моменту времени, когда третья гармоника частоты вращения ротора генератора (3foб_Г) равна частоте резонанса (на рисунке точка пересечения линий 3 и 4). Это свидетельствует о том, что источником возбуждения резонанса является вращающийся ротор генератора.

На рисунках 13, 14 и 15 изображены трехмерные графики частотного спектра вибрации (каскадные спектры) опор генератора и компрессора при пусках ГТУ. На графиках в диапазоне частот 125-135 Гц наблюдаются спектральные составляющие вибрации с уровнем СКЗ 1,0-7,0 мм/с, являющиеся резонансными колебаниями системы «ГТУ-фундамент».

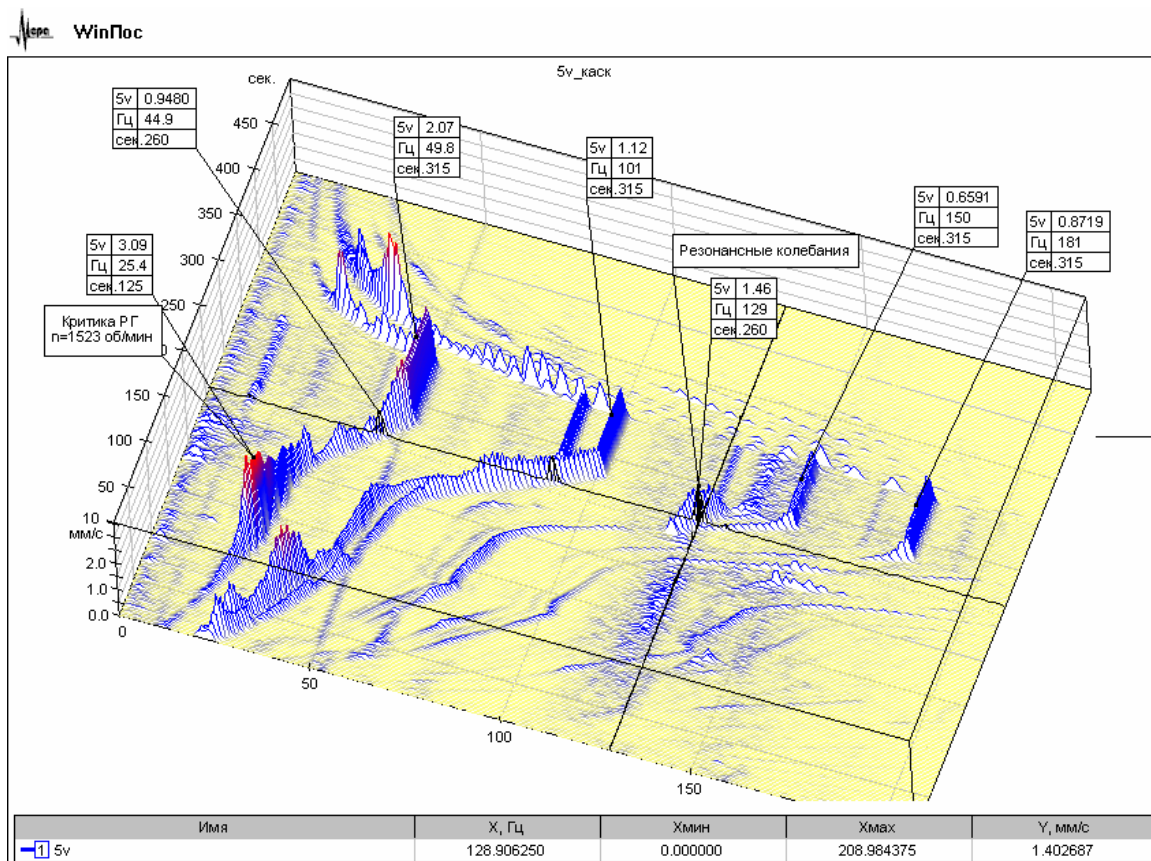


Рис. 13. Трехмерный график частотного спектра вибрации (до 200 Гц) опоры генератора в вертикальном направлении на режимах пуска, холостого хода и останова ГТУ.

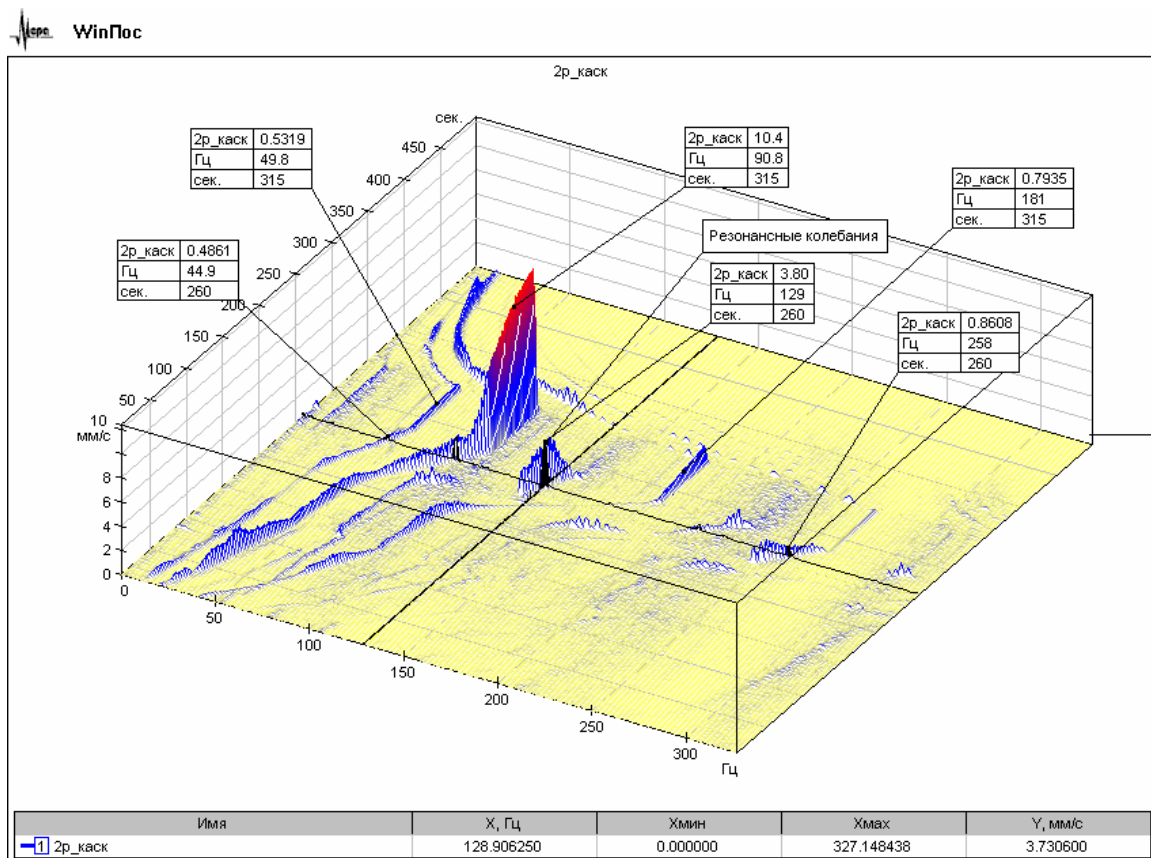


Рис. 14. Трехмерный график частотного спектра вибрации (до 300 Гц) опоры компрессора в поперечном направлении на режимах пуска, холостого хода и останова ГТУ.

