

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Горного дела, геологии и геотехнологий
институт
Горные машины и комплексы
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
А.С. Морин
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2021 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

21.05.04.09 «Горные машины и оборудование»

код и наименование специальности

«Диагностирование дефектов по данным анализа фазовых углов

тема

в приводах горного оборудования»

Руководитель _____
подпись, дата

профессор, д.т.н.
должность, ученая степень

А.О. Шигин
инициалы, фамилия

Выпускник _____
подпись, дата

Д.В. Ситников
инициалы, фамилия

Консультанты:

Безопасность жизнедеятельности

и охрана труда
наименование раздела

подпись, дата

А.В. Галайко
инициалы, фамилия

Экономическая часть
наименование раздела

подпись, дата

Р.Р. Бурменко
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

А.О. Шигин
инициалы, фамилия

Красноярск 2021

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Горного дела, геологии и геотехнологий
институт

Горные машины и комплексы
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ А.С. Морин

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме дипломной работы

бакалаврской работы, дипломного проекта, дипломной работы, магистерской диссертации

Студенту Ситников Дмитрий Викторович
фамилия, имя, отчество

Группа ЗГГ 14-06 Направление (специальность) 21.05.04.09
номер код

«Горные машины и оборудование»
наименование

Тема выпускной квалификационной работы «Диагностирование дефектов
по данным анализа фазовых углов в приводах горного оборудования»

Утверждена приказом по университету № _____ от _____ г.

Руководитель ВКР _____
инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР _____

Перечень разделов ВКР _____

Перечень графического материала _____

Руководитель ВКР _____
подпись

А.О. Шигин
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению _____
подпись, инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 20__ г.

Реферат

Выпускная квалификационная работа по теме «Диагностирование дефектов по данным анализа фазовых углов в приводах горного оборудования» содержит 100 страниц, 30 иллюстраций, 12 таблиц, 3 формулы, 1 приложение, 11 использованных источников.

Целью выпускной дипломной работы является создание дополнительного метода вибродиагностики по анализу фазовых углов. Для реализации основной цели, необходимо выполнить ряд задач:

- изучить отечественный и зарубежный методы вибродиагностики;
- разработать и собрать экспериментальную установку;
- провести ряд экспериментов;
- произвести анализ полученных данных и сделать заключения.

Актуальность данной дипломной работы обусловлена тем, что создание новых методов вибродиагностики значительно облегчит работу технического персонала по выявлению дефектов. Что в свою очередь повлечёт повышение экономической эффективности использования оборудования в горной промышленности.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Описание установки.....	9
2 Общие сведения о диагностике горного оборудования.....	11
2.1 Способы диагностики состояния оборудования.....	11
2.2 Возникновение вибрации.....	14
2.3 Параметры и единицы измерения вибрации.....	15
2.4 Средства измерения вибрации.....	16
2.5 Способы крепления датчиков измерения вибрации.....	17
2.6 Выбор места установки датчиков.....	18
2.7 Порядок проведения измерений.....	19
3 Моделирование дефектов привода.....	24
3.1 Небаланс.....	24
3.1.1 Общие вопросы.....	24
3.2 Статический небаланс.....	29
3.2.1 Динамический небаланс.....	33
3.2.2 Моделирование небаланса.....	35
3.3 Резонанс.....	43
3.3.1 Моделирование резонанса.....	45
3.4 Расцентровка.....	45
3.4.1 Особенности диагностики расцентровки.....	47
3.4.2 Влияние типа муфты на вибрацию при расцентровке.....	50
3.4.3 Моделирование расцентровки.....	54
4 Результаты исследований.....	62
4.1 Дисбаланс статический.....	62
4.2 Дисбаланс динамический.....	63
4.3 Резонанс.....	65
4.4 Расцентровка угловая.....	66
4.5 Расцентровка параллельная.....	67
5 Контрольное исследование на примере ЭШ 10/70.....	69

6 Экономическая часть.....	74
6.1 Расчёт сетевого графика выполнения разделов ВКР.....	75
6.2 Смета затрат на создание экспериментально установки.....	78
6.2.1 Расчёт стоимости оборудования и амортизации.....	78
6.2.2 Расходы на оплату труда.....	79
6.2.3 Расходы на электроэнергию.....	80
7 Безопасность жизнедеятельности и особенности эксплуатации предложенного оборудования.....	82
Заключение.....	87
Список использованных источников.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ А Презентация ВКР.....	89

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, внедрение новых и усовершенствованных методов диагностирования значительно облегчает выявление и предупреждение отказов и неисправностей поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования до ремонтного и межремонтного ресурса.

Методы вибродиагностики направлены на выявление и идентификацию неисправностей агрегатов горных машин и оборудования, влияющих на их вибрацию – дефектов роторов, дефектов опорной системы, подшипников скольжения и подшипников качения, узлов статора, зубчатых и ременных передач, испытывающих или генерирующих динамические нагрузки.

Цели вибродиагностики:

- предупреждение развития дефектов агрегата и сокращение затрат на его восстановление;
- определение оптимальной технологии восстановления работоспособности агрегата, если возникший дефект исключает возможность его нормальной эксплуатации.

Носителем информации о техническом состоянии элементов работающего оборудования в вибродиагностике является виброакустический сигнал – собирательное понятие, включающее информацию об акустическом шуме и колебательных процессах агрегата.

Особенность процесса диагностики – вибросигнал практически мгновенно реагирует на изменение состояния оборудования, что определяет скорость постановки диагноза и принятия решения.

Задачами вибродиагностики является разделение множества возможных технических состояний механизма на два подмножества: исправных и неисправных; постановка диагноза, состоящего в определении характера и локализации одного или группы дефектов, соответствующих вибрационному состоя-

нию агрегата; возможное обнаружение дефекта на ранней стадии и прогнозирование его развития во времени.

При помощи диагностики, можно продлить срок службы имеющегося оборудования. Основные узлы и детали спецтехники должны проверяться регулярно, для предотвращения серьезных поломок, поскольку ремонт техники более дорогой и длительный, чем диагностика. Диагностика и техническое обслуживание узлов машин имеет первостепенное значение в работоспособности техники, это не требует доказательств, так как даже самые небольшие ошибки и погрешности могут привести к серьезным, порой фатальным последствиям.

Во многих случаях не возможно точно идентифицировать дефект при помощи вибродиагностики по спектрам вибрации. Поэтому на разработанной установке были проведены эксперименты с моделированием дефектов приводов оборудования, и по полученным данным выведены правила диагностирования дефектов по данным анализа фазовых углов.

1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ.

Представленная установка - обычный привод, который состоит из трехфазного электродвигателя, двухступенчатого цилиндрического редуктора. Общий вид установки показан на рис.1.

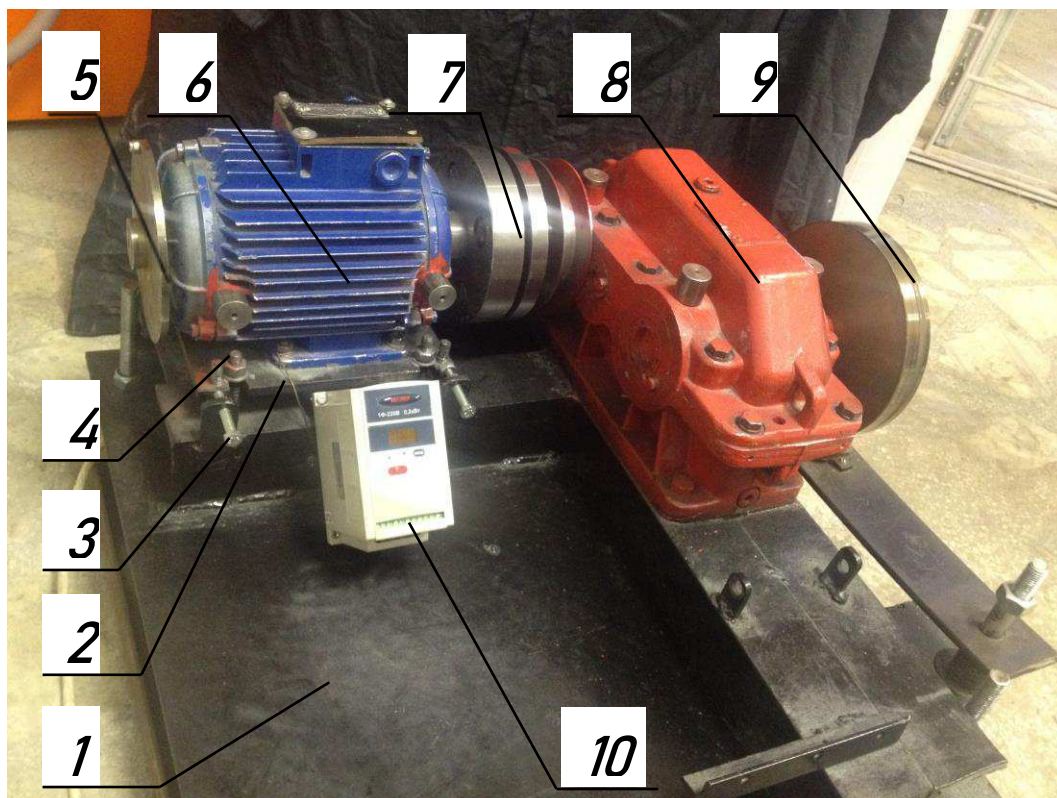


Рисунок 1 - Общий вид установки:

- 1 - рама; 2 - подвижная платформа; 3 – горизонтальный регулировочный болт;
- 4 - вертикальный регулировочный болт; 5 - перфорированный диск;
- 6 - электродвигатель;
- 7 - муфта; 8 - редуктор; 9 – нагрузочный диск;
- 10 – преобразователь частоты.

К платформе жёстко крепится электродвигатель, платформа перемещается относительно рамы по вертикали и горизонтали при помощи регулировочных болтов. Благодаря перемещению данной платформы, на которой прикреплен электродвигатель, можно моделировать такие дефекты как: угловая расцентровка, параллельная расцентровка.

Изменяя угол положения установки относительно горизонтальной поверхности на величину 8 град. (поочередно поднимая левую, правую, заднюю и переднюю стороны установки), производятся замеры с помощью виброанализатора СД-21. Настройки виброанализатора: интегрирование однократное цифровое; частотный диапазон измерения среднеквадратического значения виброскорости: 3-800 Гц, разрешение - 800 линий; количество усреднений - 6; режим усреднения - нормальный; тип окна данных – Ханнинга; первичный сигнал снимался с помощью вибропреобразователя типа 603 V01, (чувствительностью 106 mV/g, способ крепления – магнит). В качестве численной характеристики вибрации использовалось среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости (мм/с). Измерения вибрации проводились на подшипниковых узлах в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Показания прибора получены в виде спектров, для удобства анализа - наложенных друг на друга, для каждого из направлений измерения.

Рама установки крепится к бетонному основанию с помощью анкерных болтов на шпильках. С их помощью производится регулировка угла наклона в четырех плоскостях.

На валах электродвигателя располагаются диски с просверленными в них отверстиями для моделирования дисбаланса, с помощью установки в них грузов (в одной или двух плоскостях).

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИАГНОСТИКЕ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

2.1 Способы диагностики состояния оборудования

В самом общем случае выявить наличие повышенной вибрации в работающем оборудовании и определить причины, приведшие к этому, можно несколькими способами. Эти применяемые на практике вибродиагностические способы оценки технического состояния и диагностики причин повышенной вибрации оборудования различаются применяемыми техническими измерительными средствами (вибромеры, спектроанализаторы) и также видом персонала, проводящим диагностику, имеют различную себестоимость и трудоемкость.

Наибольшее применение на практике нашли несколько способов, основными из которых являются:

- визуальный осмотр оборудования во время работы.

Выполняется обычно и оперативным и эксплуатационным персоналом. Полученная информация носит общий характер и просто заноситься в журналы, носит справочный характер.

Возможность данного способа контроля технического состояния оборудования весьма ограничены – при его помощи производится выявление дефектов состояния только при помощи внешнего осмотра. Этим способом удастся выявить только самые крупные дефекты и обычно на самых последних стадиях развития.

Технические средства в данном способе или совсем не нужны или не значительны по своему составу.

- замер общего уровня вибрации переносным виброметром.

По своим функциям данный способ очень похож на предыдущий, но дополнен применением простейших переносных виброизмерительных приборов – виброметров. Выполняется также или оперативным персоналом или ремонт-

ным. Иногда производится и вибродиагностическим персоналом в процессе проведения массовых обследований.

Возможности такого обследования существенно выше, это уже объективно. Нормированная оценка общего состояния оборудования при помощи сопоставления результатов виброзамеров с нормированными значениями вибрации для данного агрегата.

Необходимые технические средства для проведения таких обследований достаточно просты и дешевы – переносные виброметры, обычно измеряющие виброскорость в мм/сек.

- замер общего уровня вибрации переносным виброметром с записью измеренных значений в блокнот и переносом в дальнейшем в память ЭВМ. Ввод в ЭВМ осуществляется при помощи ручного ввода или через разъем интерфейса, если это предусмотрено конструкцией прибора.

Такой способ диагностики технического состояния осуществляется вибродиагностическим персоналом в процессе массовых исследований.

Возможности этого способа достаточно обширны – это и оценка состояния оборудования при помощи сопоставления результатов замеров с нормируемыми значениями и анализ изменений, и получение дополнительной диагностической информации в соответствии с возможностями применяемой специализированной вибродиагностической программы.

Технические средства данного способа диагностики состояния несколько больше по стоимости, здесь дополнительно к переносному виброметру необходимо наличие персонального компьютера с программой диагностики.

