

Диагностика зубчатых передач виброакустическими методами

Вибрационная диагностика является одной из наиболее важных задач контроля зубчатых передач, обнаружения дефектов и оценки остаточного ресурса в реальных условиях эксплуатации или в условиях, максимально приближенных к реальным.

В настоящей статье рассмотрены возможности использования виброакустического анализатора А17 для контроля работоспособности зубчатых зацеплений. На примере работы экспериментальных зубчатых передач рассматриваются возможности применения виброакустических методов для диагностики испытательной техники контроля повреждений зубчатых колес в условиях усталостных испытаний.

В статье кратко рассматриваются различные методы контроля зубчатых передач. В каждой схеме измерений и диагностики зубчатых передач существуют свои особенности и режимы работы механизмов. В данной статье описываются методы обработки сигналов для стационарных режимов. Для детального понимания происходящих процессов необходимо использовать различные измерительные каналы, поступающие от различных датчиков. Датчики виброускорения (вибродатчики) устанавливаются максимально близко к зоне зубчатых передач. Желательно их устанавливать в продольном и поперечном направлениях оси вращения. Контрольные вибродатчики устанавливаются на опорах механизма привода, сервисных двигателей, насосов. Микрофон – вблизи зоны контролируемых зубчатых передач. Датчик оборотов может устанавливаться на одном из валов привода. Кроме этих параметров также могут контролироваться в случае необходимости температура (термопара или терморезистор), давление (датчик давления), механические напряжения (тензодатчик), напряжение, частота и фаза питающей сети.

Испытания проводятся в условиях, когда работает большое количество различных механизмов создающие акустические, вибрационные и электромагнитные помехи. Основной задачей применения различных методов анализа сигналов является возможность выделения «полезного» сигнала исследуемого узла на фоне мешающих факторов.

Диагностику можно проводить следующими способами:

- [по спектру вибросигнала;](#)
- [по сверхузкополосному спектру;](#)
- [по взаимоспектральным характеристикам;](#)
- [по взаимокорреляционным характеристикам;](#)
- [по спектру огибающей;](#)

- [по порядковому анализу.](#)

1. Диагностика по спектру вибросигнала

Одним из самых распространенных методов анализа виброакустических сигналов является спектральный анализ с равномерным или логарифмическим шагом по частоте. Суть метода заключается в разложении сигнала на набор гармонических колебаний. В качестве примера рассмотрим сигнал, поступающий от вибродатчика, который установлен в зоне вращения зубчатых передач. На рисунке 1 представлен спектр мощности сигнала с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 100 Гц. Шаг по частоте и, следовательно, частотное разрешение спектрального анализа составляет 0,12 Гц. Спектр рассчитан при помощи программы “Узкополосный спектральный анализ”.

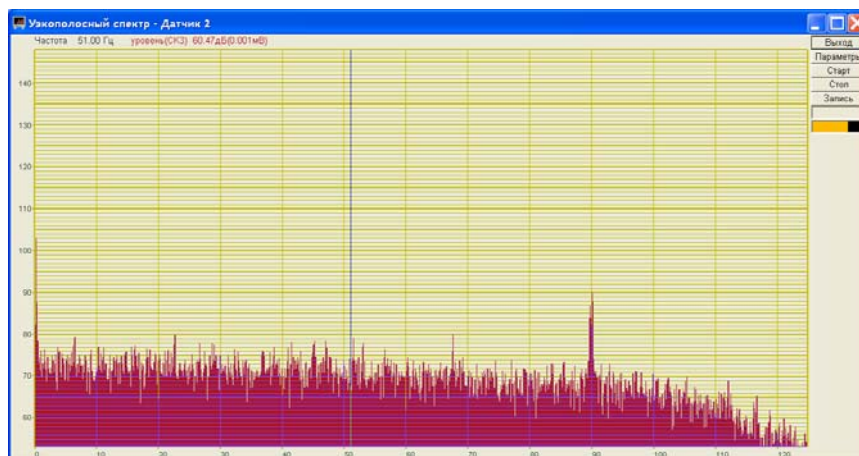


Рисунок 1

На графике наблюдается пик на частоте около 90 Гц. Эта частота соответствует оборотам вала – 5400 об/мин. Наличие этого частотного пика в спектре сигнала вибродатчика говорит о биениях, происходящих на каждом обороте вала. Причин может быть несколько. Для выявления основного источника биения на вальной частоте необходимо установить датчики рядом с подшипниками вала и сравнить полученные спектры. Также необходимо сравнивать спектры сигналов с контрольных датчиков стоящих на опорах сервисных механизмов, чтобы убедиться в том сигнал на 90 Гц не является наведенным от других механизмов. На рисунке 2 представлен спектр сигнала с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 1000 Гц.