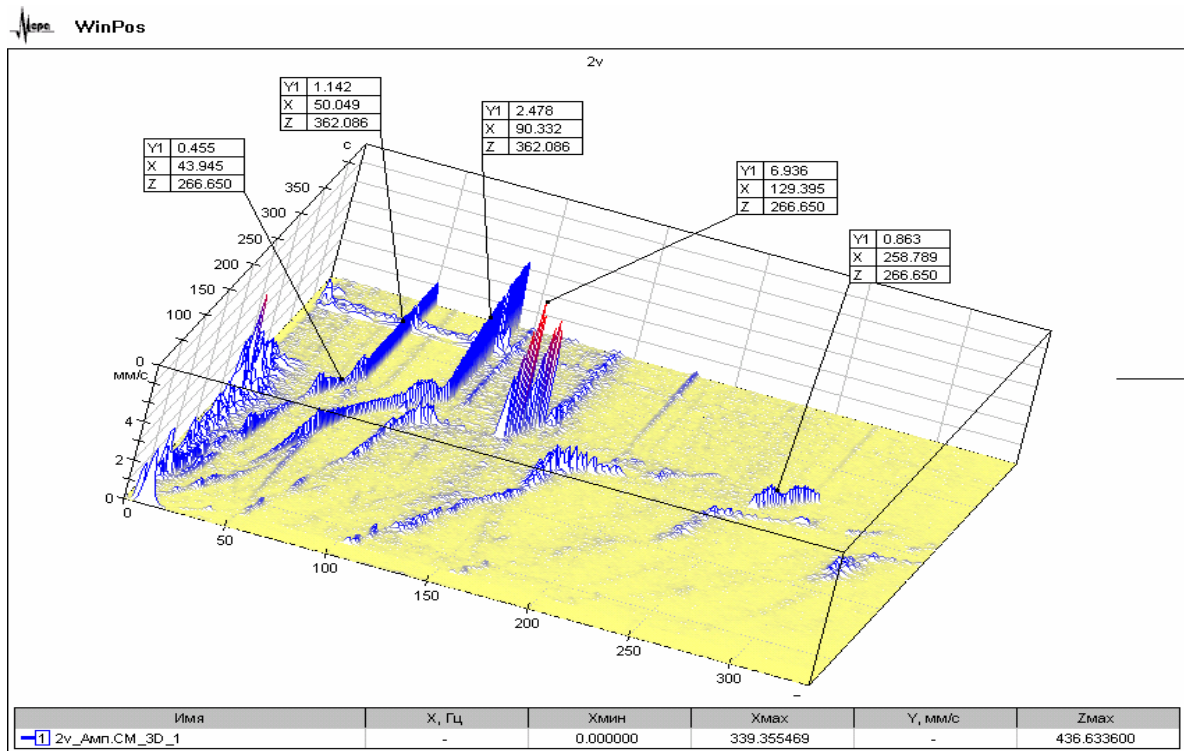


Рис. 15. Каскадный спектр вибрации опоры компрессора в вертикальном направлении при пуске ГТУ.

На рисунке 16 представлен совмещенный график функций когерентности для различных сочетаний пар точек измерения вибрации опор турбины, компрессора и генератора.

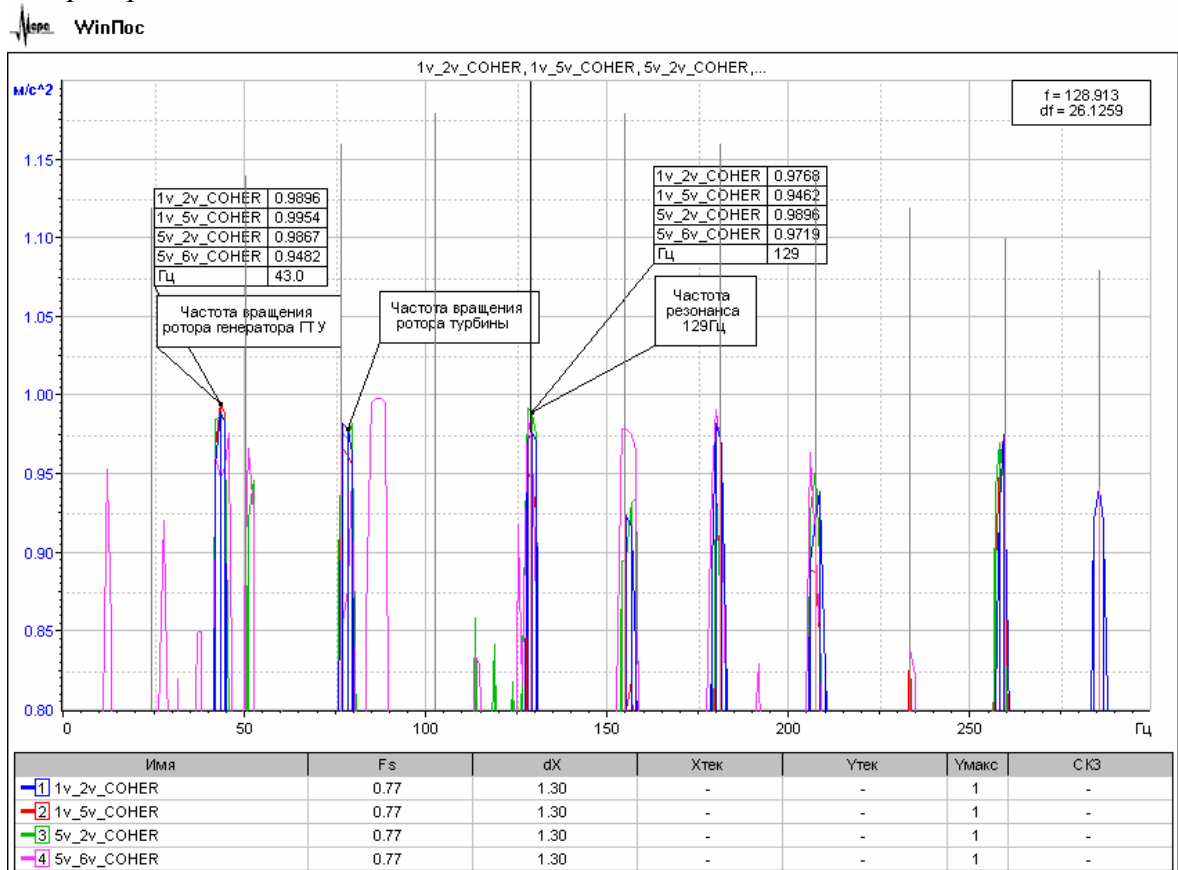


Рис. 16. Совмещенный график функций когерентности для различных точек измерений вибрации ГТУ, установленной на виброизолированном фундаменте.

Известно, что функция когерентности отображает степень линейной взаимосвязи между двумя процессами (сигналами) в частотной области. Близость к 1,0 значений всех полученных функций когерентности, на частотах 43 Гц и 129 Гц, свидетельствует о наличии единого источника возбуждения колебаний с указанными частотами. В данном случае общим конструктивным элементом, объединяющим все точки измерения вибрации в единую систему, является фундаментная плита виброизолированного фундамента.

На графиках спектров вибрации (рис.10) и функции когерентности (рис.16), кроме основной частоты резонанса 129-132 Гц наблюдаются спектральные составляющие с интервалом около 26 Гц (отмечены модуляционным курсором). Их наличие можно объяснить двумя причинами:

1. Одна из собственных частот колебаний фундамента равна 26 Гц. Перед монтажом ГТУ были произведены вибрационные испытания фундамента (ОАО ЦКТИ) с помощью вибратора в диапазоне частот от 10 Гц до 115 Гц, при этом были определены резонансы:
 - вертикальное направление: 26 Гц – (сторона генератора); 42 Гц – (сторона турбины); 71 Гц и 113 Гц.
 - горизонтальное направление: 38 Гц – (сторона турбины); 55 Гц и 96 Гц.
2. На режиме пуска возникают взаимные крутильные колебания роторов газовой турбины и генератора, обусловленные наличием между ними редуктора на подшипниках скольжения и переменностью крутящего момента при раскрутке ГТУ тиристорным пусковым устройством (ТПУ) и вступлении в работу камеры сгорания.

Интенсивные низкочастотные колебания частотой 5-20 Гц возникают только на режимах пуска ГТУ и преимущественно на опорах турбины и компрессора (рис.17 и 18).