- замер контурной вибрации на конструкции или фундаменте.

Данные измерения и диагностика выполняются уже только силами специального вибродиагностического персонала в процессе специальных исследований, обычно фундаментов и конструкции.

Проведение таких измерений позволяет определить распределение составляющих вибраций вдоль контролируемого элемента конструкции агрегата, позволяет выявить источник “вредной” вибрации. Определить точки резонан-

сов в конструкции. Для полноты анализа желательно измерять не только амплитуду или СКЗ сигнала вибрации, но и контролировать фазу вибрации относительно какой-либо точки.

Основная дополнительная возможность данного способа – непосредственный анализ распределения вибрации от точки к точке, поиск дефектов фундамента, конструкции.

Для практической реализации данного способа диагностики состояния оборудования необходима специальная аппаратура с двумя входами – для сигнала вибрации и для ввода в прибор синхронизирующего сигнала.

- замер спектра вибрации, его анализ на месте при помощи экрана спектроанализатора или при помощи компьютерных экспертных систем после перекачки информации в ЭВМ.

Наиболее информативный, но в тоже время трудоемкий способ контроля состояния оборудования. Требования к квалификации вибродиагностического персонала максимальны.

Технические средства – переносный спектроанализатор широких возможностей и персональный компьютер.

- контроль состояния при помощи стационарных датчиков и постоянной системы контроля состоянию.

Очень оперативный, но в тоже время самый дорогой способ контроля состояния оборудования. Следует помнить, что стационарные системы редко несут в себе функции диагностики, а обычно являются сигнальными и выполняют функции: “тревожное состояние”, “аварийное отключение”. Верхним уровнем стационарных систем являются экспертные вибродиагностические системы.

Технические средства – стационарная система контроля и персональный компьютер.

- осмотр оборудования во время ремонта.

Самый достоверный и надежный способ диагностики состояния оборудования. Этот способ является последней стадией диагностики состояния, но

применение его желательно только в тех случаях, когда все остальные способы диагностики исчерпали свои возможности и не дали необходимого эффекта.

2.2 Возникновение вибрации

Идеальная машина. Теоретически, не должна вообще создавать механических колебаний, так как в ней вся энергия должна превращаться в полезную работу.

На практике всегда при работе любых механических и электромеханических систем возникают механические колебания. Эти колебания возникают как побочный результат при нормальной передаче энергии через механизмы агрегата, как следствие некорректности в процессе преобразования энергии.

Элементы машины динамически взаимодействуют друг с другом, и через конструкцию происходит рассеивание энергии в виде механических колебаний. По мере износа машины, вследствие оседания фундамента, деформации деталей и т.д. в конструкции машины начинают происходить неприметные изменения. Нарушается центровка валов, детали начинают изнашиваться, нарушается баланс роторов, увеличиваются зазоры. Все эти факторы приводят к еще большему увеличению рассеивания энергии в виде механических колебаний. Причины и следствия усиливают и дополняют друг друга, состояние ухудшается все с большей скоростью. Все быстрее приближается момент полного выхода агрегата из строя.

По мере развития неисправностей в машине происходит изменение динамических процессов, происходят количественные и качественные изменения сил, воздействующих на детали машин. В результате изменяется как сам уровень механических колебаний, так и их форма.

Необходимо всегда четко представлять, что при измерении вибрации регистрируется не сила, возбуждающая эти вибрации и не параметр, пропорциональный этой силе, а реакция элементов конструкции оборудования на воздействие этой силы, линейные перемещения контролируемой точки.

Собственно сила, вызывающая вибрации, есть результат отклонений от идеальности в состоянии конструкции. Эта сила изменяется во времени по направлению и величине, периодически, а иногда и по случайному закону, описывая в пространстве сложную кривую.

Вибрация, точнее колебания отдельной точки машины во времени, по сути, есть физический сигнал, периодически меняющийся по величине и направлению.

2.3 Параметры и единицы измерения вибрации

Исходный вибросигнал может быть выведен при помощи стандартных математических операций, преобразован в различные взаимосвязанные представления – в виде виброускорения, виброскорости или виброперемещения. Все эти представления информативны в равной степени, т.к. переход от одной к другой осуществляется при помощи взаимно обратимых процедур интегрирования и дифференцирования. Отметим, что с вибродатчиков поступает электрический сигнал, пропорциональный виброускорению.

Для количественного описания вибросигналов наиболее широко используются виброскорость и виброперемещение.

Виброскорость (мм/сек), показывает максимальную скорость перемещения контролируемой точки в процессе её прецессии. На практике измеряется обычно её среднеквадратичное значение (СКЗ), а не максимальное значение виброскорости. Первоначальное появление в практике значения СКЗ обусловлено тем, что чаще всего измерения вибрации велись стрелочными приборами, а они все по принципу действия являются интегрирующими и регистрируют именно среднеквадратичное значение вибросигнала.

Виброперемещение (мкм), показывает максимальные границы перемещения контролируемой точки и характеризуется обычно двойной амплитудой и показывает перемещение от одного крайнего положения до другого противоположного.

Из двух широко применяемых на практике представлений вибросигналов наиболее предпочтительно использование виброскорости, так как это параметр, сразу учитывающий и перемещение контролируемой точки, и энергетическое воздействие на опоры от сил вызвавших вибрацию. Информативность виброперемещения может сравниться с информативностью виброскорости только при том условии, когда дополнительное, кроме размаха колебаний будут учтены частоты, как всего колебания, так и его отдельных составляющих. На практике это весьма проблематично.

Виброускорение ($m^2/сек$), характеризует силовое воздействие в агрегате, которое вызвало данную вибрацию. Применение виброускорения теоретически идеально, т.к. его не нужно специально преобразовывать. Недостатком является то, что для него нет практических разработок, по нормам и пороговым уровням, нет общепринятого физического и спектрального толкования основных особенностей проявления виброускорения. Поэтому, вероятно, анализ состояния оборудования по качественным и количественным параметрам виброускорения дело будущего.

2.4 Средства измерения вибрации

Классификация средств измерения вибрации.

Переносные приборы:

- виброметры – простые показывающие приборы для определения общего уровня вибрации оборудования (по СКЗ виброскорости), не имеющие памяти и интерфейса.

- виброколлекторы – это виброметры для определения общего уровня вибрации оборудования (по СКЗ виброскорости) и временной реализации сигнала, имеющие память и возможность передачи данных в компьютер.

- виброанализаторы – многофункциональные приборы с возможностями определения амплитудно-частотных спектров колебаний, с реализацией различных методов получения информации о состоянии оборудования по вибро-

акустическим сигналам, сбора и анализа диагностических данных, балансировки роторов.

Стационарные системы – многоканальные измерительные комплексы, предназначенные для измерения, регистрации и анализа вибрации контролируемого стационарного оборудования.

2.5 Способы крепления датчиков измерения вибрации

Надежное и качественное крепление вибродатчика на поверхности исследуемого объекта является одним из важнейших условий для получения точных и надежных результатов при измерениях вибрации и распознавания состояния оборудования. ненадежное крепление датчика приводит к уменьшению линейной области амплитудно-частотной характеристики датчика и, следовательно, к значительному уменьшению диапазона измерений акселерометра.

Измерительный кабель при проведении измерений не должен подвергаться интенсивным колебаниям и должен быть удален (по мере возможности) от источников сильных электромагнитных полей.

Основные способы крепления датчика:

- крепление датчика на магните;
- крепление датчика на шпильке;
- крепление датчика на ручном щупе.

Наилучшим способом крепления датчика считается крепление на гладкой плоской поверхности с помощью прочной стальной шпильки. На рабочую поверхность датчика рекомендуется наносить слой консистентной (силиконовой) смазки, что увеличивает общую жесткость механического соединения датчика и объекта измерения, и создает хороший акустический контакт.

Глубина резьбового отверстия должна быть достаточной, чтобы шпилька не упиралась в дно отверстия в основании датчика. В соответствии с рекомендациями ISO 1101 поверхность для крепления датчика должна удовлетворять условиям: шероховатость поверхности - не более 1,6 мкм; перпендикуляр-

ность оси резьбового соединения к плоскости крепления преобразователя – не более 0,02%; неплоскостность поверхности крепления – 0,01 %. Оптимальный крутящий момент при креплении датчика на шпильку М4...М8 – 1,7...2 Нм. Верхняя граница частотного диапазона для проведения измерений составляет 10-15 кГц. Однако, крепление при помощи шпильки имеет неудобства: большие затраты времени на установку и необходимость проведения слесарных работ.

Широкое распространение нашло крепление датчиков на гладкой поверхности объекта с помощью постоянного магнита, в силу своей простоты и дешевизны. При этом статистическая сила сцепления магнита с измерительной поверхностью во многом влияет на диапазон измерений. Требования к обработке поверхности те же, что и для шпилечного соединения. Резонансная частота в этом случае уменьшается примерно в 4,5 кГц и зависит от типа магнита.

Наиболее простым и быстрым является измерение вибрации с помощью щупа, соединяющего вибродатчик с измерительной точкой. Однако рабочий частотный диапазон при этом в большинстве случаев сужается до 200-400 Гц. Угол между измерительной осью вибродатчика и направлением измерения не должен превышать 25 градусов. Следует также учитывать, что при применении различных типов щупов рабочий частотный диапазон может существенно меняться.

2.6 Выбор места установки датчиков

Реакции механических систем на возбуждение механическими колебаниями определяются сложными физическими процессами, поэтому при измерении даже на одном элементе механизма находящихся в близких друг к другу точках ввода может наблюдаться различный характер исследуемых колебаний. Указанное выше актуально для высокочастотной (быстрозатухающей) составляющей вибросигнала, что часто определяется

различными типами распространения высокочастотных колебаний по поверхности.

Производить замеры вибрации важно в одних и тех же местах, называемых контрольными (штатными) точками измерения вибрации.

Измерения параметров вибрации в контрольных точках производятся на подшипниковых опорах агрегата, корпусе агрегата и на анкерных фундаментальных болтах.

Абсолютную вибрацию (при диагностировании большинства механических дефектов) рекомендуется измерять в трех взаимно перпендикулярных направлениях:

- вертикальном, горизонтальном (поперечном) и осевом на агрегатах с горизонтальной осью вращения;

- двух радиальных, расположенных под прямым углом в горизонтальной плоскости, и осевом – на агрегатах с вертикальной осью вращения.

Преобразователи для измерения горизонтальной (поперечной) составляющей вибрации крепят на уровне оси вала напротив середины опорного вкладыша. Осевую составляющую вибрации следует измерять в точке, максимально приближенной к оси вала на корпусе опоры подшипника вблизи горизонтального разъема между крышкой и корпусом. Вертикальную составляющую вибрации измеряют в верхней части крышки подшипника над серединой его вкладыша.

2.7 Порядок проведения измерений

Диагностические измерения и исследования вибрации оборудования условно можно разделить на следующие виды:

- контрольные измерения работающего агрегата;
- специальные диагностические измерения работающего агрегата ;
- обследование остановленного агрегата.

Контрольные измерения предназначены для распознавания и прогнозирования технического состояния агрегата с учетом влияния на него технологических режимов эксплуатации оборудования.

В свою очередь, контрольные измерения можно разделить на текущее контрольное измерение вибрации и полное контрольное измерение вибрации.

Специальные диагностические измерения и обследование остановленного агрегата предназначены для выявления дефектов и причин их возникновения, оценки и прогнозирования степени развития дефектов и разработки рекомендаций по их устранению.

Задачами текущего контрольного измерения вибрации являются:

- определение текущего общего уровня вибрации в контрольных точках;
- сравнение текущего общего уровня вибрации с нормами (уровня тревог).

При выявлении превышения общих уровней вибрации установленных норм (уровней тревог) или появления тенденции возрастания уровня вибрации необходимо безотлагательное проведение полных контрольных измерений.

Текущее контрольное измерение позволяет с минимальными трудозатратами обеспечить мониторинг состояния оборудования в период между более дорогими полными контрольными измерениями вибрации и, в большинстве случаев, вовремя обратить внимание на изменение состояния оборудования, если оно происходит.

В задачи полного контрольного измерения вибрации входят:

- определение текущего уровня контролируемого параметра вибрации в контрольных точках;
- распознавание состояния оборудования, включающее сравнение текущего уровня контролируемого параметра вибрации с нормами (уровнями тревог);
- предварительная оценка степени опасности повышенной вибрации (связанных с этим обстоятельства) и локализация мест с максимальной

вибрацией, если обнаружено превышение норм уровня вибрации (уровней тревог);

- принятие немедленного решения о допустимости эксплуатации оборудования. В случае если проблема очень серьезна, возможно проведение частного анализа и установление общего характера вибрации на месте измерения, при необходимости вибрация измеряется в дополнительных точках;

- регистрация, запоминание и анализ результатов измерений;

- составление отчета о текущем состоянии агрегата и возможности его дальнейшей эксплуатации (например, неограниченная по времени эксплуатация, ограниченная по времени эксплуатация, эксплуатация недопустима и др.).

Полное контрольное измерение вибрации включает в себя опрос эксплуатационного персонала, при необходимости ознакомление с документацией на оборудование, осмотр агрегата, подготовку виброаппаратуры и проведение измерения вибрации, составление отчетной документации.

Полное контрольное измерение вибрации производится без вмешательства в режим эксплуатации агрегата и в основном ограничивается измерением трех составляющих вибрации в контрольных измерительных точках (на опорах). Иногда в контрольные измерительные точки включают точки основания рамы, фундаментных болтов, статора и других частей агрегата, в которых вибрация измеряется в случае достижения значением параметра вибрации какой-либо из контрольных точек установленного допустимого значения.