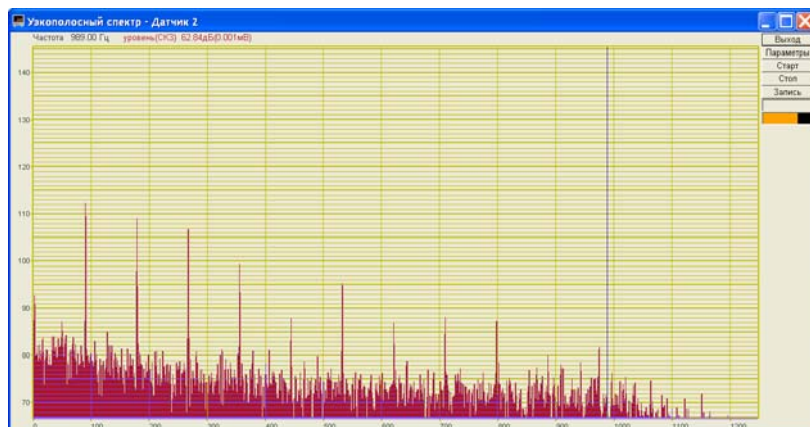


Рисунок 2

Частотное разрешение спектрального анализа составляет 1,2 Гц. На этом рисунке видны пики на частотах 90, 180, 270 и так далее на кратных 90 Гц частотах. Отчетливо наблюдаются частотные пики до 9-ой гармоники 90 Гц. Наличие гармоник основной частоты показывает, что колебания или биения происходят не по гармоническому закону. Наличие четных гармоник 2, 4 и т.д. говорит о несимметричных колебаниях. На рисунке 3 представлен спектр сигнала с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 10 кГц. Частотное разрешение спектрального анализа составляет 48 Гц. На этом рисунке уже не видны пики вальной частоты и ее гармоник. Но в этом частотном диапазоне спектрального анализа проявляется зубцовая частота в окрестности 3 кГц и гармоники на частотах 6 и 9 кГц. Для оценки частоты вращения вала можно использовать сигнал от датчика оборотов и его спектр.

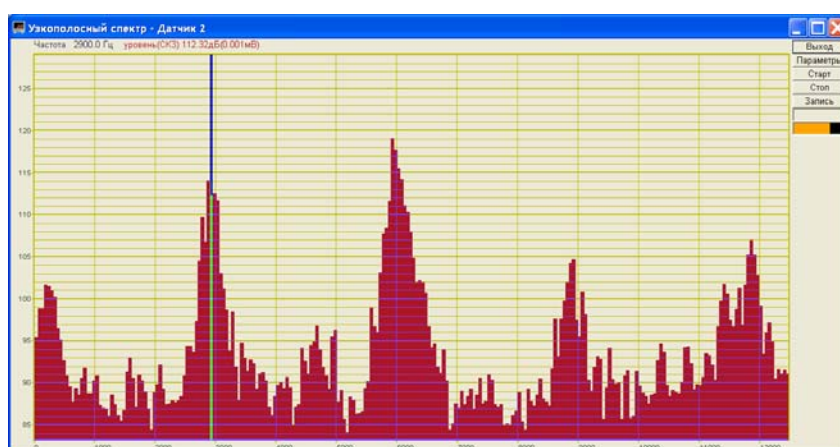


Рисунок 3

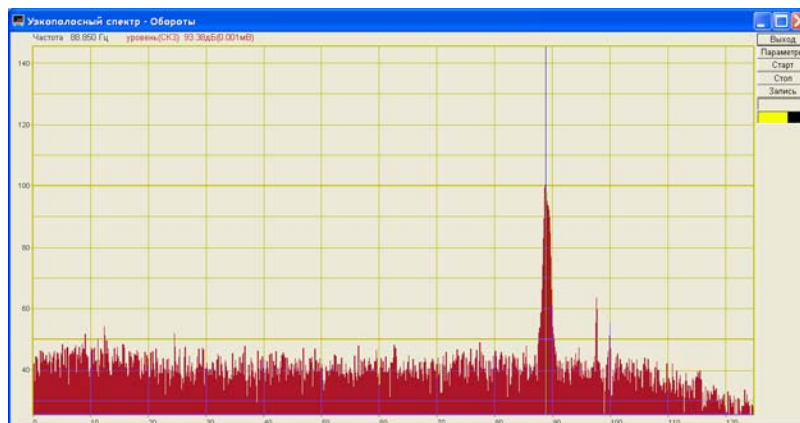


Рисунок 4

На рисунке 4 представлен спектр сигнала датчика оборотов с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 100 Гц. Шаг по частоте и частотное разрешение спектрального анализа составляет 0,12 Гц. Частотные пики на рисунке 1 и 4 совпадают, и это подтверждает, что вибрация связана с вращением вала.