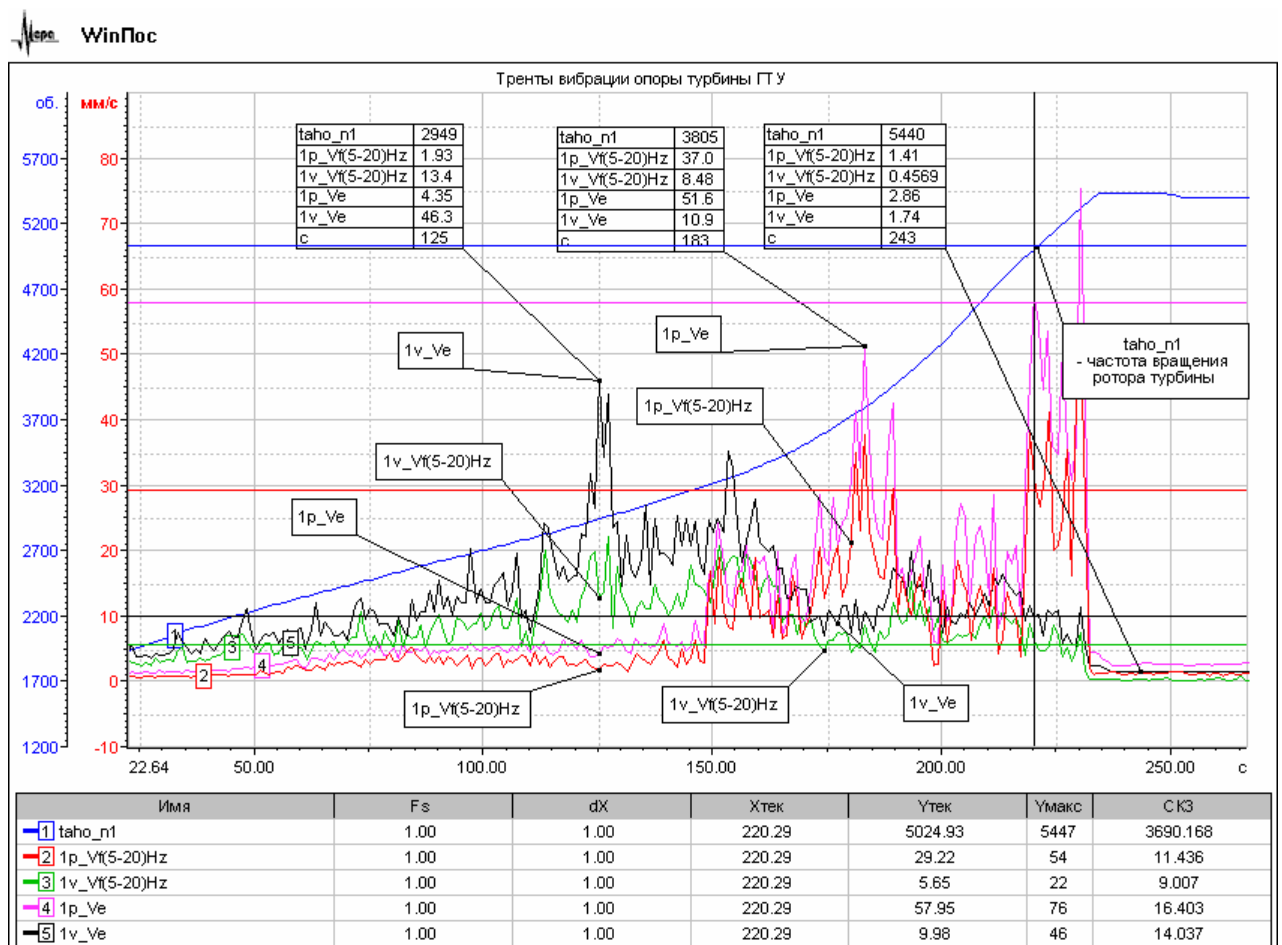


Рис.17. Тренды виброскорости опоры турбины в вертикальном и поперечном направлении при пуске ГТУ: Ve – общего уровня СКЗ; Vf(5-20)Hz – низкочастотной вибрации в частотном диапазоне 5 – 20 Гц.

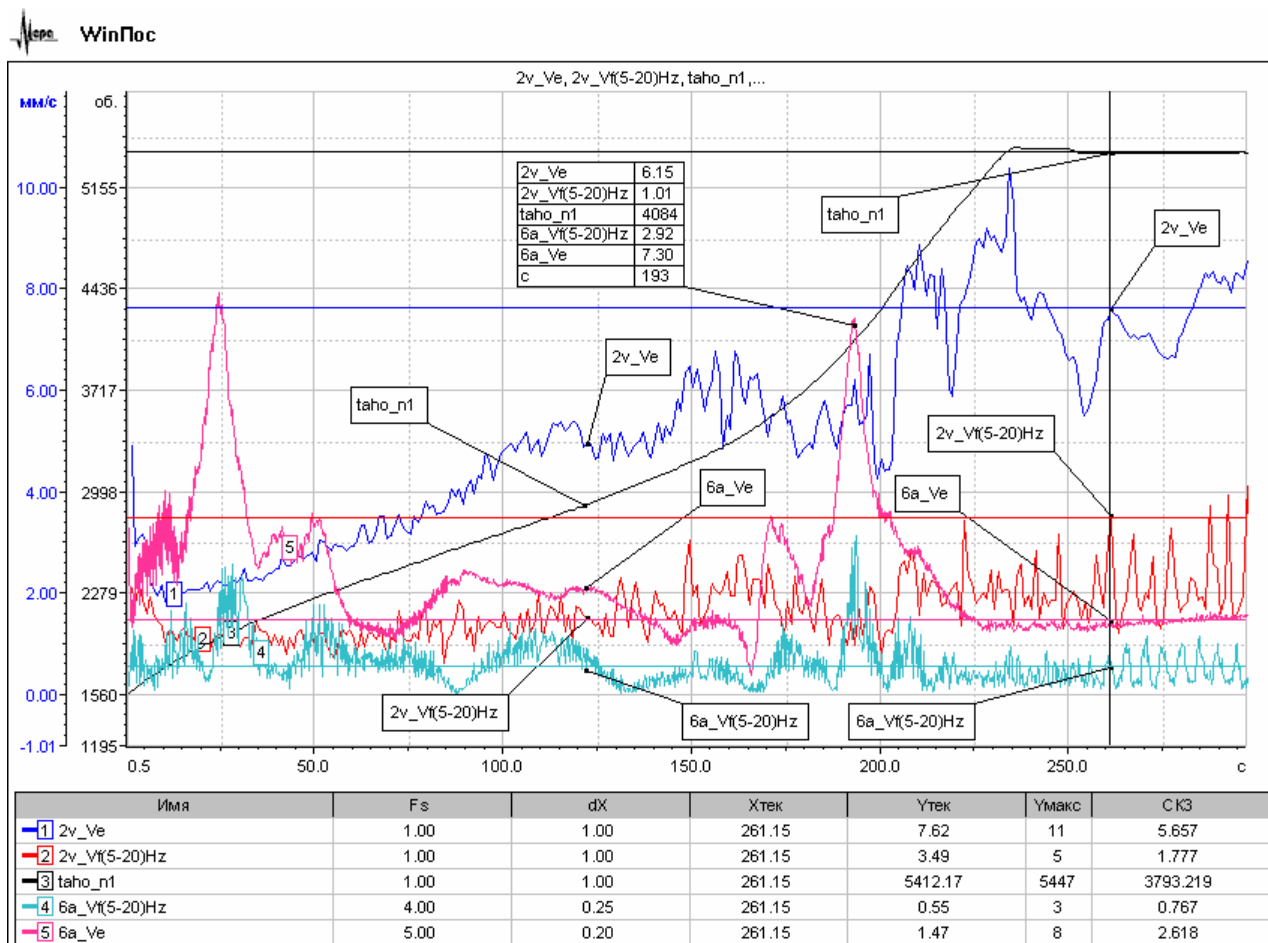


Рис.18. Тренды виброскорости опоры компрессора (2v) и опоры генератора (6a) при пуске ГТУ:
 Ve – общего уровня СКЗ;
 Vf(5-20)Hz – низкочастотной вибрации в частотном диапазоне 5 – 20 Гц.

Возбуждение низкочастотных колебаний на пусковых режимах определяется, прежде всего, спецификой динамических процессов, возникающих при раскрутке ГТУ тиристорным пусковым устройством (ТПУ) и вступлении в работу камеры сгорания, а также соотношением податливостей и масс роторов, опор, корпусных частей ГТУ и фундаментной плиты виброизолированного фундамента.