Полное контрольное измерение позволяет распознать состояние агрегата, выяснить наиболее вероятные причины вибрации и при необходимости построить последующие работы таким образом, чтобы выделить из группы возможных, действительную причину.

Если по результатам полного контроля измерения вибрации агрегата не удастся точно установить причины повышенной вибрации, то составляется

программа и производится специальное диагностическое обследование работающего агрегата. Обычно оно включает в себя:

- измерение вибрации всех узлов и частей агрегата, включая все элементы крепления, трубопроводную обвязку, раму и фундамент, корпуса узлов агрегата;
- выявление зависимости вибрации от изменения режима работы агрегата.

В ряде режимов агрегата, необходимых для исследования, может выходить за пределы, определенные правилами нормальной эксплуатации, поэтому программа специального диагностического обследования должна быть согласована с эксплуатационным персоналом и утверждена техническим руководителем предприятия.

Исследования включают в себя опытное определение влияния на вибрацию различных факторов: теплового состояния, крутящего момента, условий охлаждения и т.д.

При этом могут проводиться следующие работы:

- снятие режимных характеристик;
- определение собственных частот агрегата и трубопроводов;
- балансировка роторов в собственных подшипниках и др.;

Типовые исследования следует минимизировать и проводить в такой последовательности, чтобы по возможности обеспечить проведение всего комплекса намеченных экспериментов за один цикл нагружения и разгрузки агрегата.

При минимальной разборке:

- обследование остановленного агрегата обычно ограничивается ревизией подшипников;
- проверкой центровки узлов агрегата и состояния муфт;
- осмотром мест возможных задеваний и доступной части роторов.

При ремонте агрегата так же проводятся работы по частичной разборке роторов, их всесторонней проверке, включающей ревизию шпоночных соединений и других монтажных сопряжений. По результатам исследований

составляется заключение о причинах повышенной вибрации и методах её устранения.

Так же следует учесть, что вибрационное обследование не всегда приводит к однозначному определению причины повышенной вибрации, поэтому в заключении по этому обследованию должны быть указаны все возможные причины вибрации, а объем намеченных ремонтных работ должен предусматривать устранение всех этих причин.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИВОДА.

3.1 Небаланс

Небаланс вращающихся масс ротора является одним из наиболее распространенных дефектов оборудования, как правило, приводящих к резкому увеличению вибраций. В литературе и в практике, наравне с термином "небаланс", применяются и другие наименования данного дефекта, такие, как дисбаланс, дебаланс, разбаланс и т. д. ГОСТ-ом предлагается преимущественное использование термина "дисбаланс". В данном разделе будет использовано простое и понятное слово "небаланс", понятное всем, даже и неспециалистам.

Проблемы корректной диагностики наличия небалансов в работающем оборудовании и оперативное проведение балансировочных работ роторов в собственных подшипниках - важная задача в работе каждой вибродиагностической службы.

Ниже будут рассмотрены общие вопросы диагностирования небалансов в наиболее часто встречающихся практических проявлениях. Знание этих "шаблонных" проявлений небаланса позволит практическим специалистам, с течением времени, наработать и свои правила распознавания небалансов, характерные для "своего" оборудования.

3.1.1 Общие вопросы

Причины возникновения небаланса в оборудовании могут иметь различную природу и являться следствием многих особенностей конструкции и эксплуатации. После проведения некоторой систематизации и обобщения, всё многообразие причин появления небалансов возможно, условно, свести к нескольким основным группам:

- дефект при изготовлении вращающегося ротора или его элементов на заводе, на ремонтном предприятии, недостаточный выходной контроль пред-

прияття - изготовителя оборудования, удары при перевозке, плохие условия хранения;

- неправильная сборка оборудования при первичном монтаже или после выполненного ремонта;

- наличие на вращающемся роторе изношенных, дефектных, сломанных, недостающих, недостаточно прочно закрепленных и т. д. деталей и узлов;

- результат воздействия параметров технологических процессов и особенностей эксплуатации данного оборудования, приводящих к неравномерному нагреву и искривлению роторов.

По типу и специфике проявления в общей картине вибрации, по особенностям проведения диагностики, небалансы можно условно подразделить на:

- статический небаланс;
- динамический небаланс.

Особенностью проявления этих основных небалансов в вибросигналах и полученных на их основе спектрах, а так же особенности проведения их диагностики будут рассмотрены ниже, в отдельном подразделе.

Основными, чаще всего встречающимися и знакомыми всем, признаками наличия небалансов вращающихся масс роторов в оборудовании различных типов можно считать следующие:

Временной сигнал вибрации является довольно простым, с малым количеством гармоник и шумов в области механических дефектов. В этом вибросигнале преобладает вибрация с периодом, соответствующим оборотной частоте вращения вала - оборотная частота ротора. Исключением являются сигналы, в которых присутствуют, или преобладают, характерные частоты другой природы, например, электромагнитной или гидродинамической;

Амплитуда всех гармоник "механической природы" в спектре значительно меньше амплитуды гармоники оборотной частоты ротора, не менее чем в 2 - 5 раз. Если производить сравнение по мощности, то не менее 60 % мощности вибросигнала сосредоточено в одной гармонике.

Все вышеописанные особенности вибросигнала при небалансе и его спектра имеют место при регистрации вибрации во всех радиальных направлениях измерения вибрации - как в вертикальном, так и в поперечном направлениях.

Очень часто полностью справедливо простое и понятное диагностическое правило о том, что "небаланс ходит по кругу". Отношение амплитуды первой гармоники в вертикальном направлении к аналогичной гармонике в вибросигнале поперечного направления находится в диапазоне примерно 0,7 - 1,2 и редко выходит за его границы. Исключение составляют подшипниковые опоры с сильно выраженной анизотропией.

Обычно первая гармоника в вертикальном направлении равна, а чаще чуть меньше первой гармоники вибрации в поперечном направлении. Исключения составляют машины со специфическими конструктивными особенностями, такие, например, как турбогенераторы, у которых всегда вертикальная составляющая вибрации больше из-за неравномерной жесткости ротора, возникающей из-за особенности расположения продольных пазов в массивном неявнополюсном роторе. Отклонение от правила возникает при увеличенных боковых зазорах в подшипнике, при очень больших различиях в величине податливости подшипниковых стоек в вертикальном и поперечном направлениях.

При небалансе в осевом направлении уровень вибрации, чаще всего, меньше, уровня вибрации в радиальном направлении. Это правило не соблюдается при большой податливости опор в осевом направлении и (или) при наличии изгиба вала. При небалансе в вибрации осевого направления первая гармоника может быть и не преобладающей в ней могут присутствовать значительные гармоники других частот, например второй, третьей.

Как правило, небаланс проявляется одновременно на двух подшипниках проверяемого на небаланс механизма. Только один из подшипников достаточно редко диагностируется на небаланс, и то, только в том случае, если он полностью сосредоточен в районе подшипника.

При наличии возможности гарантирующей изменение частоты вращения ротора хорошо видно, что, с ростом частоты вращения вибрация от небаланса интенсивно возрастает.

В случае отсутствия прочих дефектов состояния, при неизменной частоте вращения ротора, в классическом проявлении небаланса, вибрация практически не зависит от режима работы агрегата и не связана с его нагрузкой.

Особенности проявления небаланса в оборудовании и степень его влияния на состояние агрегатов на первый взгляд очень просты. Однако практика многократно подтверждает сложность и многогранность проявления небалансов в оборудовании.

Вибрация от небаланса, в большинстве случаев, является тем самым возбуждающим фактором, приводящего к проявлению в состоянии оборудования и в спектре зарегистрированной вибрации признаков различных дефектов. Исчезновение или появление вибрации от небаланса приводит к появлению или исчезновению вибраций, вызываемых рядом других причин.

Приведу пример. На благополучном фоне хорошо работающего агрегата вдруг резко повышается вибрация. Эксплуатационные службы приглашают специалистов по вибрации. Диагностика по спектрам вибросигналов говорит о целом "наборе" дефектов в агрегате. Далее возможны два варианта развития событий.

Производится категорическое заключение по состоянию подшипников, центровки и т. д. В диагнозе о небалансе ротора говорится вскользь, как о дефекте, проявляющемся, но в малой степени. Основное мнение весьма категорично - в агрегате имеется несколько серьезных и развитых дефектов. Агрегат необходимо останавливать и проводить ремонтные работы.

При наличии большого практического опыта диагностом делается более глубокий анализ состояния агрегата. Как пример, первая обратная гармоника в спектре вибросигнала является следствием наличия небаланса, а масляная гармоника обозначает наличие вибрации масляного клина подшипника скольжения. В совокупности вибрация подшипника скольжения определяется двумя

параметрами - увеличенным зазором в подшипнике и небольшим небалансом, возбуждающим эти вибрации. Следовательно, эти вибрации агрегата, как от небаланса, так и масляные, вызываются одной причиной - небалансом масс ротора.

Диагностом принимается решение о проведении балансировки в собственных подшипниках. При устранении этого небольшого небаланса исчезает сила, возбуждающая колебания масляного клина и вибрация обычно резко падает до нормального значения. Дефекты подшипников как были, так и остались, но они в вибрации не проявляются, нет возбуждающей силы.

Глубинное знание опытным диагностом физических процессов в оборудовании, пусть даже в некоторых случаях интуитивное, дает свои плоды, из которых можно выделить следующие:

- эксплуатационники имеют в своем распоряжении внешне благополучный агрегат, работающий в допустимом диапазоне уровня вибраций;

- рождается очередная легенда о незаменимом специалисте, умеющем "успокаивать" агрегаты непонятным образом (естественно, если этот специалист достаточно "скромен" и не горит желанием делиться своим опытом диагностики истинных причин снижения вибрации);

- менее опытный диагност, сделавший все правильно, давший полностью верное заключение, внешне "попадает впросак" - состояние агрегата улучшилось без устранения выявленных им дефектов (на самом деле большая часть выявленных им дефектов не исчезла и не была устранена, они просто перестали влиять на работу агрегата, точнее говоря, перестали диагностироваться по спектрам вибросигналов).

Данный пример, в общем, достаточно показательный и стандартный, приведен для демонстрации малой части проблем различного плана, возникающих при диагностике и устранении небалансов в оборудовании различного типа.

Необходимо всегда хорошо понимать, что практическая задача диагностирования оборудования, состоит не в публичной демонстрации собственной эрудиции, а в проведении практических работ и выдаче рекомендаций по при-

ведению оборудования в рабочее состояние. Иными словами, при проведении любой диагностики оборудования по вибропараметрам нужно всегда очень четко понимать заказ эксплуатационных служб, основная задача которых - эксплуатация оборудования при заданных значениях контролируемых вибропараметрах состояния.

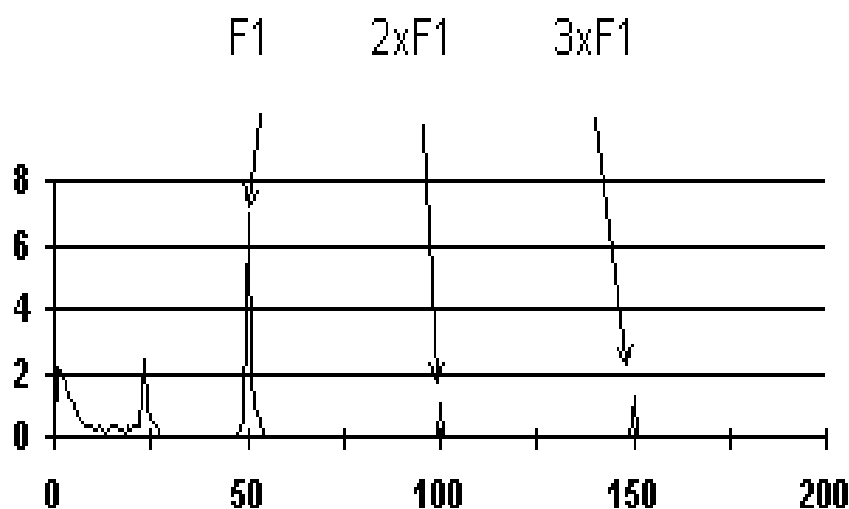


Рисунок 2 - Спектр вибрации ротора с небалансом. Вертикальная проекция виброскорости

По итоговой эффективности проведенных вибродиагностом на агрегате балансировочных операций необходимо сделать и замечание общего. Обычно идеально отбалансировать агрегат удастся достаточно редко и это определяется квалификацией балансировщика и удачей. Процесс балансировки оборудования можно считать практически законченным в случае, когда мощность первой гармоники оборотной частоты ротора будет составлять менее половины от мощности всего вибросигнала.

3.1.2 Статический небаланс

Это наиболее распространённый, самый простой, и достаточно легко диагностируемый тип небаланса. При значительном статическом небалансе его можно даже определить в выключенном состоянии оборудования без примене-

ния приборов контроля вибрации. Неподвижный ротор с сильным статическим небалансом стремится установить своё положение так, когда наиболее тяжелая точка будет находиться внизу. Для уменьшения влияния трения в подшипниках ротор можно привести рукой в медленное вращение, тогда он сможет более точно установиться тяжелой точкой вниз.

Тем не менее, такой процедуры поиска статического небаланса и дальнейшей компенсации тяжелой точки грузами оказывается недостаточно для балансировки ротора. В неподвижном состоянии статический момент от небаланса чаще всего значительно меньше моментов трения в подшипниках и уплотнениях ротора.

Стандартная ситуация встречающаяся на практике - ротор в отключенном состоянии останавливается в любом положении, внешне небаланса нет, а вибрация повышена. Процедуру более точной и окончательной диагностики наличия небаланса и последующей балансировки необходимо всегда производить на рабочей скорости вращения ротора, используя для контроля наличия небаланса виброизмерительные приборы.