Во многих случаях удобно представлять спектр с логарифмическим шагом по частоте. На рисунке 5 представлен спектр мощности сигнала вибродатчика, шаг по частоте составляет 1/24 – октавы, ширина и шаг по частоте составляют 3% от значения частоты. Такой вид представления спектра сигнала позволяет наблюдать одновременно малые и большие частоты. На левой стороне рисунка видны частотные пики вальной частоты и ее гармоник 90, 180 ..., на правой стороне рисунка видны частотные пики зубцовой частоты и ее гармоник 3, 6 и 9 кГц. Спектр рассчитан при помощи программы “Долеоктавный спектральный анализ”.

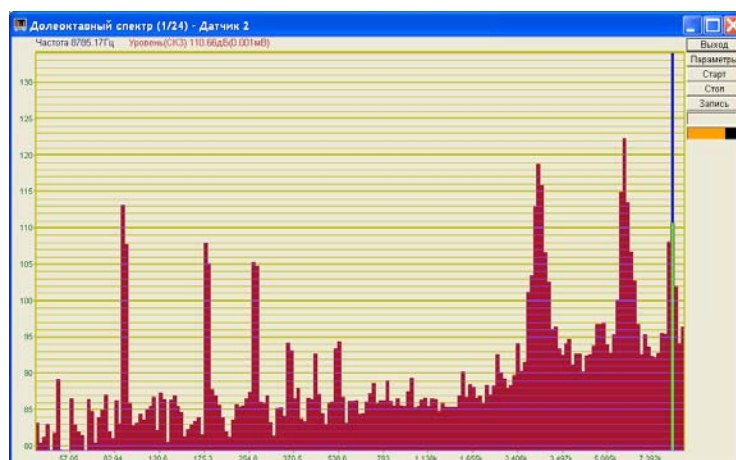


Рисунок 5

Контроль и отбраковка зубчатых передач может проводиться по уровням спектральных компонент основных и кратных гармоник вальных и зубцовых частот.

[В начало документа](#)

2. Диагностика по сверхузкополосному спектру

При наличии множества механизмов, вращающихся примерно с одной частотой, применение традиционного спектрального анализа не дает ощутимых результатов. Например, имеется несколько асинхронных двигателей – насосов, приводов, вентиляторов, питающихся от сети 50 Гц и вращающихся со скоростью 3000 об/мин. В спектре мощности сигнала вибродатчика в одной частотной компоненте 50 Гц с шириной 0.12 Гц будут присутствовать вибрации всех механизмов и сигнал электрической наводки, т.е. в спектре эти сигналы разделяться не будут. Для разделения спектральных компонент различных источников необходимо использовать режим лупы спектрального анализа. На рисунке 6 показан график со спектром мощности сигнала в равномерной сетке частот с разрешением 0.01 Гц. При таком спектральном анализе частотные компоненты разделяются, и это позволяет проводить измерения вибрации каждого механизма по отдельности. Особенностью этого метода является требование длительности наблюдения – до 100 секунд и стабильности частот источников вибрации.

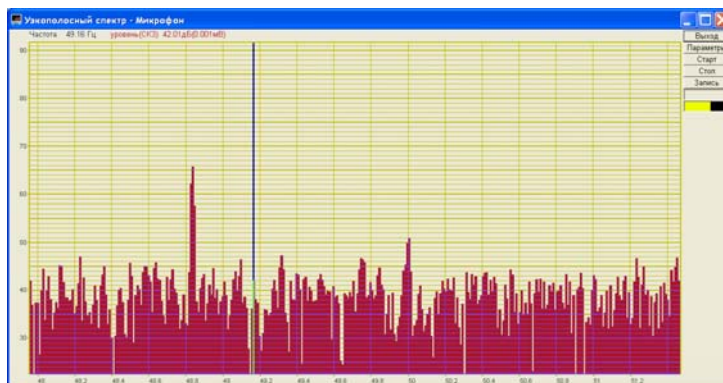


Рисунок 6.

Построение наборов спектров в виде спектрограмм позволяет получать дополнительную информацию о нестабильности по частоте и амплитуде сигнала. Спектрограмма представляет собой последовательно рассчитываемые и отображаемые спектры мощности. По горизонтали откладываются значения частот, по вертикали время наблюдения. Уровень спектральных компонент отображается цветом. Низкие уровни отображаются светлыми тонами, высокие – темными. На рисунке 7 показана спектрограмма сигнала вибродатчика

установленного на опоре механизма со скоростью вращения около 5500 об/мин. Время наблюдения – 300 секунд. Нестабильность частоты на интервале наблюдения составляет 0,5%. Нестабильность зависит от момента вращения, нагрузки и прочих факторов.