Максимальный уровень низкочастотной вибрации наблюдается на корпусе турбины в поперечном направлении (точка 1p), вследствие повышенной податливости опоры выхлопной части корпуса ГТУ, выполненной в виде стержневых стоек.

Информация о характере и параметрах низкочастотных колебаний корпуса турбины в поперечном направлении представлена в виде графиков на рисунке 19. На верхнем графике, изображен вид колебательного процесса, на среднем – частота вращения ротора турбины, на нижнем – спектр вибрации в момент времени, отмеченной курсором на верхних графиках. Из представленных графиков видно, что низкочастотные колебания имеют неустойчивый характер, частота колебаний 5-15 Гц. Общий вид низкочастотных колебаний корпуса турбины в поперечном направлении представлен на каскадном спектре вибрации (рис.20).

Анализ данных, полученных при обработке вибрационных сигналов с применением алгоритмов программы «WinPos-Expert», показал, что диапазон частот низкочастотных колебаний, возбуждаемых при пуске ГТУ, простирается до 0,5-1,0 Гц. Достоверные данные о параметрах низкочастотных колебаний в области низких частот 1-5 Гц могут быть получены с применением для замеров вибрации датчиков, имеющих соответствующий частотный диапазон измерений.

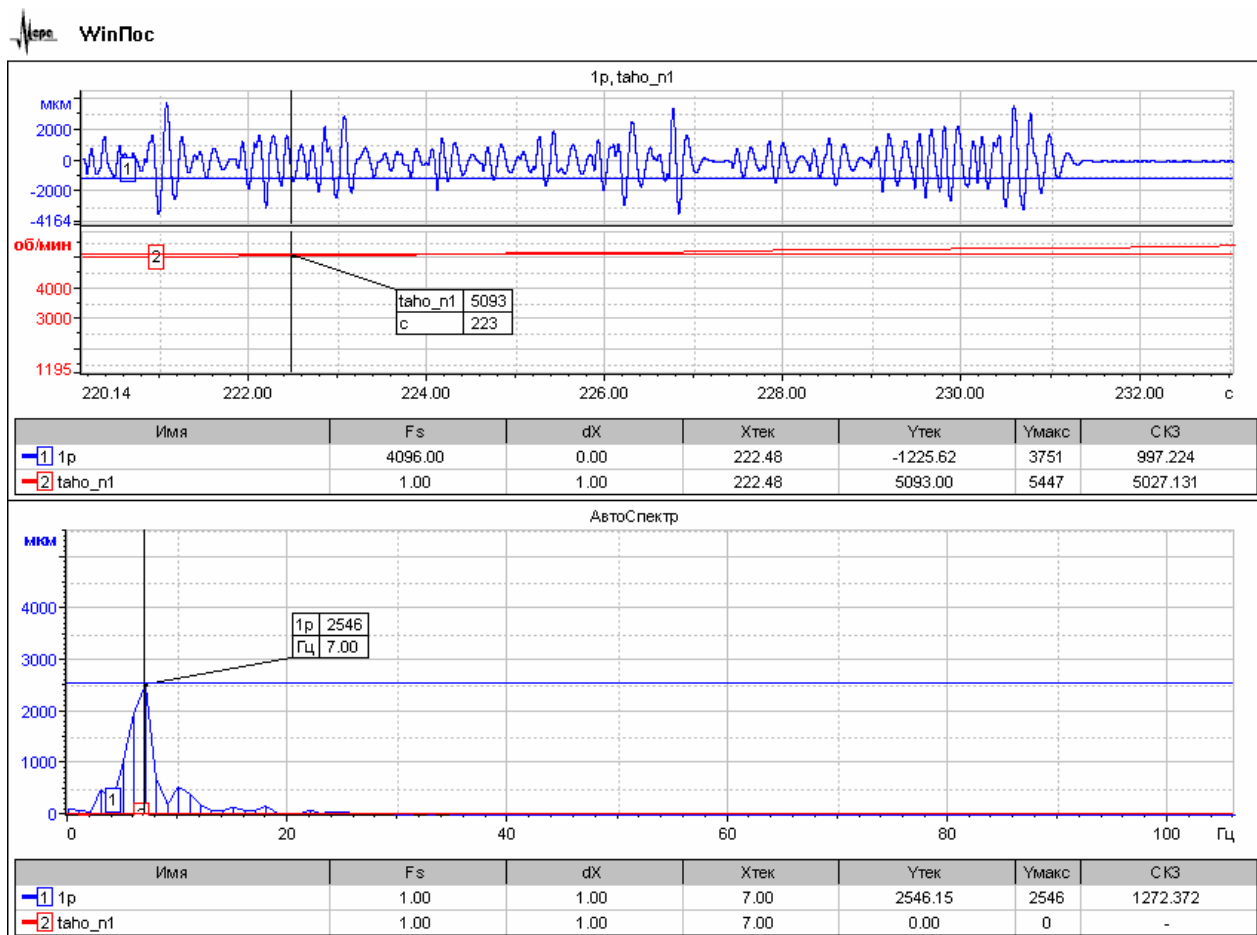


Рис.19. Низкочастотные колебания корпуса турбины в поперечном направлении при пуске ГТУ V64.3А.

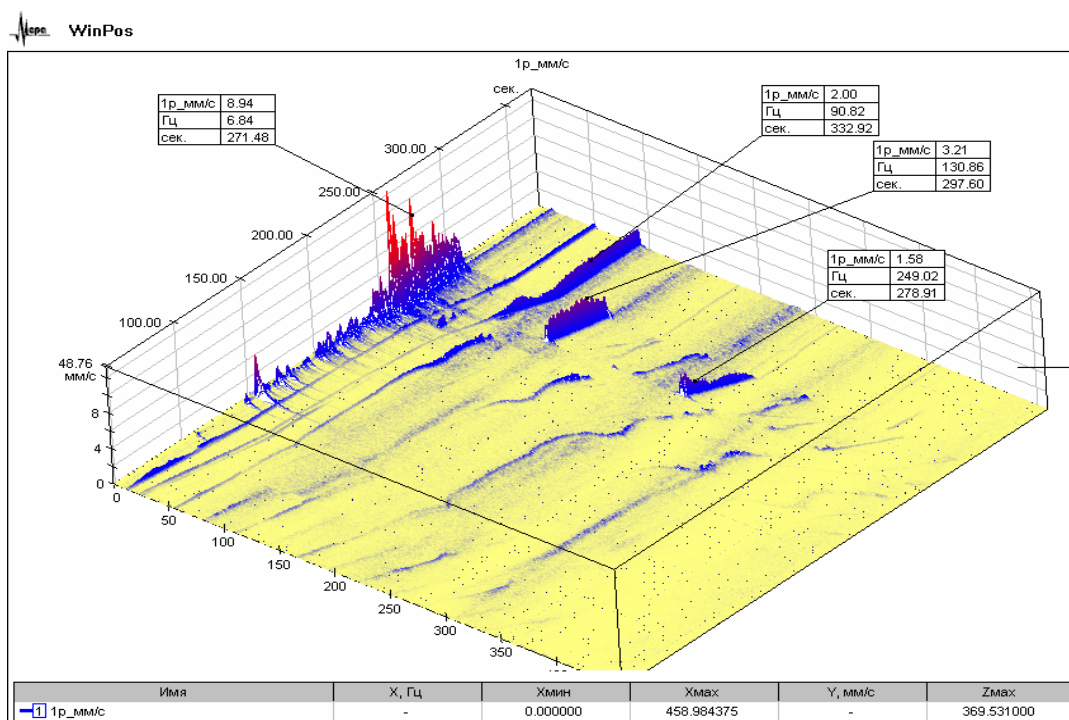


Рис.20. Каскадный спектр вибрации опоры турбины в поперечном направлении при пуске ГТУ V64.3А.

Представление спектральных характеристик вибрационных сигналов в виде трехмерных графиков (каскадных спектров) позволяет разделять и диагностировать

синхронные колебания, кратные частоте вращения ротора, и резонансные колебания опор и корпусных элементов. Так, на каскадном спектре вибрации опоры компрессора для режима пуска (рис. 21) просматривается резонансная полоса частот с центральной частотой около 2500 Гц и пересекающие ее лопаточные частоты различных ступеней компрессора, в местах пересечений наблюдаются пики уровня вибрации.