Спектральная картина распределения вибрации по гармоникам, соответствующая небалансу, внешне проста и понятна. На спектре явно доминирует пик гармоники оборотной частоты ротора. На спектре также присутствуют и вторая гармоника от оборотной частоты ротора и несколько гармоник в низкочастотной части спектра, но все они по амплитуде много меньше оборотной гармоники.

Как говорилось выше, такая же картина вибраций, как в вертикальном направлении, обычно бывает и в поперечном направлении регистрации вибрации. Причем пики первых гармоник оборотных частот в этих направлениях должны быть примерно равны по величине (обычно).

Картина спектра вибрации в осевом направлении может несколько отличаться от спектров вибрации в радиальных направлениях. В первую очередь в этом направлении, чаще всего, имеет место меньший уровень вибрации.

Поясню причины возникновения вибрации в осевом направлении, так как в некоторых рекомендациях по диагностике присутствует информация, что при небалансе осевая вибрация отсутствует. Так случается, но достаточно редко. В большинстве случаев на практике, при наличии небаланса осевая составляющая вибрации есть всегда.

Вибрация, в первоначальном толковании, это проекция траектории прецессии контролируемой точки на направление оси установки вибродатчика. Прецессия подшипника, за счет усилия от небаланса, теоретически должна проходить в плоскости, перпендикулярной оси ротора.

На практике картина прецессии контролируемой точки намного сложнее. Перемещение в перпендикулярной к оси вращения плоскости всегда приводит и к перемещениям контролируемой точки в осевом направлении. Это появляется за счет особенностей крепления подшипника внутри опоры, различной жесткости опор по разным осям, колебаний подшипника вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной оси вращения ротора и т. д. В сумме, всё это и приводит к возникновению значительной осевой составляющей при небалансе в пространственной прецессии подшипника.

При небалансе масс вращающегося ротора осевая вибрация присутствует практически всегда, но имеет некоторые особенности. По уровню она обычно всегда меньше радиальных составляющих. В спектре осевой вибрации могут иметь место значительные, наряду с первой гармоникой оборотной частоты, вторая и третья ее гармоники. Особенно сильно эти гармоники проявляются в том случае, когда небаланс приводит к перемещениям или колебаниям подшипников внутри опор.

Пользу при диагностике небалансов приносит регистрация фазы вибросигналов. Для контроля фаз нескольких сигналов при регистрации их синхронизируют при помощи метки, устанавливаемой на валу агрегата. У синхронных машин с частотой вращения 3000 об/мин можно в качестве синхронизирующей метки брать какой-либо параметр синусоиды питающей сети.

При помощи фазы синхронизированных спектров колебаний подшипников, особенно по величине начальной фазы первой гармоники оборотной частоты вращения вала ротора, при статическом небалансе, можно сделать следующие замечания:

- фаза первой гармоники должна быть достаточно устойчивой и не изменяемой с течением времени;

- фаза колебания первой гармоники в вертикальном направлении должна отличаться от фазы первой гармоники в поперечном направлении примерно на 90 или 270 градусов. Выбор одного из значений угла сдвига зависит от того, в какую сторону сдвинута точка установки поперечного датчика от точки установки вертикального - против направления вращения ротора или же по направлению вращения;

- отличие фазы первых гармоник одинаковых проекций вибрации на двух разных подшипниках одного ротора должно быть минимально. При статическом небалансе сдвига фаз вообще не должно быть. При наложении на статический небаланс динамического, сдвиг фаз начинает расти. При сдвиге фаз на 90 градусов вклад статического и динамического небалансов в общую вибрацию примерно одинаков. При увеличении динамической составляющей в небалансе сдвиг фаз растет и при 180 градусах имеющийся небаланс имеет чисто динамическую первопричину.

Вдобавок по статическому небалансу можно обозначить, что амплитуда первой гармоники в спектре вибрации, обусловленная статическим небалансом, будет изменяться вместе с изменением скорости, и будет расти почти пропорционально квадрату частоты вращения ротора, если в процессе исследований будет иметься возможность проведения замеров вибрации при различных частотах вращения ротора.

Чисто статический небаланс масс ротора может быть, довольно просто откорректирован работниками вибродиагностических служб, при помощи установки одного или нескольких балансировочных грузов в зоне, диаметрально противоположно тяжелой точке в одной или нескольких плоскостях коррекции.

Схожий результат достигается процедурой "снятия лишнего металла", но только уже на тяжелой стороне ротора.

3.1.3 Динамический небаланс

Возникновения термина "динамический небаланс". Рассмотрим ротор, у которого статический небаланс равен нулю. В отключенном состоянии (то есть когда приводной двигатель отключен от сети питания) ротор идеально уравновешен и может останавливаться в любом положении.

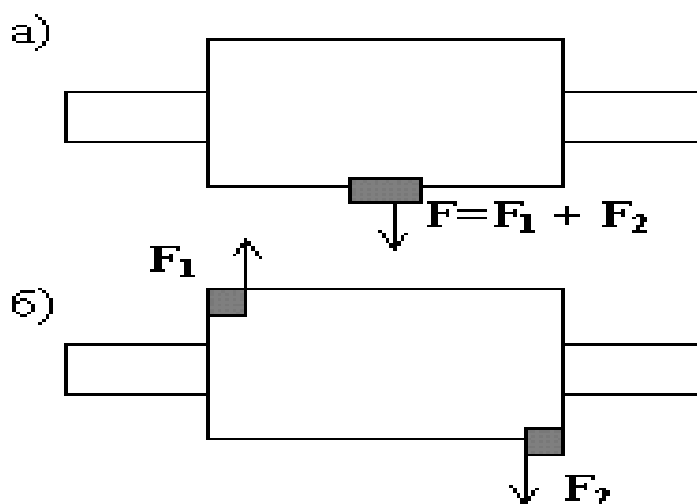


Рисунок 3 - Направление сил, действующих на ротор при разном типе небаланса (а - статический небаланс; б - динамический небаланс)

С вероятностью 90 % можно быть уверенным, что при приведении этого ротора во вращение вибрации на его подшипниках, свойственные картине небаланса, будут значительными, если не сказать большими. Ниже будут рассмотрены причины их возникновения.

При переводе ротора из неподвижного во вращающееся состояние, то есть из статического в динамическое, изменяется совокупность сил, действующих на ротор и распределенных вдоль оси. Наравне со статическими моментами на ротор начинают действовать динамические усилия, приводящие к состоянию небаланса. Учитывая условия возникновения такого небаланса, его принято называть динамическим небалансом, то есть возникающий при вращении.

Динамический небаланс обуславливают динамические силы, связанные с продольной угловой несимметрией распределения масс на вращающемся роторе. Для сравнения - при статическом небалансе имеют место только с чисто угловым небалансом, не учитывая его распределение вдоль продольной оси ротора.

Причину динамического небаланса, говоря очень просто, можно пояснить на примере. Ротор необходимо, естественно мысленно и условно, нужно распилить как бревно, на несколько дисков. Полученные диски могут иметь разные свойства. Возможны три варианта:

Идеальный случай тот, когда все полученные диски не имеют статического небаланса, тогда собранный из дисков ротор тоже не будет иметь небаланс;

Идеальный случай, когда отдельные диски, обладающие небалансом, сложились в единое целое так, что собранный ротор, в итоговой сумме, не имеет небаланса;

Практический случай, когда отдельные диски имеют небалансы и собранный ротор тоже имеет небаланс (вопрос состоит в том, какой он, статический или динамический).

Эти три простых примера позволяют рассмотреть все основные разновидности небалансов, встречающихся в практике достаточно часто.

Рассматривая эти три случая можно утверждать, что в третьем, самом сложном случае, ротор имеет динамический небаланс, а во втором случае - статический и динамический небаланс одновременно.

Картина сил действующих на подшипник совершенно иная, будет иметь место при приведении ротора во вращении. Две силы, будут создавать динамический момент, создающий две силы, действующие на два опорных подшипника в противофазе. Чем быстрее будет вращаться ротор, тем сильнее будет динамический момент, действующий на подшипники. Это и есть динамический небаланс.

На практике никогда не бывает только чисто статического небаланса или чисто динамического - всегда имеется их сумма, в которой есть вклад каждой разновидности небаланса. Это привело к появлению в литературе и в практике работы некоторых диагностов термина "косая пара сил".

По сдвигу фаз оборотной частоты, первых гармоник, на двух опорных подшипниках одного ротора (в синхронизированных или синхронных спектрах) можно оценить вклад каждого типа небаланса в общую картину вибраций.

При сдвиге фаз первых гармоник примерно в 0 градусов мы имеем дело с чисто статическим небалансом, при 180 градусов - с чисто динамическим небалансом. При 90 градусах сдвига фаз первых гармоник вклад от обоих типов небаланса примерно одинаков. При промежуточных значениях угла сдвига для оценки вклада того или иного небаланса необходимо интерполировать.

Завершая раздел про динамический небаланс, необходимо сказать, что амплитуда первой гармоники в спектре вибрации, при изменении частоты вращения, изменяется пропорционально большей, чем в квадрат раз, степени изменения частоты вращения ротора. Это объясняется следующим. Каждая сила от небаланса пропорциональна частоте вращения. При динамическом небалансе на это накладываются два фактора.

Первое. Условно говоря, динамический небаланс возбуждает вибрации, пропорциональные разнице сил. Но если возвести в квадрат разницу сил, как одну единую силу, получится один результат. Если возвести в квадрат каждую силу отдельно, а затем вычесть уже квадраты, то в итоге будет получена совсем иная цифра, чем в первом случае, много большая.

Во-вторых, силы от небаланса воздействуют на ротор и начинают его изгибать. Ротор изменяет свою форму так, что центр масс данной части ротора смещается в сторону уже имеющегося небаланса. В итоге небаланс начинает возрастать еще больше, еще больше увеличивая силу небаланса, еще больше увеличивая изгиб.

Осевая вибрация при динамическом небалансе обычно имеет несколько большую амплитуду, чем это происходит при чисто статическом небалансе.

3.1.4 Моделирование небаланса

Для начала рассмотрим привод в сбалансированном состоянии. Произведем замеры виброскорости в точках один, два, три, четыре и пять. Данные точки крепления датчика показаны на рис.4.

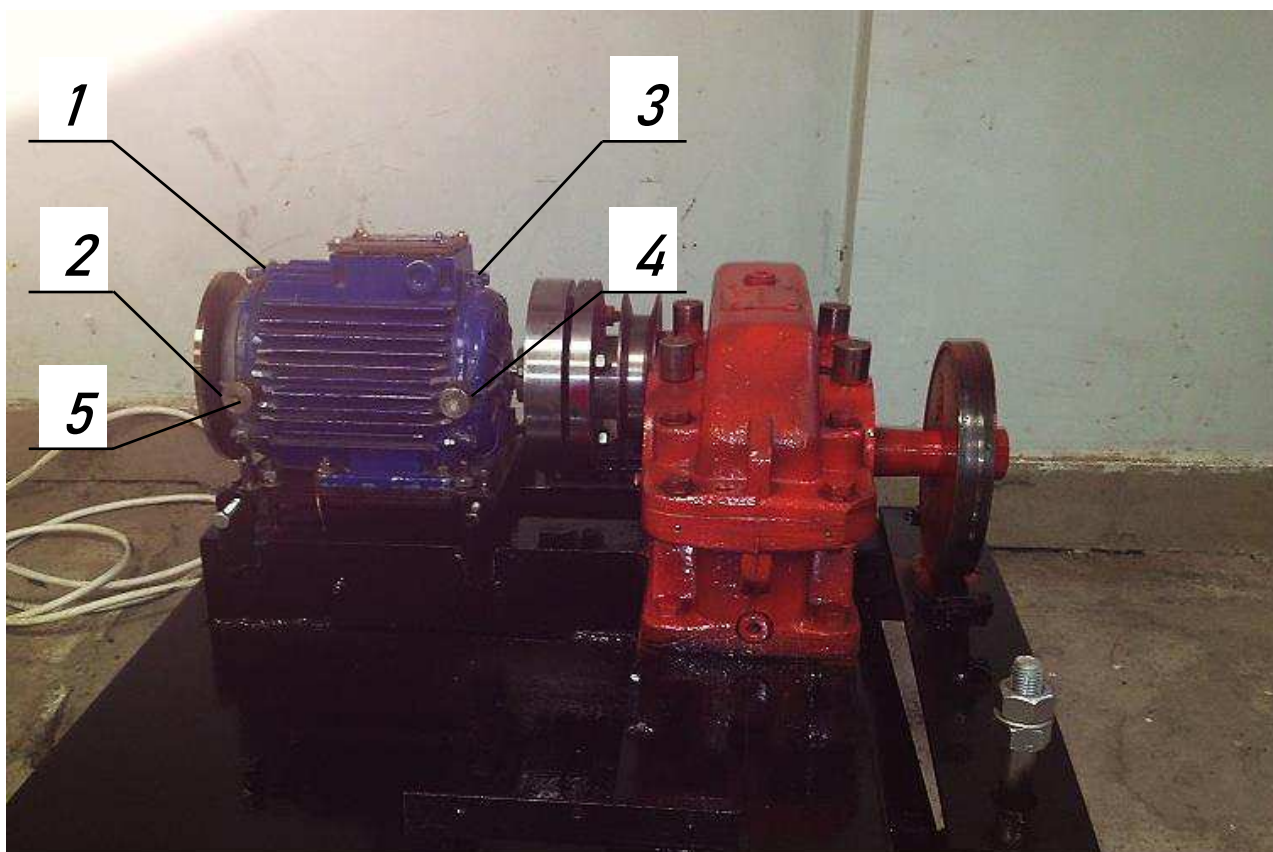


Рисунок 4 – Места крепления датчика:

- 1 - вертикальное крепление датчика (точка 1);
- 2 - горизонтальное крепление датчика (точка 2);
- 3 - вертикальное крепление датчика (точка 3)
- 4 - горизонтальное крепление датчика (точка 4);
- 5 - аксиальное (осевое) крепление датчика (точка 5).