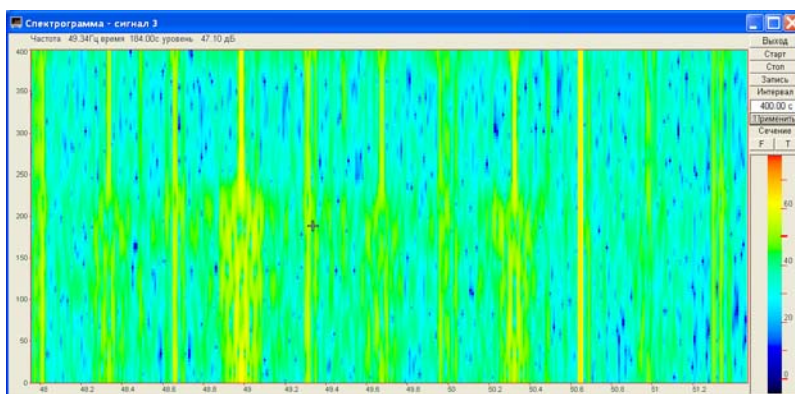


Рисунок 7

Параметр нестабильности вращения также может быть использован при контроле зубчатых передач.

[В начало документа](#)

3. Диагностика по взаимоспектральным характеристикам

При наличии датчика оборотов и вибродатчиков можно определить дисбаланс вала, его вид и местоположение (вид колебаний вала, подшипник на котором происходят большие вибрации и угол поворота, относительно метки датчика давления). На рисунке 8 показана фаза взаимного спектра двух сигналов – датчика оборотов и вибродатчика.

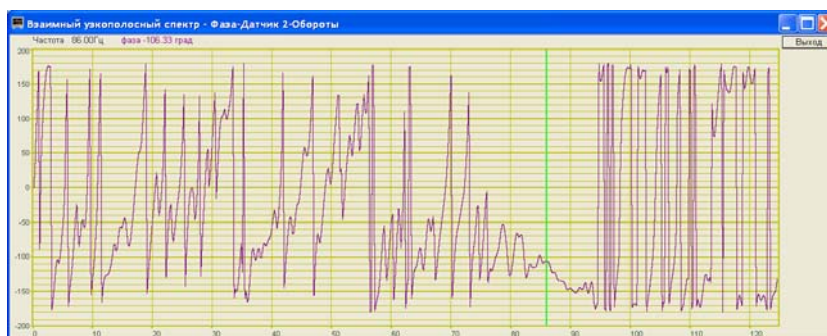


Рисунок 8

В окрестности вальной частоты 90 Гц угол расхождения двух сигналов составляет около –130 градусов. Эти данные можно использовать для балансировки вала.

Степень когерентности – отношение модуля взаимного спектра к значениям спектра мощности каждого измерительного канала – определяет взаимосвязь двух процессов. В

данном случае степень когерентности сигналов датчика оборотов и вибродатчика на вальной частоте близка к 100%, что говорит о том, что вибрации измеряемые вибродатчиком на частоте около 90 Гц определяются вращением вала.

[В начало документа](#)

4. Диагностика по взаимокорреляционным характеристикам

При проведении испытаний важно установить вибродатчики так, чтобы они воспринимали сигнал изучаемого участка. Для контроля установки датчиков можно использовать микрофон расположенный вблизи изучаемого участка. Применяя взаимокорреляционный метод можно локализовать основные источники шумовых и вибросигналов. Скорость распространения продольных и поперечных колебания в металле составляет несколько километров в секунду. Скорость распространения акустических колебаний в воздухе составляет 300 м/с. В этих условиях можно предположить, что сигнал от источника поступает на вибродатчик мгновенно и на микрофон с некоторой задержкой. Взаимокорреляционная функция сигналов от вибродатчика и микрофона позволяет измерить временную задержку между сигналами. Если задержка распространения акустического сигнала от исследуемого участка до микрофона соответствует местоположению корреляционного пика, то это значит, что основной сигнал поступает от исследуемого участка и вибродатчик установлен правильно. На рисунке 9 показана взаимокорреляционная функция, рассчитанная в полосе частот около зубцовой частоты 3 кГц. Расстояние от микрофона до исследуемого узла составляет 0,5 м. Корреляционный пик также находится на отметке 0,5 м.