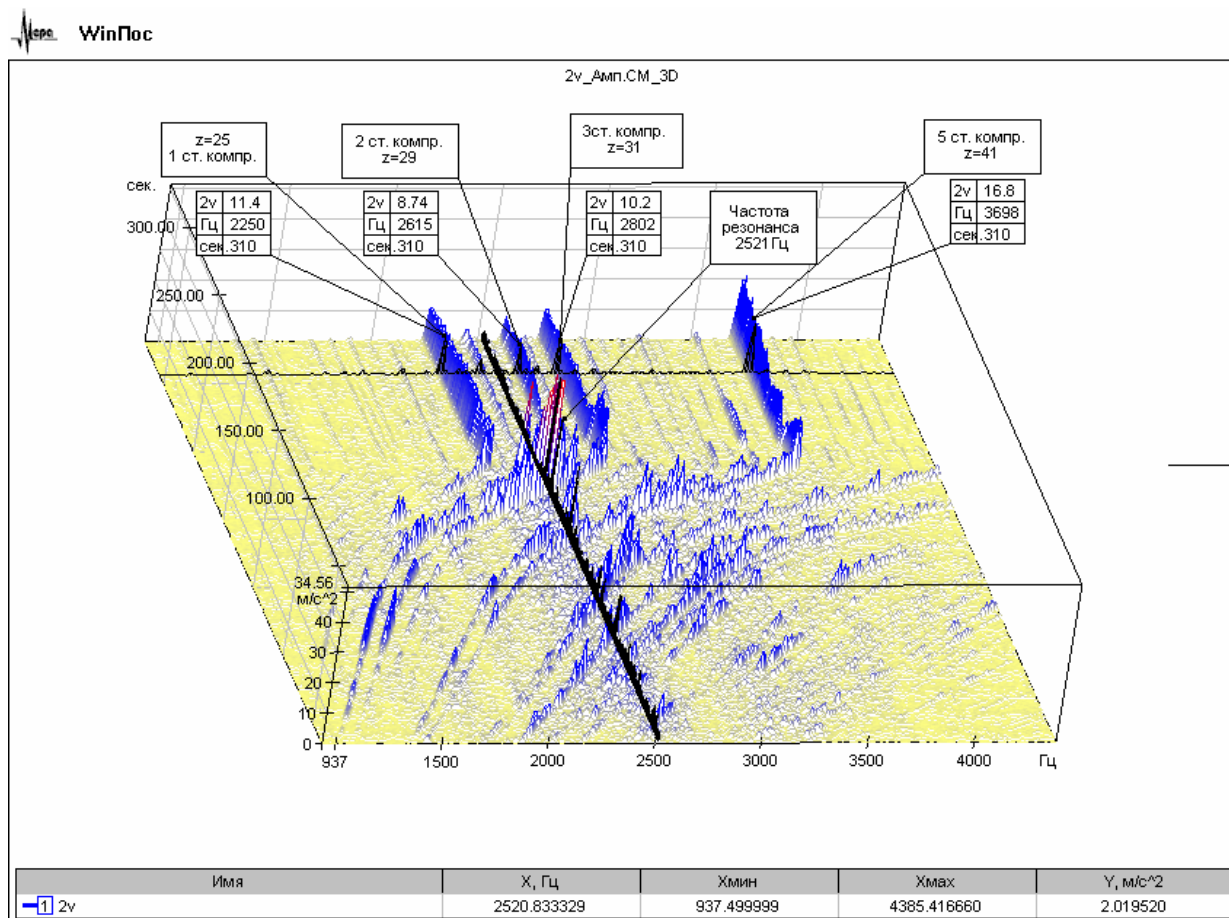


Рис. 21. Фрагмент частотно-временной характеристики спектра колебаний опоры компрессора газовой турбины V64.3A в вертикальном направлении, при пуске ГТУ.

Вибрация, возбуждаемая в зубчатой передаче редуктора.

В вибрационном состоянии редуктора представляет интерес вибрация зубчатого зацепления. На рисунке 22 представлен спектр вибрации зубчатого зацепления редуктора на режиме холостого хода. Частота зацепления равна 4150 Гц, по обе стороны от основной частоты зацепления $f = 4150$ Гц расположены модуляционные частоты, модулированные частотами вращения ведущей шестерни (90,2 Гц) и ведомого зубчатого колеса (50 Гц). На рисунке модуляционные частоты с шагом 50 Гц отмечены с помощью модуляционного курсора, по 4 линии с каждой стороны.

При анализе вибрации редуктора на режиме пуска ГТУ были выявлены локальные всплески уровня вибрации на промежуточных частотах вращения. На рисунке 23 представлены результаты анализа всплеска вибрации при промежуточной частоте вращения ротора генератора равной 2626 об/мин. На графиках (рис.23), вверху слева изображен исходный сигнал, внизу – тренд СКЗ виброускорения, вверху справа – спектр вибрации, внизу спектр вибрации зубчатого зацепления в увеличенном масштабе.

В результате анализа установлено: дефекты или поломки в зубчатом зацеплении отсутствуют, спектр вибрации характеризуется преимущественно частотой зубчатого зацепления.

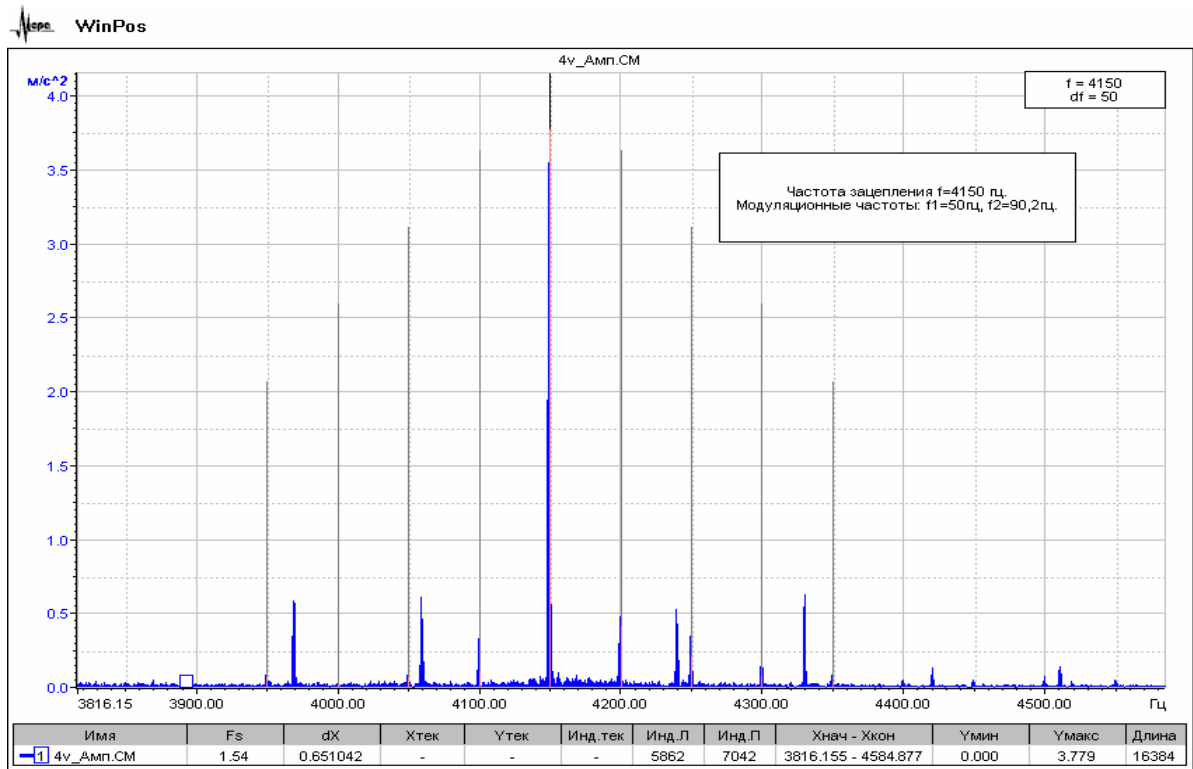


Рис.22. Спектр вибрации зубчатого зацепления редуктора газовой турбины V64.3А на режиме холостого хода