Спектры вибрации, зафиксированные на переднем и заднем подшипниковых щитах двигателя, в трех направлениях: вертикальном, горизонтальном и осевом, показаны на рис. 5, 6, 7, 8, 9.

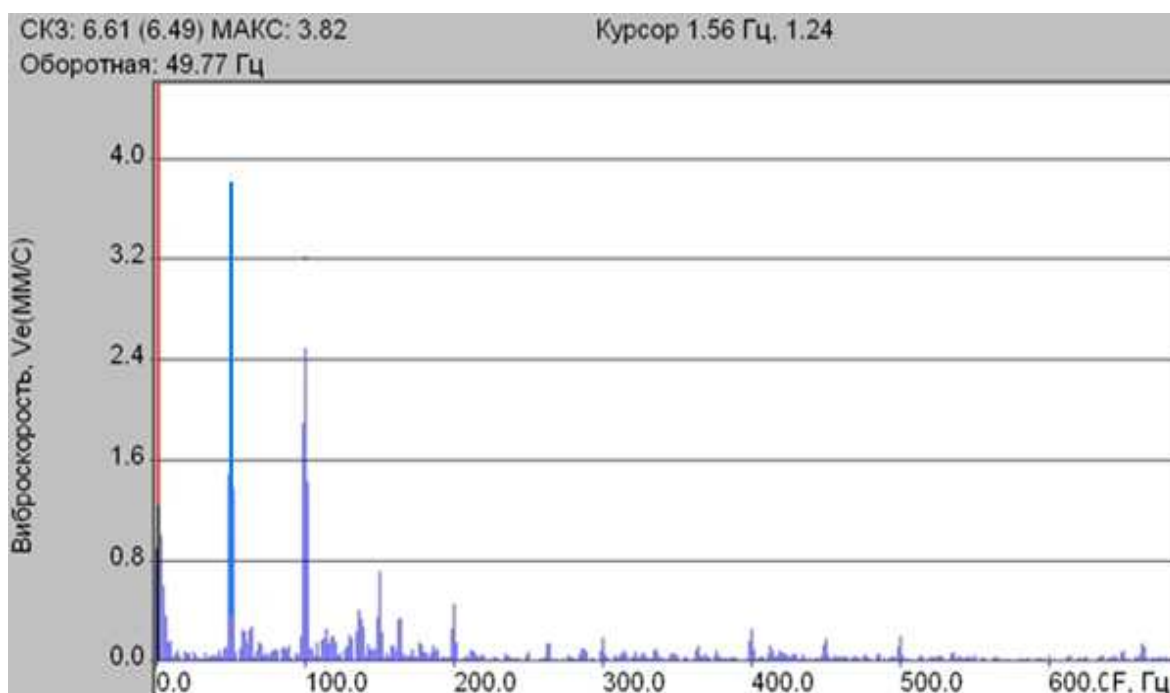


Рисунок 5 - Вертикальная составляющая виброскорости (точка 1).

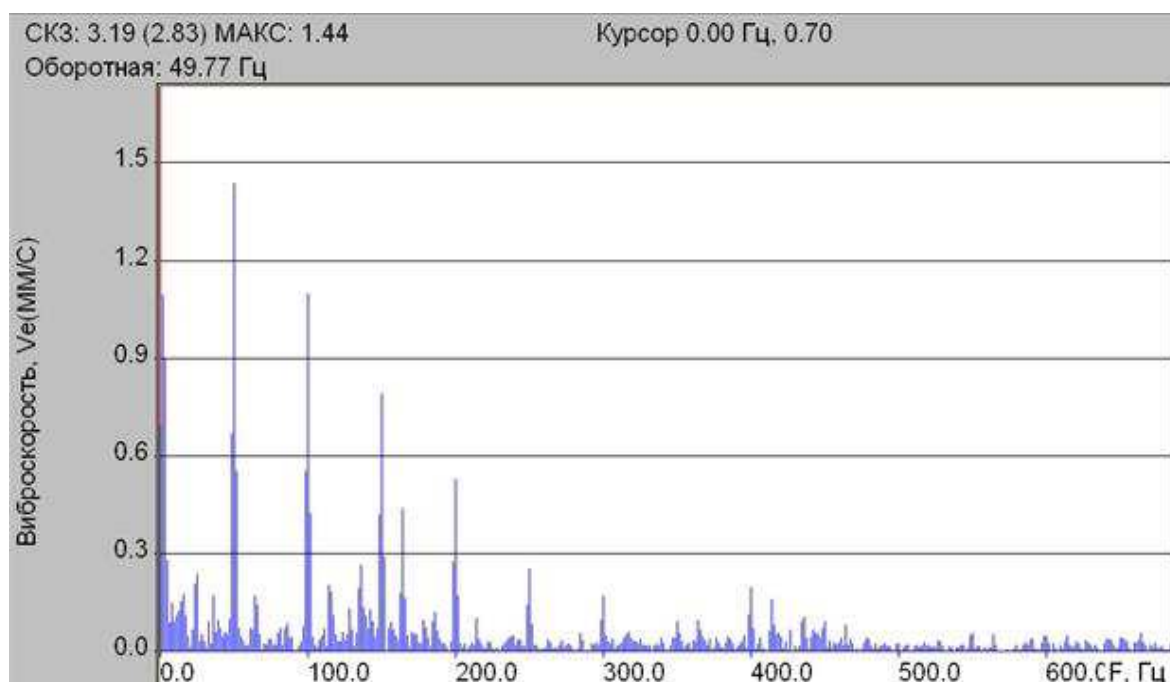


Рисунок 6 – Горизонтальная составляющая виброскорости (точка 2)

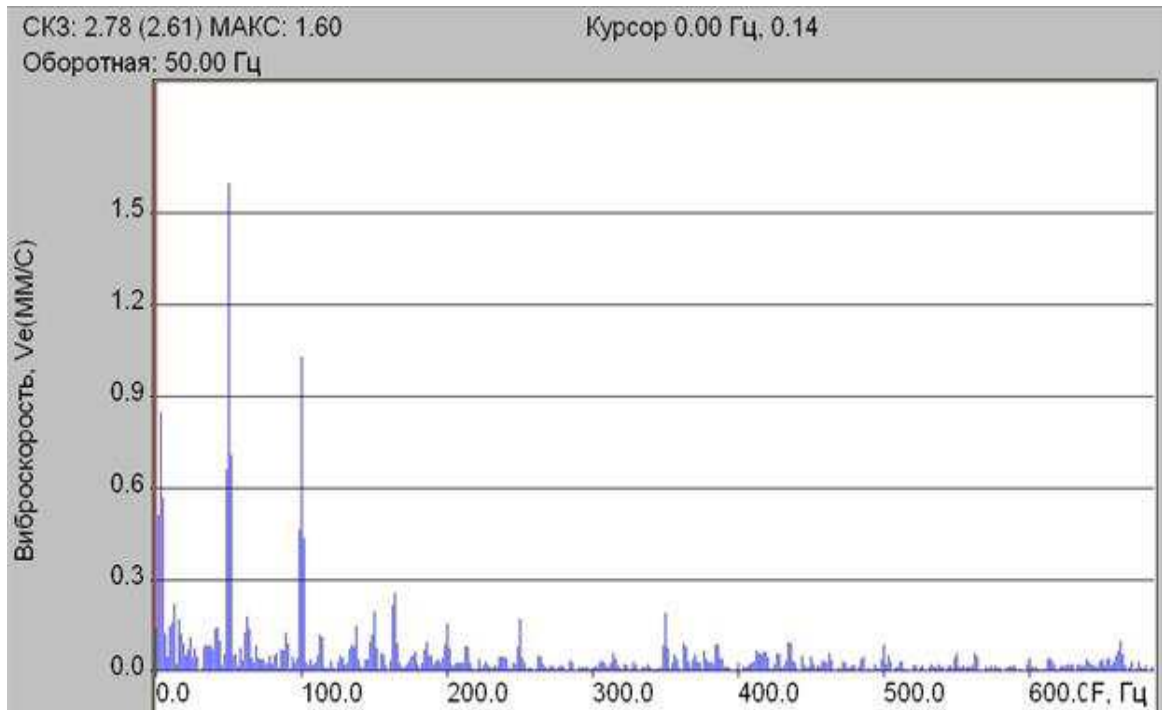


Рисунок 7 – Вертикальная составляющая виброскорости (точка 3)

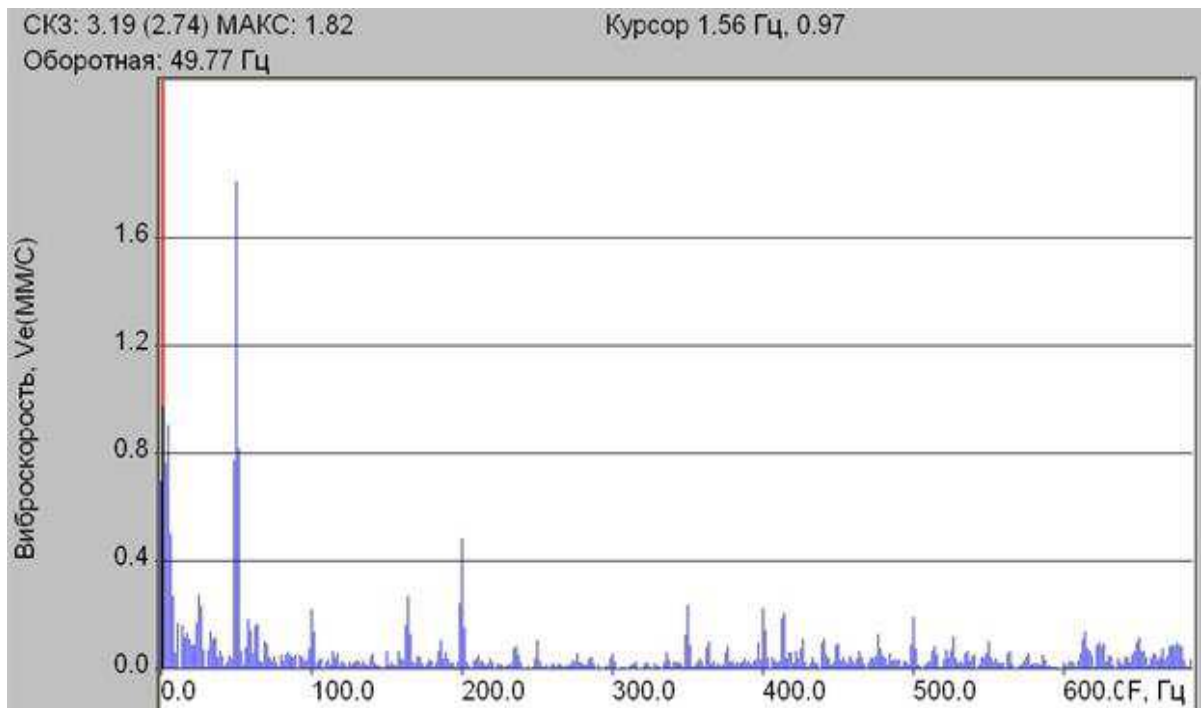


Рисунок 8 – Горизонтальная составляющая виброскорости (точка 4)

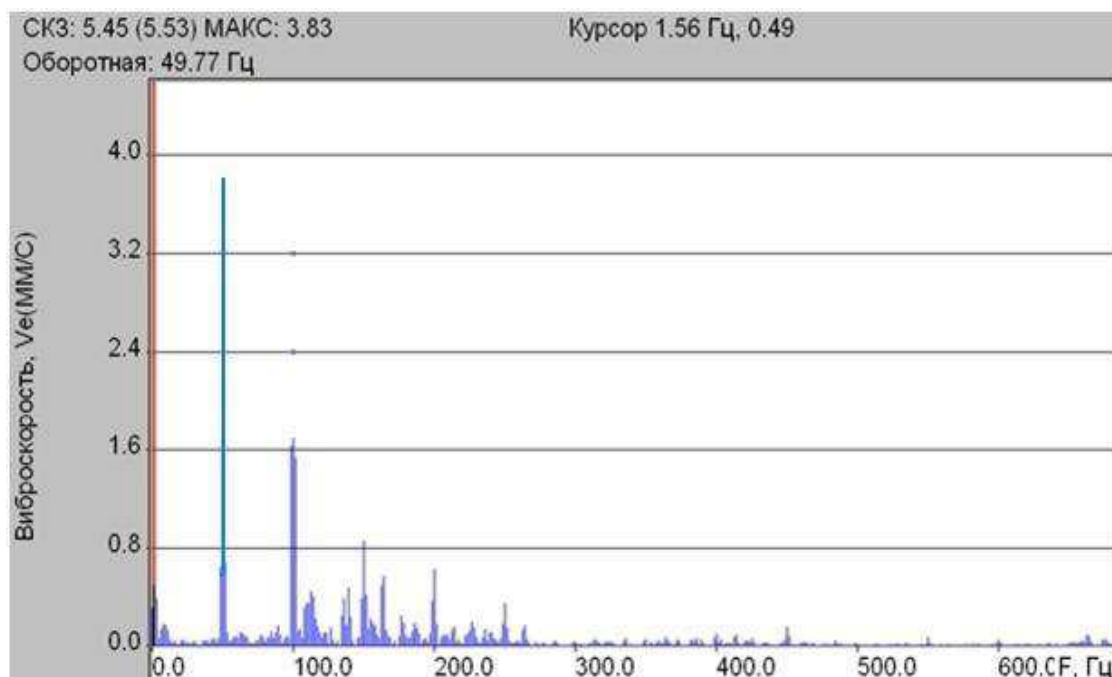


Рисунок 9 – Осовая составляющая виброскорости (точка 5)

По спектрам вибрации хорошо видно, что вибрация, сосредоточенная на первой и второй гармониках, не превышает 4.5 мм/с, следовательно, является допустимой. Можно сделать вывод, что данный привод отбалансирован и может эксплуатироваться.