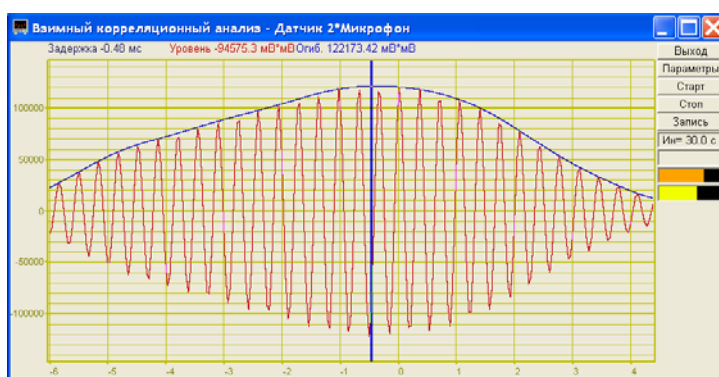


Рисунок 9

[В начало документа](#)

5. Диагностика по спектру огибающей

В случае возникновения и развития дефекта на вращающемся элементе в шумовых полосах связанных с сигналами от этого дефекта, должны наблюдаться амплитудная модуляция равная частоте вращения. Степень модуляции зависит от уровня развития дефекта. Для поиска и анализа такого рода неисправностей служит программа – огибающая. Эта программа реализована следующим образом.

Пользователь настраивает цифровой фильтр (внешний вид программы фильтрации сигналов показан на рисунке 10, а) – центральную частоту фильтра и ширину полосы фильтра. После этого фильтр с заданными параметрами обрабатывает входной поток оцифрованных данных. После схемы фильтра работает детектор и интегратор. Выходной сигнал после обработки можно посмотреть в виде графика. На рисунке 10, б показаны графики сигналов: исходный сигнал, сигнал после фильтра и огибающая сигнала вибродатчика. Ширина полосы равна 200 Гц, центральная частота фильтра 3 кГц – первая зубцовая частота.

Фильтрация сигналов				
Канал фильтра	Ф1 AP98	Ф2 AP98	Ф3 AP98	Ф4 AP98 +
Исходный канал	AP98	AP98	AP98	AP98
Тип фильтра(инт-диф)	линейный	линейный	интег. 1	интег. 2
Фильтр ВЧ	+	+	+	+
Частота ФВЧ, Гц	2800.00	2800.00	10.00	10.00
Спад, дб/окт	48.00	48.00	12.00	12.00
Фильтр НЧ	+	+	+	+
Частота ФНЧ, Гц	3100.00	3100.00	1000.00	1000.00
Спад, дб/окт	48.00	48.00	24.00	24.00
Огибающая		+		
Время инт. мс		1.000		
Единица изм.	g	g	мм/с	мм
Опора (дБ)	0.000030	0.000030	0.000050	0.001000
Количество фильтров 4				

Рисунок 10, а

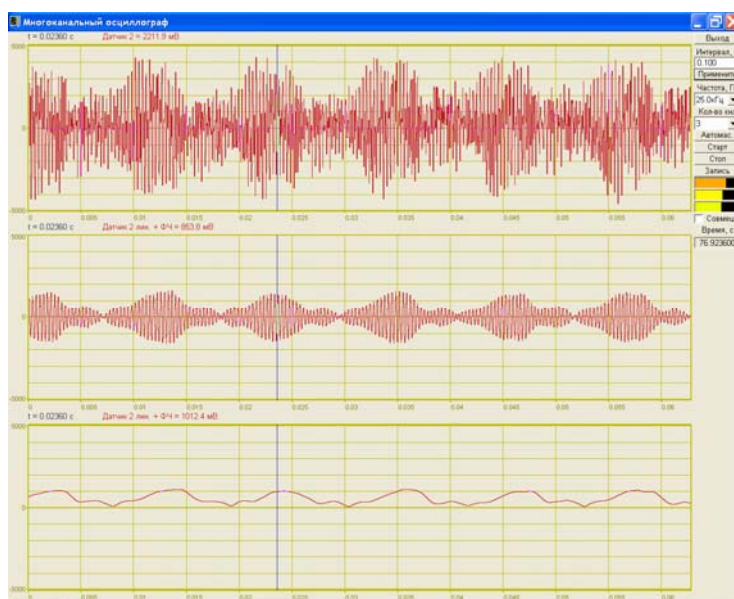


Рисунок 10, б

Для выделения периодической составляющей из амплитудной огибающей сигнала используется преобразование Фурье, и тогда получается спектр амплитудной огибающей. На рисунке 11 показан график спектра амплитудной огибающей. На графике виден пик на частоте около 90 Гц, равной частоте вращения вала. Большой уровень этого пика, показывает о большой степени модуляции сигнала вибродатчика на зубцовой частоте и следовательно, это говорит о степени осевой несимметричности зубчатой пары.