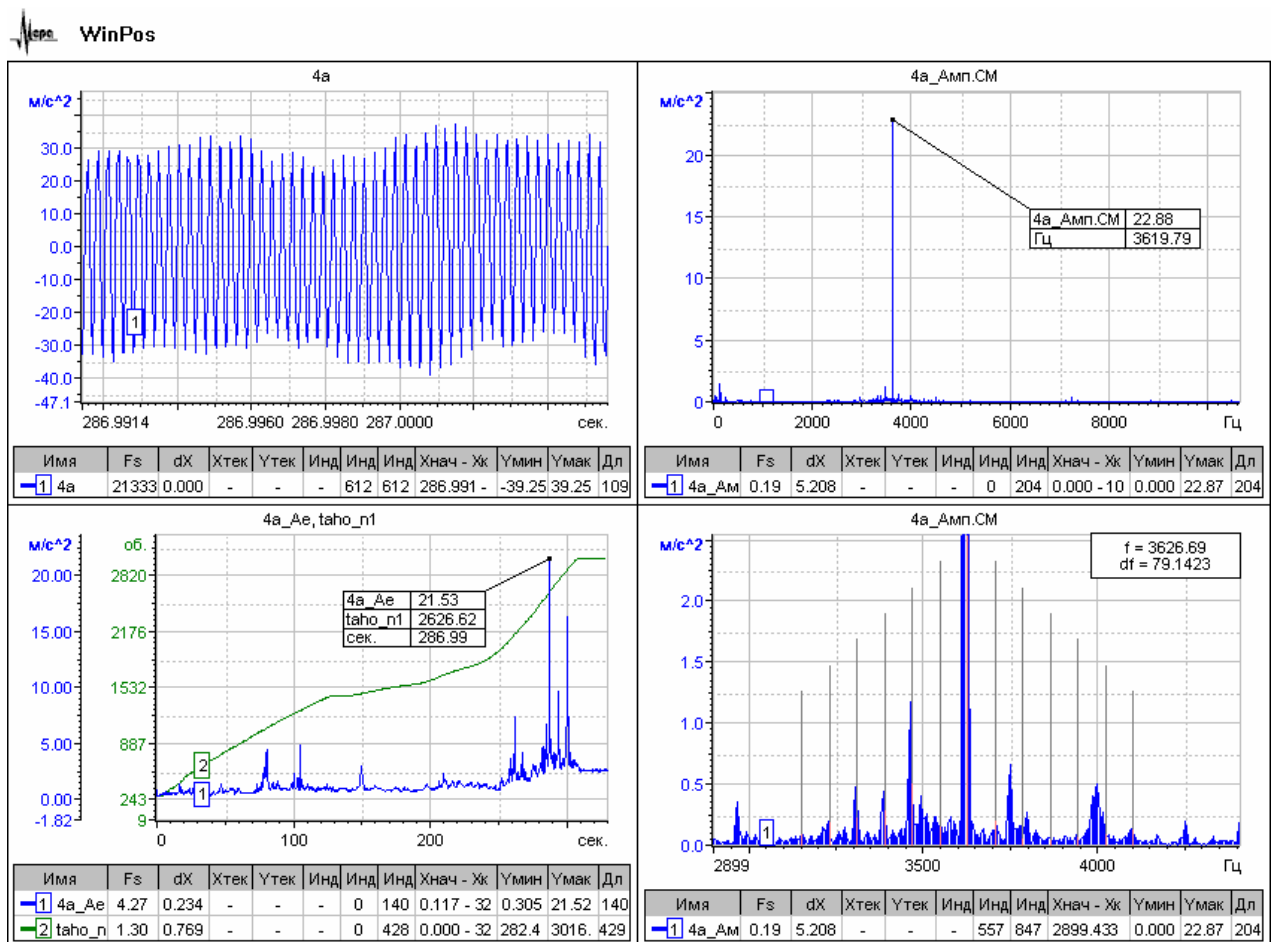


Рис.23. Анализ всплеска вибрации редуктора на режиме пуска ГТУ

Причины всплесков уровня вибрации редуктора легко диагностируются при рассмотрении каскадного спектра вибрации (рис.24).

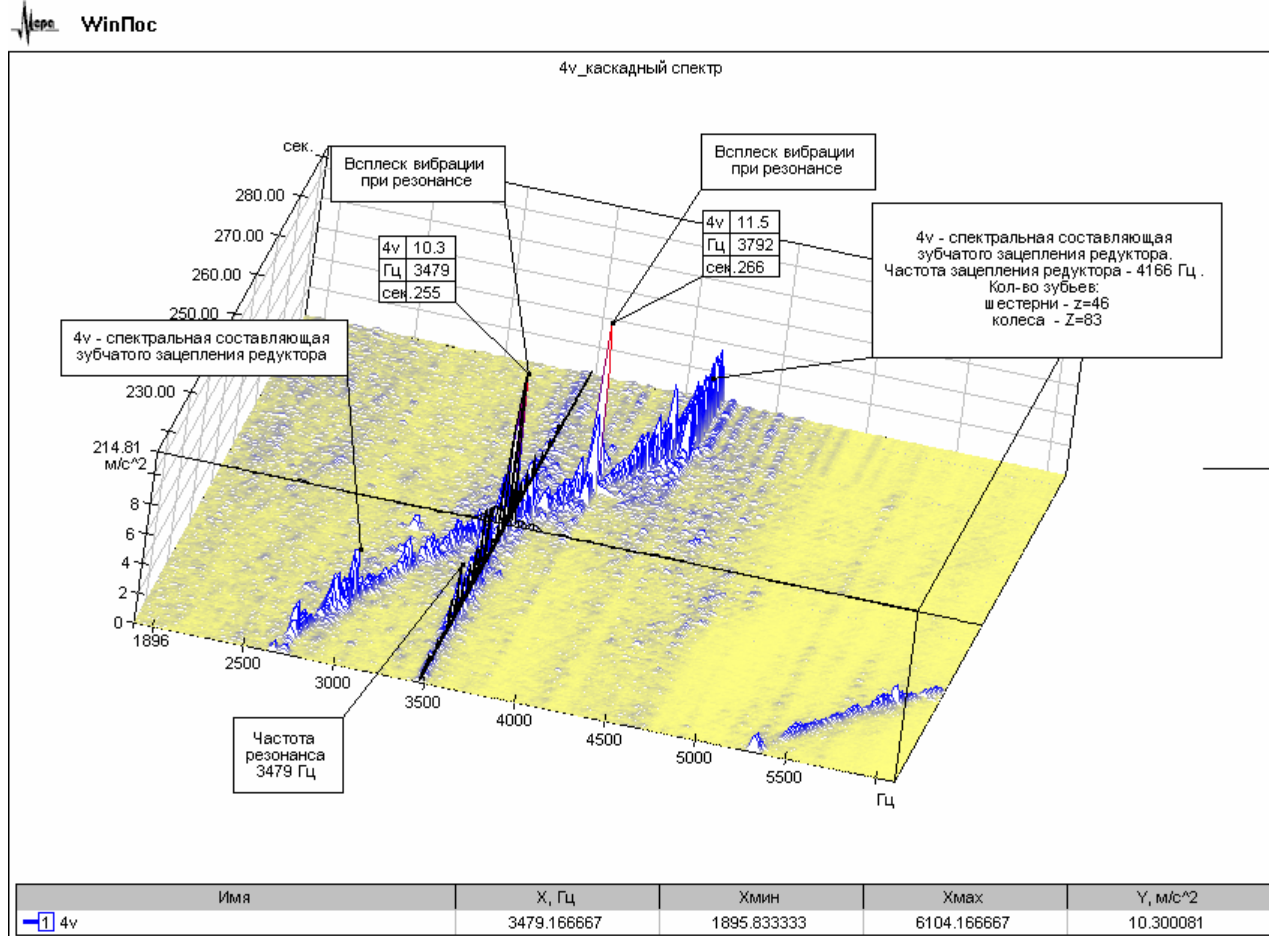


Рис.24. Каскадный спектр вибрации редуктора (точка 4v) при пуске ГТУ. Диагностика причин всплеска уровня вибрации.