Моделирование небаланса.

Путем закрепления груза в отверстии на диске, находящемся на входном валу двигателя, моделируем небаланс. Место установки груза показано на рис. 10.

После моделирования небаланса снова произведем замеры в точках один, два, три, четыре и пять.

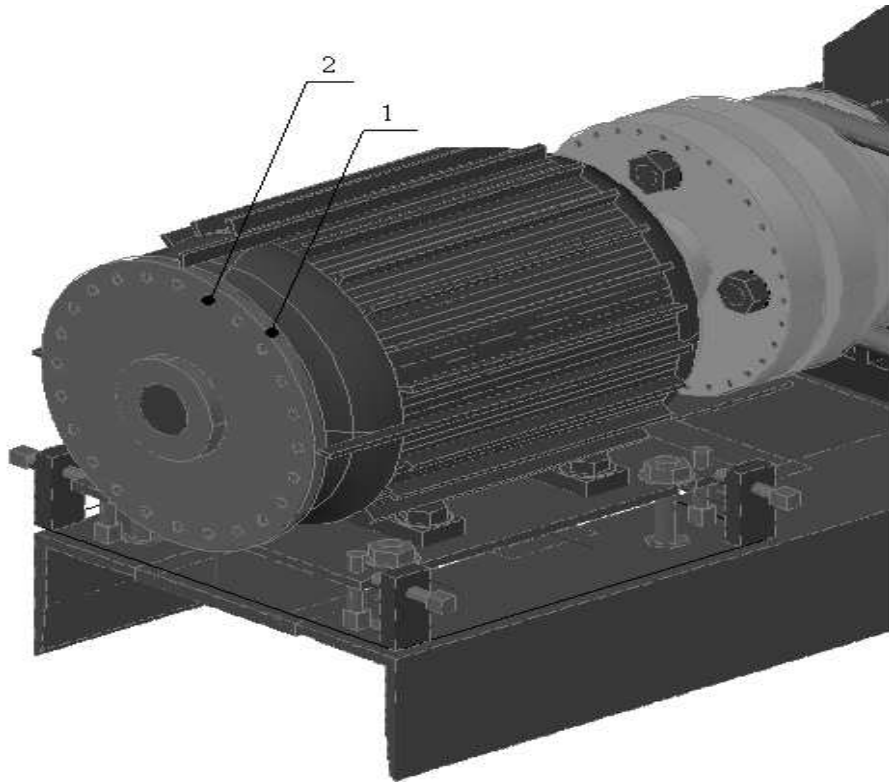


Рисунок 10 – Место установки груза:
 1 - балансировочный диск; 2 - место крепления груза.

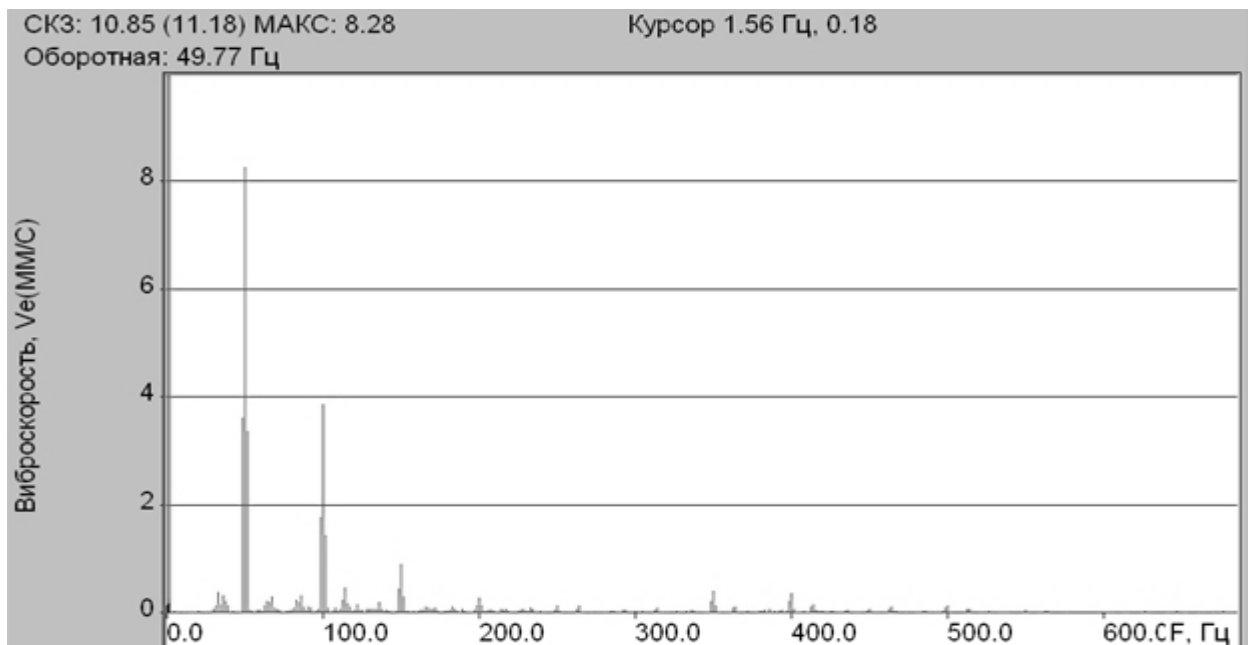


Рисунок 11 – Вертикальная составляющая при небалансе (точка 1)

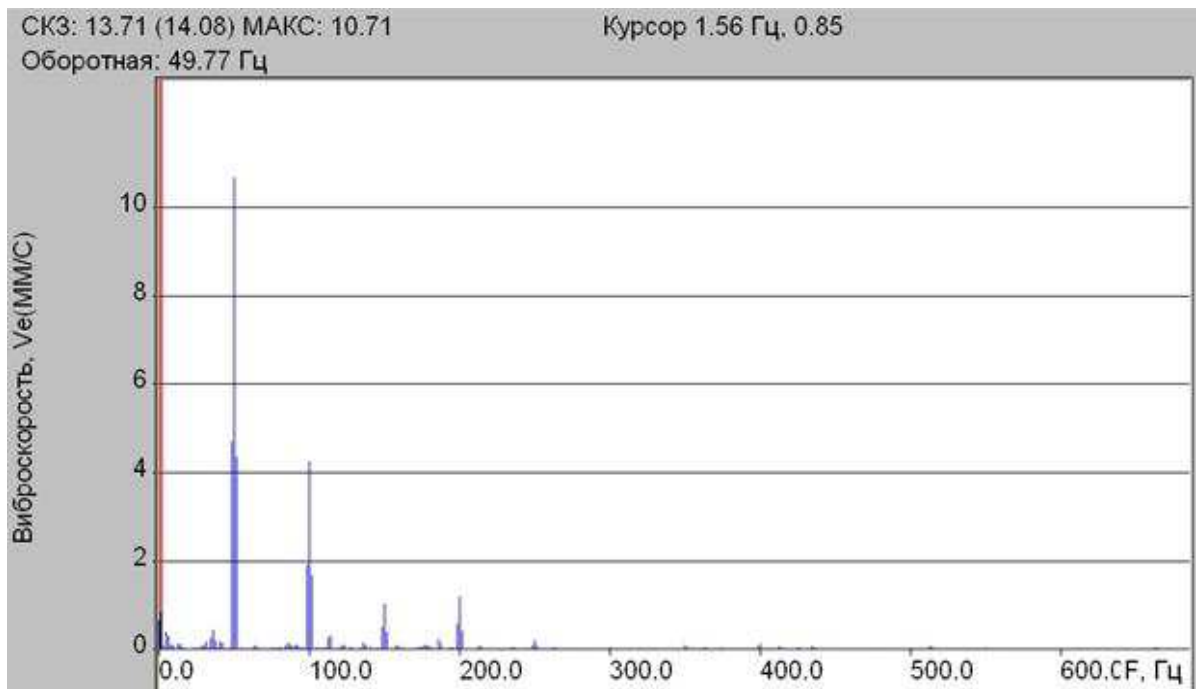


Рисунок 12 – Горизонтальная составляющая при небалансе (точка 2)

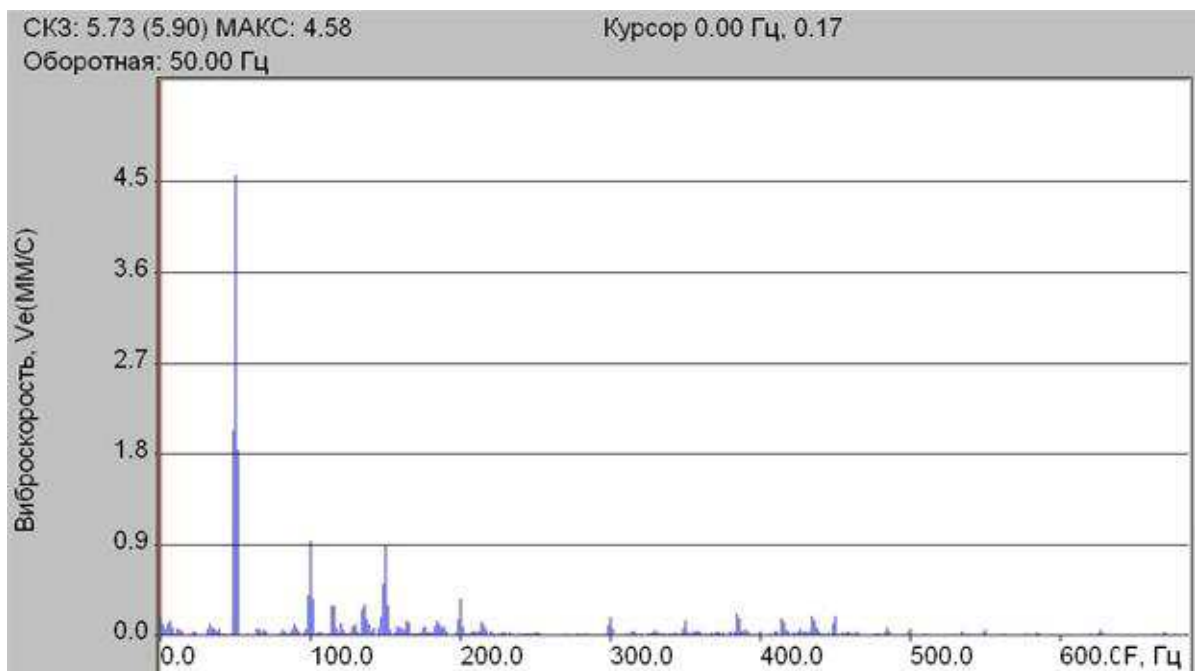


Рисунок 13 – Вертикальная составляющая при небалансе (точка 3)

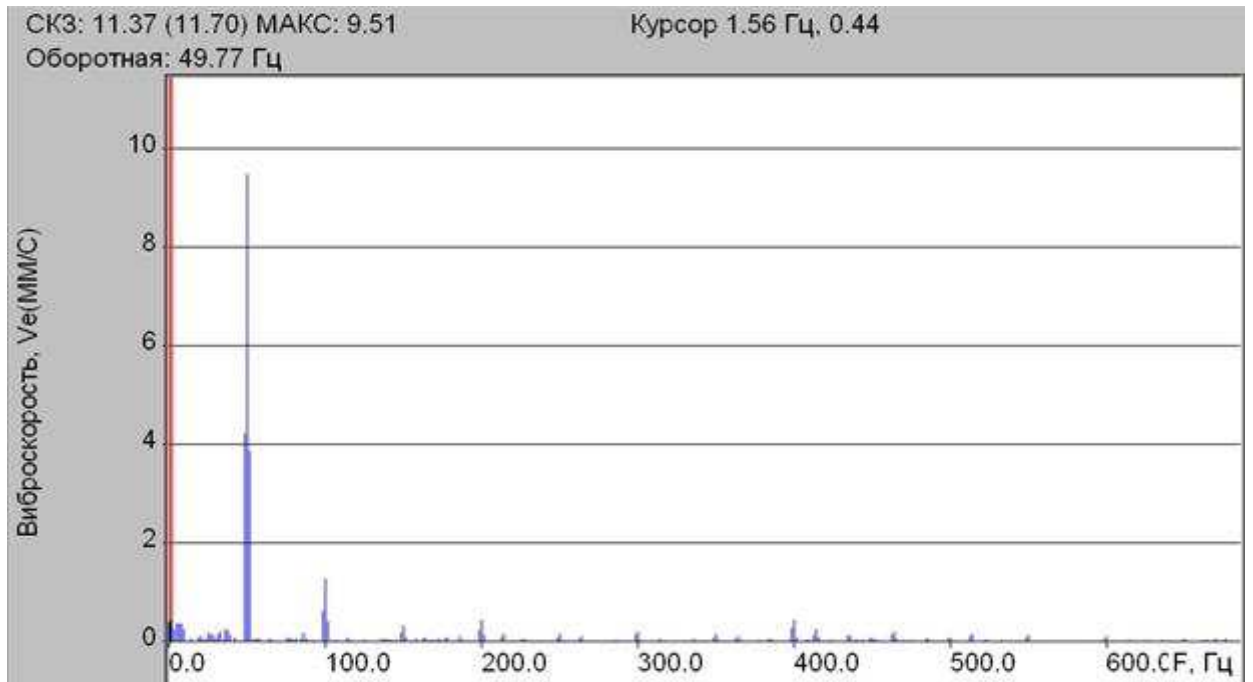


Рисунок 14 – Горизонтальная составляющая при небалансе (точка 4)