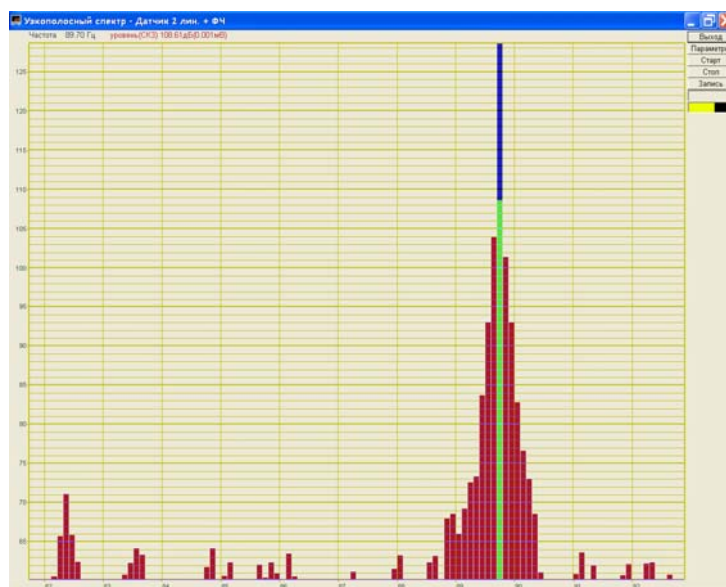


Рисунок 11

По уровню модуляции амплитудной огибающей и, значит, по уровню спектра огибающей можно судить о степени развития дефекта и использовать этот метод для поиска неисправностей и контроля выходных изделий.

[В начало документа](#)

6. Диагностика по порядковому анализу

При наличии датчика оборотов и вибродатчиков можно исследовать временные характеристики сигналов вибрации зубчатых передач. Как уже говорилось выше, сигнал вибродатчика зашумлен сигналами от других источников. Для того чтобы отстроиться от мешающих сигналов реализуется метод синхронного накопления сигналов. На каждом обороте вала датчик оборотов дает метку оборота. Этот сигнал является запускающим стробом для развертки сигнала вибродатчика. Получаемые развертки сигналов суммируются. При этом все источники сигналов связанных с вальной частотой (частотой оборотов) накапливаются и увеличиваются в сумматоре линейно пропорционально количеству обо-

ротов N . Все остальные сигналы, некоррелированные с вальной частотой, накапливаются пропорционально $\sqrt{N}$, и при большом количестве усреднений полезный сигнал превышает уровень помехи. На рисунке 12 показан результат синхронного накопления сигнала вибродатчика в частотном диапазоне до 10 кГц. Частота оборотов около 90 Гц. На рисунке отчетливо видны сигналы от зубцов передачи. Количество зубцов в передаче 35. На рисунке 13 показан результат синхронного накопления сигнала вибродатчика в частотном диапазоне до 1 кГц. В этом частотном диапазоне отсутствуют высокочастотные зубцовые частоты. И поэтому на рисунке не видны сигналы от зубцов. Но присутствуют сигналы вальной частоты и их гармоники. На графике виден сигнал виброускорения вала. Если рассчитать интеграл по виброускорению, то в результате получается виброскорость. Повторный интеграл позволяет получить виброперемещение. На рисунках 14 и 15 показаны виброскорость и виброперемещение в месте установки датчика ускорения.