На каскадном спектре вибрации редуктора (режим набора оборотов) видны полосы спектральных составляющих вибрации с постоянной частотой - 3479 Гц, 3792 Гц и др., которые отображают собственные (резонансные) частоты колебаний отдельных элементов редуктора, (одна из резонансных частот - 3479 Гц, выделена курсором) и спектральная составляющая зубчатого зацепления редуктора с переменной частотой, кратной частотам вращения роторов генератора и газовой турбины. При совпадении частоты зацепления редуктора с собственными частотами отдельных элементов редуктора, возникают резонансные всплески уровня вибрации (точка пересечения курсоров).

Вибрационное состояние генератора

Определенный интерес вызывают амплитудно-частотные характеристики опор ротора генератора. В качестве примера, на рисунке 25 изображены кривые выбега роторов генератора и турбины при останове ГТУ и, совмещенные с ними, графики изменений вибрации переднего подшипника ротора генератора (сторона редуктора) в осевом направлении.

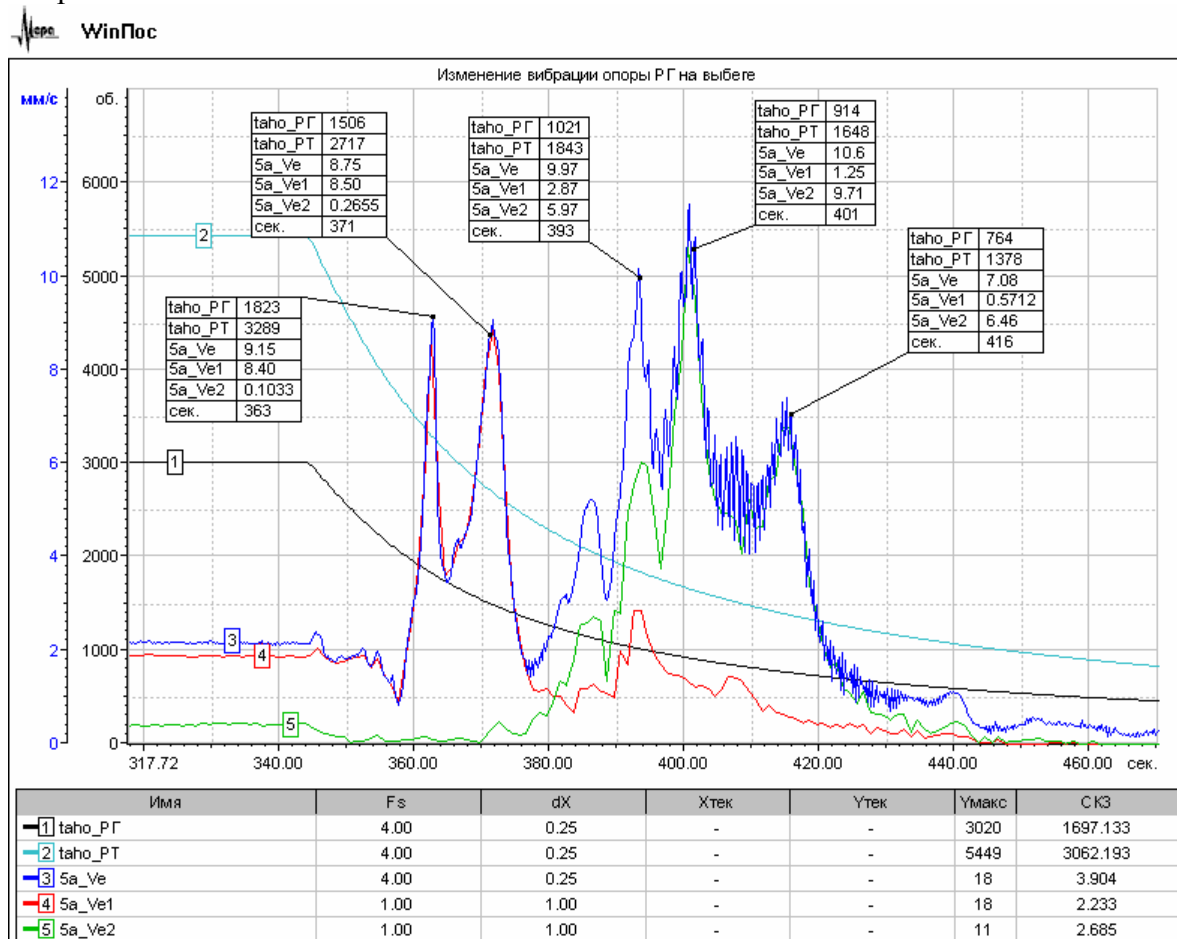


Рис.25. Графики изменений вибрации переднего подшипника ротора генератора (осевое направление) на выбеге при останове ГТУ:

Ve – общего уровня вибрации;

Ve1 – первой гармонической роторной вибрации РГ;

Ve2 – второй гармонической роторной вибрации РГ.

Особенностью представленных на рис.25 вибрационных характеристик является наличие на них шести резонансных пиков уровня вибрации, которые отображают резонансные явления опор генератора. Диагностика резонансов заключается в установлении объекта, который резонирует, определении частот резонансов и выявлении источников динамических возмущений, возбуждающих резонансные колебания. При этом следует особо выделять такие резонансные явления, как критические частоты вращения гибких роторов турбомашин; в этих случаях гибкий ротор является одновременно, как резонирующим объектом, так и источником динамических возмущений.

В таблице № 2 приведены результаты анализа резонансов переднего подшипника ротора генератора ГТУ.

Таблица 2.

Объект резонанса	Частота резонанса, Гц	Источник возмущений	Частота вращения, об/мин	Момент времени, сек.
Опоры РГ в аксиальном направлении	31,25	РГ, n1 – ротор генератора, первая гармоника	1823	363
	31,25	РТ, n1– ротор турбины, первая гармоника	1843	393
	31,25	РГ, 2· n1– ротор генератора, вторая гармоника	914	401
Система фундамент-генератор в вертикальном направлении	25,1	РГ, n1– ротор генератора, первая гармоника	1506	371
	25,1	РТ, n1– ротор турбины, первая гармоника	1500	408
	25,1	РГ, 2· n1– ротор генератора, вторая гармоника	764	416

В тех случаях, когда отсутствуют заводские данные о критических частотах вращения роторов, довольно затруднительно правильно диагностировать причины резонансных пиков без привлечения дополнительной информации. Как уже отмечалось, диагностику резонансных колебаний можно быстро и эффективно осуществить на основе анализа каскадных спектров.

На рисунке 26 изображен трехмерный график каскадного спектра вибрации передней опоры генератора в осевом направлении. При анализе выявлена резонансная частота $f_p = 31,25$ Гц (на графике отмечена курсором). На этой частоте возбуждаются резонансы опор генератора.