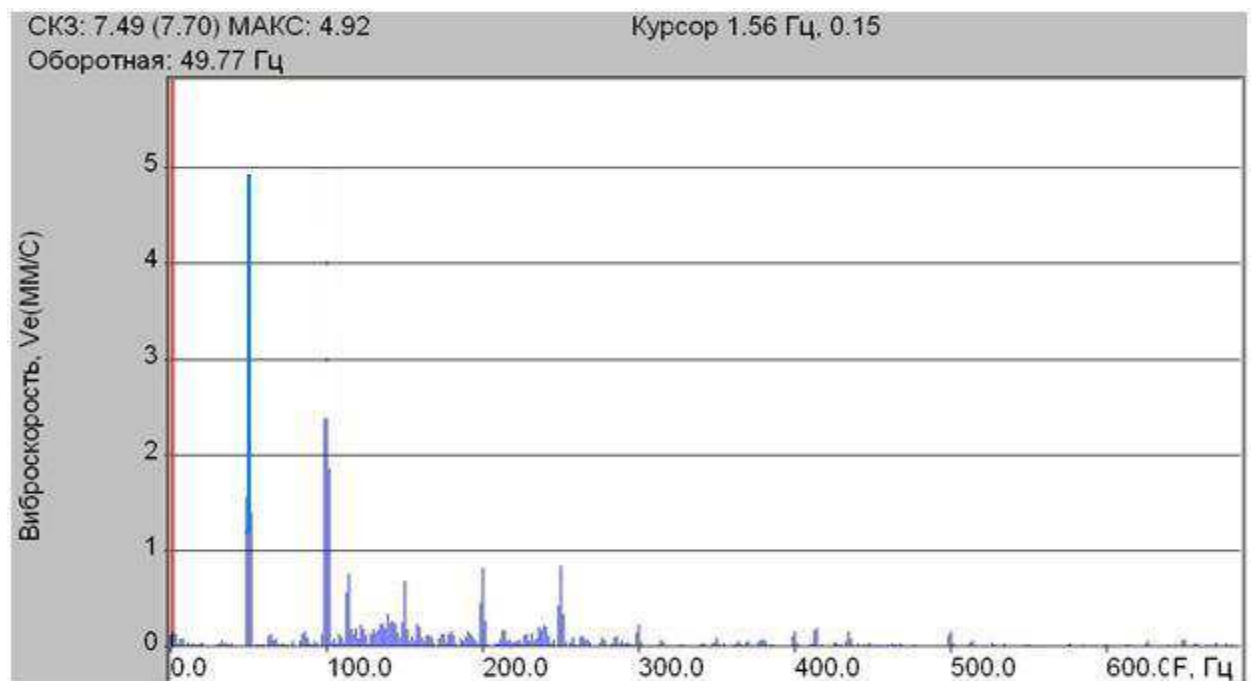


Рисунок 15 – Осевая составляющая при небалансе (точка 5)

По спектрам вибраций видно, что вибрация, сосредоточенная на второй гармонике, превышает допустимое значение 4.5 мм/с. Это говорит о небалансе узла и о том, что надо выводить узел из эксплуатации для ремонта.

3.2 Резонанс

Когда частота вынуждающей силы приближается к собственной частоте механической системы, амплитуда вибрации резко возрастает. Это явление называют "резонанс". Увеличение амплитуды — это лишь следствие резонанса, а причина — совпадение внешней (возбуждающей) частоты с некоторой другой частотой, определяемой из параметров колебательной системы, таких как внутренняя (собственная) частота, коэффициент вязкости и т.п. Обычно резонансная частота не сильно отличается от собственной нормальной, но далеко не во всех случаях можно говорить об их совпадении.

В роторных системах, сила, вызванная вращающимся небалансом, порождает синхронную, вынуждающую частоту, которая равна частоте вращения ротора. Когда частота вращения ротора приблизится к собственной частоте роторной системы, амплитуда вибрации увеличится.

На собственной частоте ротора наступит резонанс (который также называют критическим резонансом или критической скоростью), а вибрация достигнет максимальной амплитуды. По мере ухода скорости агрегата за собственную частоту роторной системы амплитуда будет уменьшаться рис. 27.

Верхняя часть показывает зависимость фазы от скорости ротора, нижняя часть показывает зависимость амплитуды вибрации от скорости ротора. Когда скорость ротора приближается к собственной частоте роторной системы, амплитуда вибрации увеличивается. Когда скорость ротора уходит за собственную частоту, амплитуда уменьшается.

Большинство вращающихся агрегатов работают на частотах до первого резонанса, однако большая часть крупных технологических машин работает за

первым резонансом и выше, следовательно, усиление вибрации ротора на резонансах при пуске или остановке является важной проблемой.

Сильная вибрация на резонансе порождает опасность больших напряжений в роторе, опасность контакта между ротором и статором и ускоренного износа уплотнений.

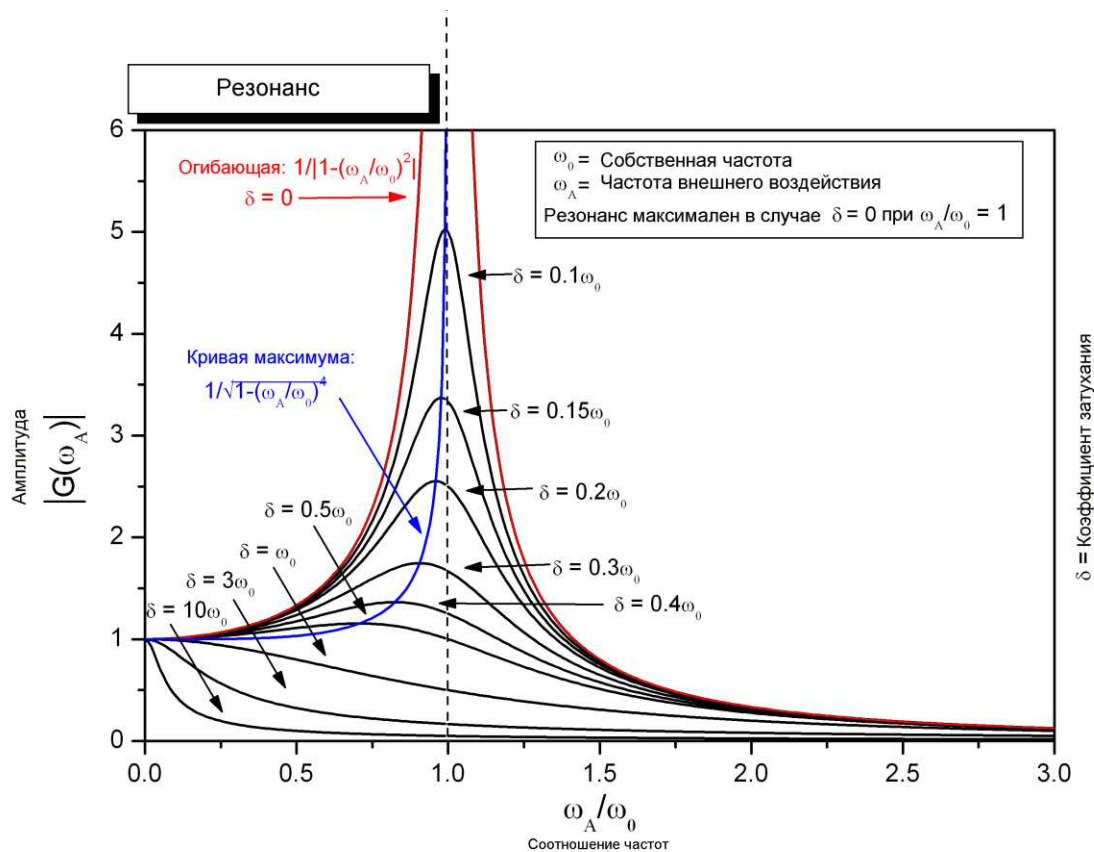


Рисунок 16 – График амплитуды

3.2.1 Моделирование резонанса

Для получения резонанса на установке мы плавно увеличивали обороты электродвигателя до 45.8 Гц. В результате полученных данных мы построили график (Рис. 28), из графика видно, что наша установка вошла в резонанс при частоте 37.9 Гц, при этом фаза вибрации изменилась скачкообразно на 90°.

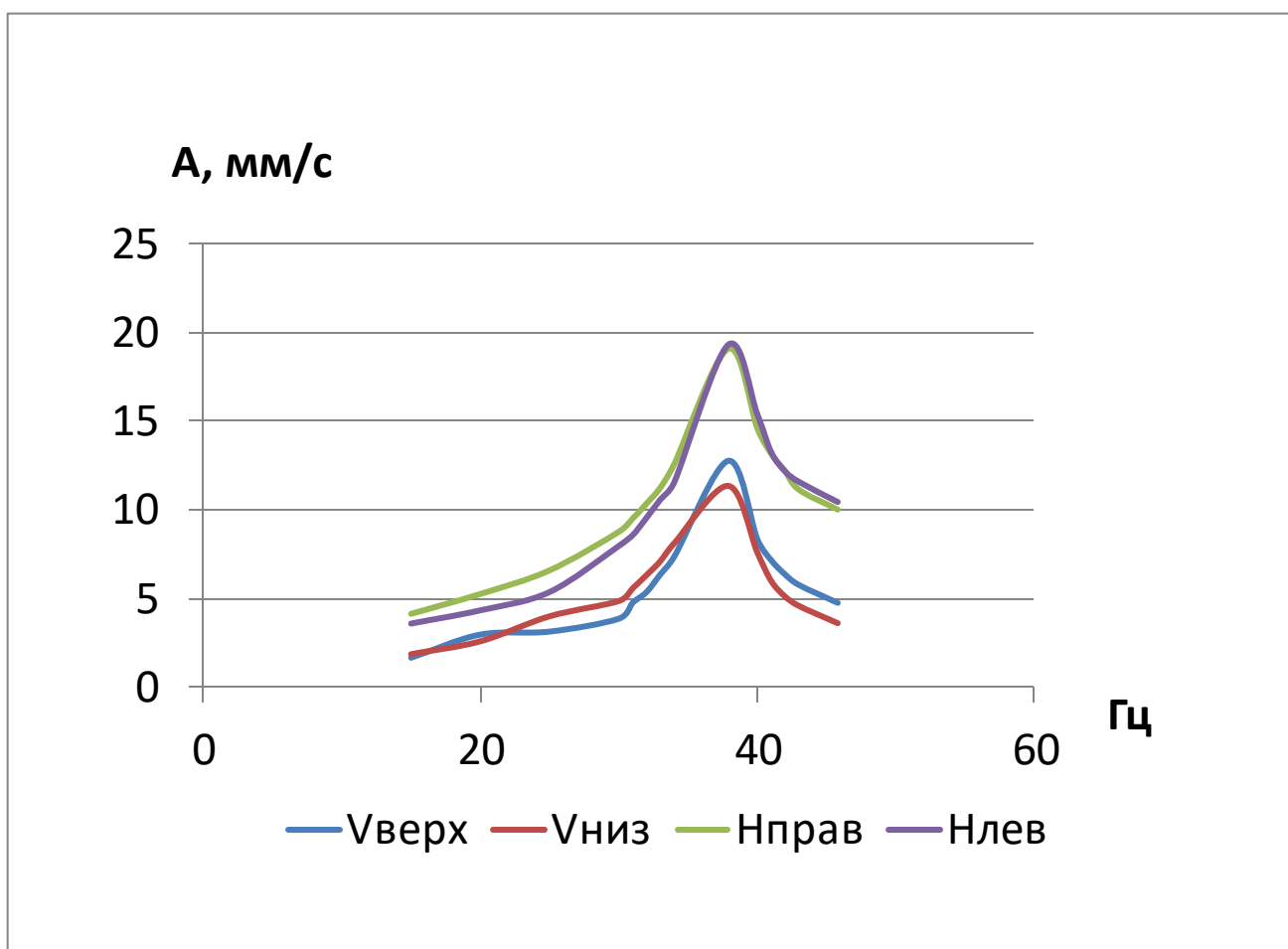


Рисунок 17 - График изменения амплитуды от частоты

Поэтому эксперимент по моделированию резонанса проводился на частоте 37.9 Гц

3.3 Расцентровка

Взаимное положение осей двух соседних роторов измеренное в месте их соединения при разобранной соединительной муфте, в практике принято

характеризовать термином "центровка". Если оси двух валов идеально совпадают, т. е. один вал является как бы продолжением другого - говорят о хорошем качестве центровки валов механизмов в агрегате. Если же осевые линии валов не совпадают, то говорят о плохом качестве центровки и используется термин "расцентровка двух валов". В общем случае качество центровки нескольких механизмов определяется правильностью монтажа линии вала агрегата, контролируемой по центрам опорных подшипников вала.

В практике качество центровки валов, не соединенных муфтой полностью определяется взаимным геометрическим, пространственным положением опорных вкладышей подшипников скольжения или же параметрами монтажа подшипников качения в подшипниковых стойках или щитах.

Различают два основных вида расцентровки:

- параллельную (или радиальную);
- угловую (или торцевую).