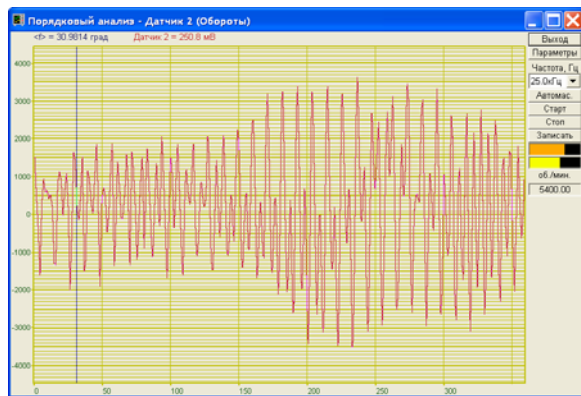


Рисунок 12

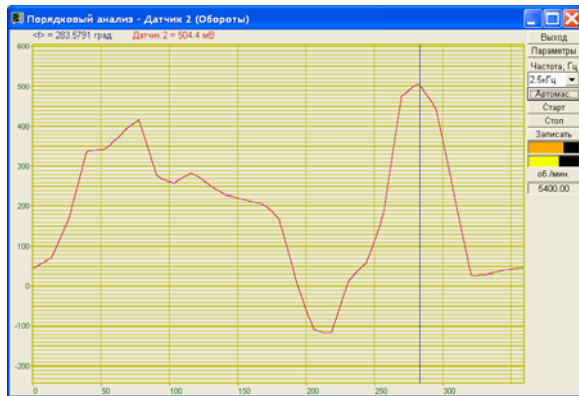


Рисунок 13

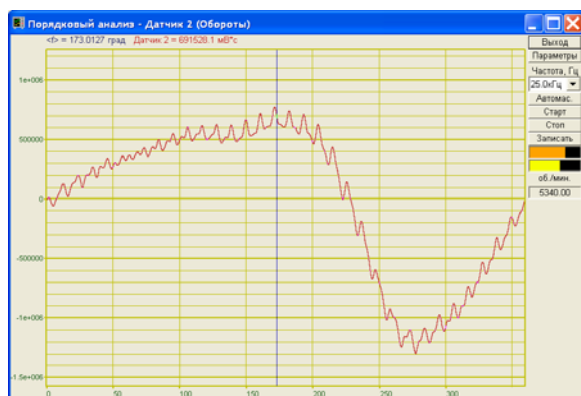


Рисунок 14

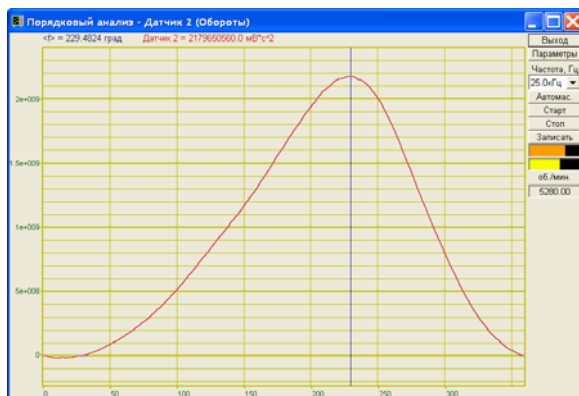


Рисунок 15

На рисунках 16,17 и 18 отображены графики виброускорения, виброскорости и виброперемещения в полярных координатах с наложением на график рисунка с зубцовой передачи. В таком представлении сразу видно, при какой фазе угла поворота происходят уда-

ры при зацеплении или расцеплении зубчатой пары. На рисунке 18 показан график виброперемещения, по которому можно определить параметры для балансировки ведущего вала.