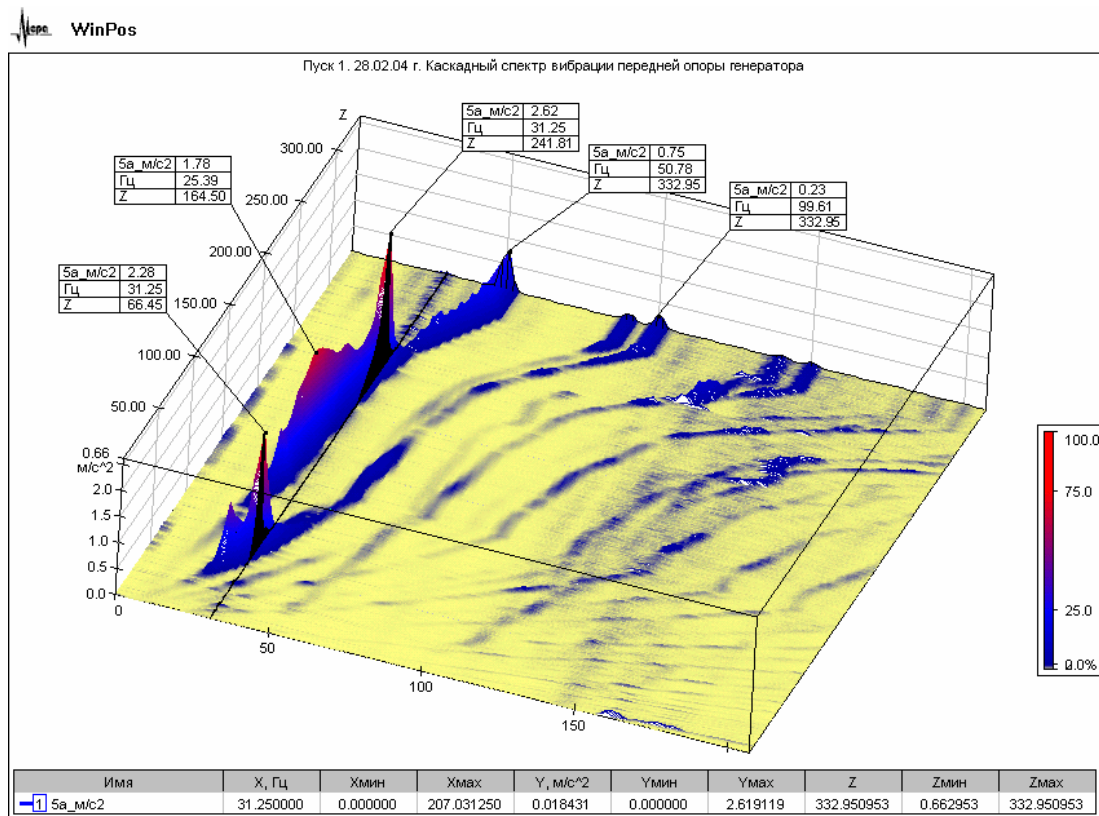


Рис.26. Каскадный спектр вибрации передней опоры генератора в осевом направлении

Заключение

1. В условиях широкого внедрения в энергетике газотурбинных установок, особую актуальность приобретает обеспечение высокой надежности ГТУ на этапе их эксплуатации. Эта задача решается применением систем диагностирования технического состояния установок, при этом, основу таких систем должны составлять методы и средства вибродиагностики. Это, во-первых, определяется высокой информативностью вибрационных сигналов, их способностью нести в себе информацию о наличии и развитии большинства важнейших дефектов, во-вторых, возможностью проведения непрерывного процесса диагностирования на работающем агрегате без его останова и разборки.
2. Особенностью вибрационного состояния ГТУ является широкий спектр вибрации, который занимает практически весь диапазон звуковых частот, поэтому современные системы вибромониторинга и вибродиагностики ГТУ должны обеспечивать измерение СКЗ виброускорения в диапазоне частот до 10000 Гц. Применяемые системы виброконтроля обеспечивают измерения параметров вибрации в частотном диапазоне всего лишь от 10 Гц до 1000 Гц.
3. Полнота и достоверность диагностирования технического состояния ГТУ может быть обеспечена на основе внедрения методов диагностики резонансных явлений. Это следует из того, что резонансные явления характеризуются максимальным уровнем вибрации и динамических напряжений элементов установки и в большинстве случаев являются первопричиной неисправностей и поломок оборудования.
4. Наиболее полную информацию о резонансных процессах несут вибрационные сигналы, получаемые на режимах пуска/останова установки. Первичную диагностику резонансных процессов можно осуществлять при рассмотрении диаграмм каскадных спектров вибрации.
5. В автоматизированных системах вибродиагностики перспективным направлением для диагностирования резонансных процессов является применение метода взаимного корреляционного анализа и получение функций частной и множественной когерентности. Этот метод апробирован на практике специалистами ООО НТЦ «Тюменьинжиниринг» при исследованиях вибрационного состояния паровых турбоагрегатов Т-180/210-130, К-215-130, К-800-240-5.
6. Для вновь вводимых в эксплуатацию ГТУ, необходимо составлять паспорт вибрационного состояния, который должен содержать исходные (базовые) вибрационные характеристики установки для всех режимах работы, включая резонансные характеристики при пусках/остановах агрегата. Кроме того, в паспорт должны вноситься спектральные характеристики и особенности вибрационного состояния установки.
7. Исследование и диагностика вибрационного состояния ГТУ, с составлением паспорта вибросостояния, выдвигают особые требования не только к виброизмерительной аппаратуре, которая должна обеспечивать необходимую полноту и качество измерительной информации о вибросостоянии объекта, но и к специализированному программному обеспечению по обработке полученной информации и представлению ее в удобном для анализа виде.
8. Практический опыт исследования и диагностики вибросостояния ГТУ Siemens V64.3A показал, что одним из наиболее совершенных измерительно-вычислительных и программных комплексов, способных обеспечить проведение комплексной диагностики вибрационного состояния современных газотурбинных установок, является комплекс, состоящий из переносной 16-и канальной аппаратуры MIC-300M и программы «WinПЛОС -Expert», производства фирмы НПП «МЕРА» г. Королев.

9. Измерительный комплекс МІС-300М обладает следующими функциональными возможностями:

Функции регистратора (в темпе измерений):

- непрерывный прием и запись (регистрация) на встроенный жесткий диск входных сигналов с отображением в виде осциллограмм на встроенный ЖК-дисплей (одновременно до 24 аналоговых каналов и 1 цифровой);
- запись синхронного речевого (звукового) сопровождения по дополнительному каналу;
- автоматический запуск и останов регистрации: по TTL, по уровню, по времени, по таймауту, прерывистый режим записи;
- воспроизведение записанных сигналов на аналоговые выходы с отображением в виде осциллограмм на встроенный ЖК-дисплей, воспроизведение синхронного речевого сигнала на встроенный или внешний динамик;
- динамическое переключение между графическими страницами, содержащими различные наборы формуляров отображения;
- обеспечение служебного взаимодействия по цифровой линии с другими приборами МІС-300М для синхронизации старта/останова измерений (за счет чего возможно синхронное управление несколькими приборами с одного пульта);
- Контроль уставок (в темпе измерений)
- контроль значений измеряемых величин и преобразованных параметров, сравнение с предупредительными/аварийными уставками для всех каналов;
- при срабатывании уставки – извещение цветовой индикацией на графиках и добавление метки в файл замера;

Функции экспресс анализа (в темпе измерений):

- спектральная обработка регистрируемого/воспроизводимого сигнала с отображением в виде спектрограмм (до 8192 спектральных линий, различные весовые окна, усреднение); до 24 спектрограмм одновременно;
- экспресс обработка – вычисление СКЗ, ПИК, ПИК-ПИК, среднего значения регистрируемого/воспроизводимого сигнала на всех каналах с отображением в виде цифровых значений в таблице и в виде произвольного количества графиков зависимости от времени (трендов);
- программное однократное и двукратное интегрирование сигнала с высокой точностью (одновременно до 24 каналов);
- расчет частоты сигнала (скорость вращения вала по сигналу с датчика оборотов); произвольное количество частотных каналов; построение графика зависимости от времени;
- расчет амплитудных и фазовых характеристик сигнала на частоте вращения вала и его гармониках для всех каналов; построение графиков зависимости от времени;
- построение графиков АФЧХ (до 24);
- расчет и отображение 1/3-октавного спектра по произвольному количеству каналов (до 24);

Автоматизированное формирование отчета (в темпе измерений):

- добавление текущего состояния изделия (по данным экспресс анализа) в файл отчета по нажатию клавиши; таким образом, по завершении испытания доступен отчет, содержащий подробную информацию о параметрах работы изделия на разных режимах и в контрольных точках; отчет можно печатать непосредственно с МІС-300, используя стандартный принтер;
- сохранение в графический файл текущей страницы отображения с графиками, трендами и таблицами для последующего включения в отчет;

Метрологическая поддержка (на этапе подготовки к измерениям):

- автоматизированная калибровка, градуировка, балансировка аналоговых каналов

10. Для проведения виброисследований и диагностики ГТУ, в комплектацию аппаратуры МІС-300М должны входить: вибропреобразователи высокочастотные до 30 КГц – 2 шт., вибропреобразователи низкочастотные до 1 Гц – 2 шт., таходатчики – 2 шт. (для ГТУ с редуктором).