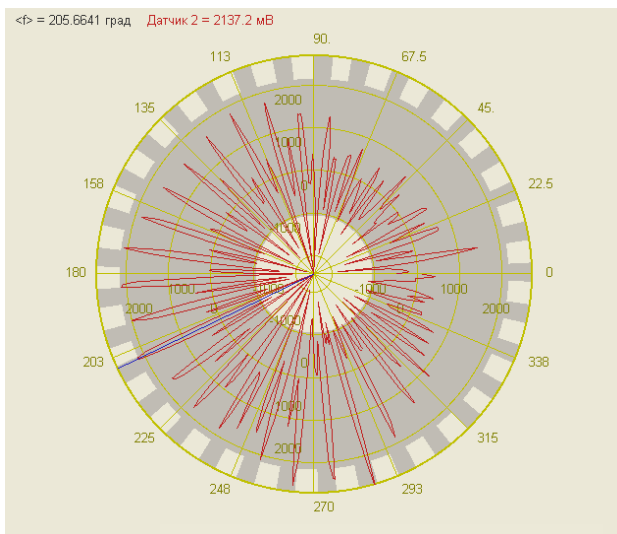


Рисунок 16

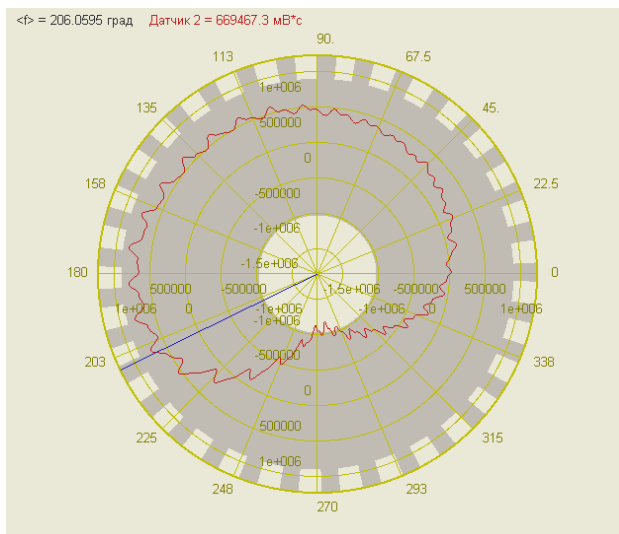


Рисунок 17

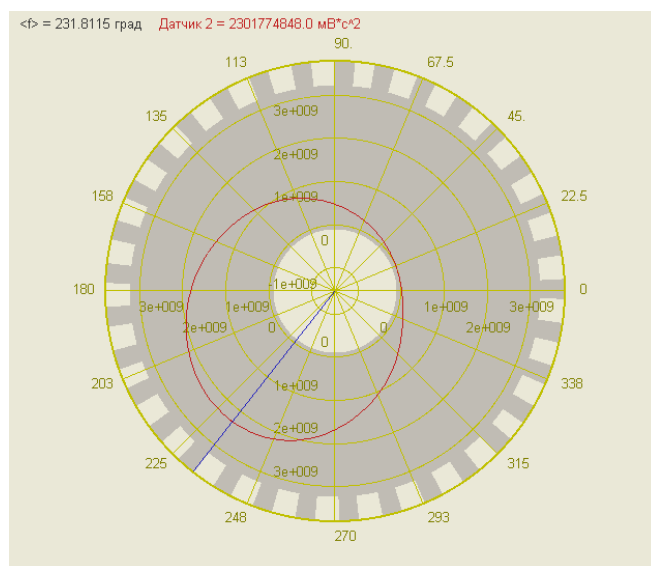


Рисунок 18

Разложение в ряд Фурье сигнала полученного за один оборот вала позволяет получать уровни вибрации для каждой гармоники частоты вращения вала. На рисунке 19 показан спектр сигнала до 120-ой гармоники. На спектре хорошо наблюдаются зубцовые гармоники. Первая гармоника равна количеству зубцов. Отображение спектров во времени в виде спектрограммы позволяет (рисунок 20) проследить за изменениями гармоник колебаний во времени. Отображение уровня выбранных гармоник в развертке по времени (проходные характеристики, рисунок 21) позволяет контролировать по уровню сигнала о сте-

пени приработки зубцовой пары или о начале разрушения зубцовой пары при прочностных испытаниях.

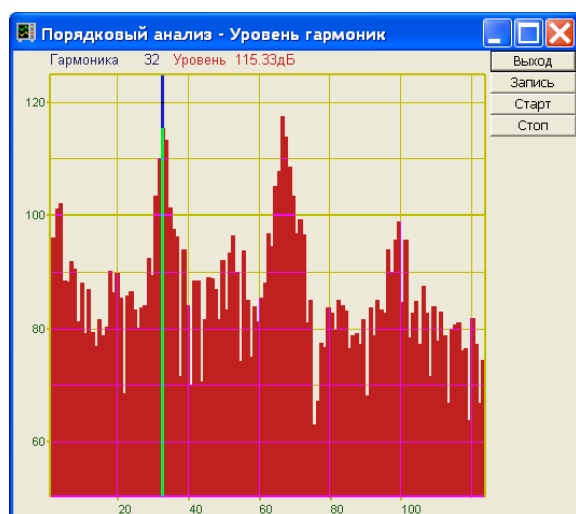


Рисунок 19

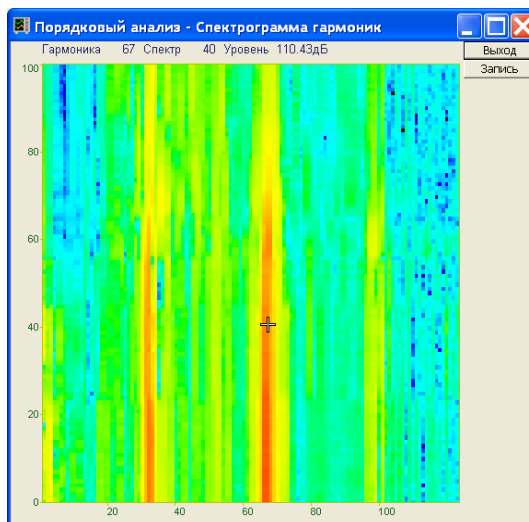


Рисунок 20



Рисунок 21

Анализатор А17 позволяет одновременно запускать несколько программ анализа и отображения сигналов. Это позволяет создавать различные комплексы для проведения испытаний, систем контроля и мониторинга состояния зубчатых передач. На рисунке 22 представлены программы самописцы – частоты (для слежения частоты обороты вала), уровня переменного сигнала (для слежения за интегральным уровнем сигнала вибродатчика), уровня постоянного сигнала (для слежения за температурой и давлением). Совместное применение нескольких программ позволяет проводить испытания на нестационарных режимах - на разгоне и выбеге зубцовой пары.

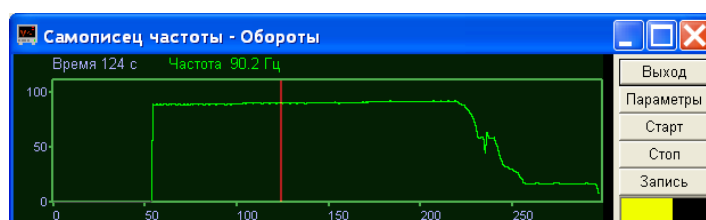




Рисунок 22

[В начало документа](#)