Параллельная расцентровка валов - это параллельное взаимное смещение осей соседних центрируемых роторов друг относительно друга. Если произошло смещение одного из опорных подшипников на небольшое расстояние, что бывает в практике чаще всего, то в итоге это будет не параллельная расцентровка, а комбинированная - параллельная + угловая. Обычно, в таких случаях, максимальным в общую вибрацию будет является вклад от параллельной расцентровки. Дело в том, что возникший при смещении одного подшипника угол излома по своей величине не превышает одного углового градуса, что обычно не очень существенно, а сдвиг валов в точке центровки может равняться миллиметру и более, что может существенно сказаться на режиме работы агрегата. Естественно, что определяющим фактором, влияющим на повышение вибраций, будет параллельная расцентровка, хотя при этом будет присутствовать и угловая.

Угловая расцентровка - это излом оси в месте сочленения валов на некоторый угол при хорошем совмещении центров валов в районе их торцев. При описании угловой расцентровки часто используют термин "раскрытие

муфты". В основе такого названия угловой расцентровки лежит способ контроля наличия такого типа расцентровки при помощи измерения зазоров между валами в нескольких точках по окружности.

Встречающиеся в практике случаи расцентровки валов практически всегда являются сложными, комбинированными, включающими в себя одновременно основные элементы обоих типов расцентровки. По итогам проводимой диагностики по спектрам вибросигналов выявляется наиболее сильно проявляющая себя расцентровка, по которой и дается диагноз и рекомендации к устранению.

Причин появления расцентровок в работающем оборудовании достаточно много. Это и процессы износа, влияние технологических параметров, изменение свойств фундамента, искривление подводящих трубопроводов под воздействием изменения температуры на улице, изменение режима работы и т.д.

3.3.1 Особенности диагностики расцентровки

Применение спектральных методов диагностики для выявления расцентровок, при большой общей трудоемкости выполняемых работ, не дает нужной практической эффективности. Более лучшие результаты, с точки зрения трудоемкости и достоверности, были получены нами при диагностике расцентровок с использованием более простых методов пространственного анализа интегральных параметров вибросигнала, таких, как СКЗ (среднее квадратичное значение) виброскорости.

Известно, что основными диагностическими особенностями наличия расцентровки в спектре вибросигнала является наличие трех гармоник оборотной частоты - первой, второй и, довольно часто, третьей. Однако такой же набор гармоник появляется в спектре вибросигнала при наличии целого ряда других причин повышенной вибрации оборудования - это ослабление крепления к фундаменту, дефект посадки подшипника, изгиб вала и т. д.

Принять "однозначное диагностическое решение" по спектру вибросигнала, что причиной повышенной вибрации данного агрегата является только расцентровка, является достаточно сложной задачей.

Для начала приведем самые общие рекомендации, которых необходимо придерживаться при выполнении спектральной вибрационной диагностики расцентровок в оборудовании, это:

- При появлении предположения о возможности наличия расцентровки в районе данной соединительной муфты необходимо выполнить полный комплекс измерений вибрации на двух подшипниках с двух сторон муфты, на каждом в трех проекциях. С целью повышения достоверности получаемых диагнозов желательно даже сделать это на четырех подшипниках двух сцентрированных механизмов.

- Важным фактором для диагностики расцентровки является знание начальной фазы колебаний, особенно для первой и второй гармоник. Если имеется возможность регистрации синхронизированных, а тем более синхронных, вибросигналов - это необходимо сделать обязательно. Можно смело утверждать, что знание начальной фазы повышает достоверность диагностики расцентровки очень сильно, может даже в два раза.

- Регистрировать спектроанализатором необходимо не спектр вибросигнала, а временной сигнал, желательно виброскорости. Сама форма временного вибросигнала много говорит опытному вибродиагносту о характере происходящих в оборудовании процессов. Мало того, что мы понимаем, как вторая, четная гармоника приводит к несимметрии вибросигнала относительно оси времени, главное, что на временном сигнале можно очень хорошо увидеть соударения в муфте. Характер этих соударений, их интенсивность, во многом определяется типом соединительной муфты и видом расцентровки.

- Нужно достаточно хорошо и подробно представлять конструкцию и принцип работы соединительной муфты, понимать процессы, в ней происходящие. Только это дает возможность правильно дифференцировать в общей вибрации ту ее часть, которая является наведенной от расцентровки.

Расцентровка является частой и распространенной причиной повышенной вибрации в оборудовании.

Один из самых первых признаков расцентровки валов - наличие увеличенных радиальных вибраций на подшипниках с двух сторон муфты при достаточно низких вибрациях в других точках. По направлению эти вибрации обычно сосредоточены почти полностью в плоскости расцентровки.

Для определения направления плоскости смещения валов, по которой произошло возникновение расцентровки, можно воспользоваться очень простым правилом - необходимо построить распределение вибраций в осевом направлении, в зависимости от угла установки датчика на подшипнике. Датчик переставляется вокруг подшипника, каждый раз точка замера переносится на 30 - 45 градусов по направлению или против направления вращения ротора.

В итоге можно будет построить круговой график, своеобразную "розу вибраций", которую мы называем так по аналогии с "розой ветров" в науках о климате. При наличии расцентровки в такой "розе вибраций" чаще всего будут два явно выраженных пика, диаметрально противоположных. Если аналогичная картина будет на другом подшипнике, расположенном через муфту - вероятность параллельной расцентровки будет очень велика.

Кроме того происходит характерное изменение спектрального состава вибросигналов - резко увеличивается амплитуда второй гармоники оборотной частоты, а иногда и третьей гармоники. Возрастание второй гармоники в спектре вибросигнала объясняется достаточно просто - процессы от некачественной центровки валов, вследствие неправильного монтажа подшипников, повторяются дважды за один оборот вала.

Осевая составляющая при расцентровке всегда несет в себе характерные особенности - практически всегда есть вторая и третья гармоники, хотя амплитуда вибрации в осевом направлении может возрасти не очень значительно.

3.3.2 Влияние типа муфты при расцентровке на вибрацию

Картина вибраций на двух контролируемых подшипниках, возникающая при расцентровке валов двух соединяемых механизмов (по подшипникам), зависит от многих параметров, но в наибольшей степени зависит от типа и конструкции соединительной муфты, ее технического состояния.

Все многообразие применяемых на практике соединительных муфт, исходя из основных конструктивных особенностей, имеется в виду их влияния на характер вибрации при расцентровке, можно свести в три основные группы:

- жесткие муфты;
- гибкие муфты;
- подвижные муфты с гистерезисом.

Жесткая муфта.

Это муфта, при помощи которой два разных вала объединяются практически в единое целое.

После сборки жестких муфт оси роторов обязательно будут всегда принудительно совпадать. Расцентровка, т. е. некорректный монтаж "линии вала по подшипникам", при этом отсутствует. Она сказывается только в изменении величины и направления усилий, действующих на подшипники, деформирует "розу вибраций" в направлении некорректности в монтаже подшипников.

При параллельной вертикальной расцентровке происходит разгрузка опор, расположенных ниже, противоположные же опоры, через муфту, при этом нагружаются. При угловой вертикальной расцентровке происходит перераспределение усилий на ближние и дальние подшипники, если считать от полумуфты. Если расцентровки имеют горизонтальную ориентацию - то возникают соответствующие горизонтальные реакции.

Расцентровка при жестких муфтах и подшипниках скольжения не создает сама по себе возмущающих сил, не сказывается в спектре вибрации. Ее влияние

на вибрацию определяется изменением жесткости смазочного слоя опорных подшипников вдоль зазора за счет изменения опорных реакций.

Результатом этого достаточно простого заключения являются большие последствия - диагностировать расцентровку валов, соединенных жесткой муфтой, при помощи методов спектральной вибродиагностики достаточно трудно. Если при монтаже муфты ремонтным службам удалось полностью исключить дефект монтажа типа "колено", то отдиагностировать по спектрам вибросигналов параллельную расцентровку в жесткой муфте очень сложно.

Если "колено" в муфте, хоть в малой степени, присутствует, то диагностика возможна, но будет диагностироваться не расцентровка, а интегральный специфический параметр, который можно условно определить как "произведение расцентровки на колено". Это происходит потому, что сам дефект типа "колено" является той лакмусовой бумагой, которая приводит к появлению в спектрах вибросигналов характерной картины и позволяет выявлять расцентровку.

При отсутствии дефекта монтажа муфты типа "колено" диагностику расцентровки в жесткой муфте можно все - таки выполнить, но при этом ее следует производить другими, более "специфическими" методами вибродиагностики, например, при помощи применения для диагностики синхронных или синхронизированных вибросигналов, регистрация которых является более сложной, и требует более сложных приборов.

Гибкая муфта.

Примером такой муфты служит линзовая муфта, в которой валы соединяются при помощи элемента специальной формы, напоминающего по форме один элемент барометрической коробки.

В спектре вибрации на подшипниках вблизи такой муфты с расцентровкой характерные спектральные признаки расцентровки видны почти в классическом проявлении, хотя и в несколько ослабленном, можно сказать сглаженном виде.

В радиальном направлении, в направлении основной плоскости расцентровки происходит общее увеличение вибрации, особенно второй гармоники оборотной частоты. В осевом направлении сильно вырастают вторая и третья гармоники.

Подвижная муфта с гистерезисом.

В этот класс можно отнести те муфты, которые в пределах небольших взаимных смещений полумуфт (центруемых валов) ведут себя как свободное соединение, а при больших смещениях - как жесткие или гибкие муфты. Оси роторов таких муфт после сборки могут оставаться взаимно смещенными и вибрация при этом не будет большой, по крайней мере при смещениях валов на небольшую величину, не превышающую зону свободных перемещений, люфтов.

К этому классу можно отнести зубчатые муфты, разнообразные пальцевые и кулачковые, пружинные и т. д.

При расцентровках в оборудовании, которые по своей величине не выходят из диапазона допустимых смещений, муфты с гистерезисом, т. е. с небольшой подвижностью, компенсируют смещение валов и вибрация существенно не возрастает. В этом состоит коренное отличие методов вибрационной диагностики расцентровок от методов непосредственного контроля смещения валов, например, при помощи лазерных центровщиков. В вибросигнале явные признаки расцентровки появляются только тогда, когда по своей величине расцентровка превысит смещение, допустимое для конструкции данной муфты.

При использовании одновременно двух методов контроля качества центровки, например, по вибрации и при помощи лазерного центровщика, могут возникнуть сложности, связанные с трактовкой противоречивых заключений. Например, лазерный центровщик может показать наличие расцентровки, но при этом по вибрации она не будет диагностироваться. Такое противоречие может иметь место в муфте с гистерезисом, когда смещение

валов есть, но величина этого смещения валов меньше значения, допустимого для данной муфты. Лазерный центровщик покажет истинное смещение валов в неработающем агрегате, а вибрационные методы позволят сделать заключение, что такая расцентровка не сказывается на работе агрегата.

Заключения двух методов становятся одинаковыми в том случае, когда смещение валов в зоне соединения превысит допустимые компенсационные возможности муфты.

Рассмотрим предпосылки возникновения в вибрации расцентрованной муфты с гистерезисом характерных гармоник, по которым проводится диагностирование расцентровки по спектрам вибросигналов. На картину "чистой расцентровки", наблюдаемой при наличии жесткой муфты, будут накладываться динамические удары в моменты "переключения внутреннего зазора в муфте", когда полумуфты будут перемещаться во взаимно противоположные направления в диапазоне допустимого гистерезиса.

Такой характер ударов полумуфт друг о друга приводит к появлению во временном вибросигнале колебаний, симметричных относительно оси времени, т. е. появлению в спектре нечетных гармоник, наибольшее значение из которых, наряду с возросшей первой гармоникой, будет иметь третья гармоника. Пятую и седьмую можно наблюдать, но по своей величине они малы. Эти гармоники добавляются к первой гармонике оборотной частоты, имеющей место практически всегда, и ко второй, которая всегда свойственна расцентровке.

Четные гармоники оборотной частоты возникает обычно в моменты ударов, а поскольку при расцентровке на один оборот приходится обычно два удара, то преобладающей, из четных гармоник, является вторая гармоника. Появление второй гармоники в сигнале достаточно хорошо объясняется при помощи анализа "розы вибраций", имеющей при расцентровке два диаметрально противоположных максимума. Такая картина распределения вибраций может быть получена только при наложении вибраций двух

гармоник, первой и второй, когда вторая гармоника модулирует первую. В итоге на суммарной вибрации появляются два пика.

В спектре вибрации расцентровки валов механизмов, соединенных при помощи муфты с гистерезисом часто происходит наложение гармоник от двух различных причин повышенной вибрации - расцентровки и "механического ослабления". Под механическим ослаблением здесь следует понимать наличие свободных зазоров в муфте, через пространство которых происходят постоянные соударения полумуфт. Первопричиной соударений является расцентровка.

По качественным и количественным соотношениям в проявлении ослабления в расцентрованной муфте можно достаточно корректно судить о ее техническом состоянии, оценивать состояние зубцовых пар зубчатой муфты, определять наличие сломанных элементов в пружинной муфте и т. д. Удары полумуфт друг о друга, вызванные расцентровкой, являются тем самым "молоточком", который возбуждает диагностические колебания.

Для каждого конкретного типа соединительной муфты, с нелинейностью типа люфт, можно разработать целый ряд простых диагностических правил, позволяющих достаточно подробно контролировать ее техническое состояние.

3.3.3 Моделирование несоосности валов (расцентровки)

Сначала рассмотрим привод в отцентрованном состоянии. Произведем замеры виброскорости на электродвигателе в точках три, четыре и шесть, расположенных рядом с муфтой. Данные точки крепления датчика показаны на рис.16. В отцентрованном состоянии на спектрах виброскорости не должно быть повышенных гармоник вибрации. Среднеквадратичное значение вибрации не должно превышать 4,5 мм/с.

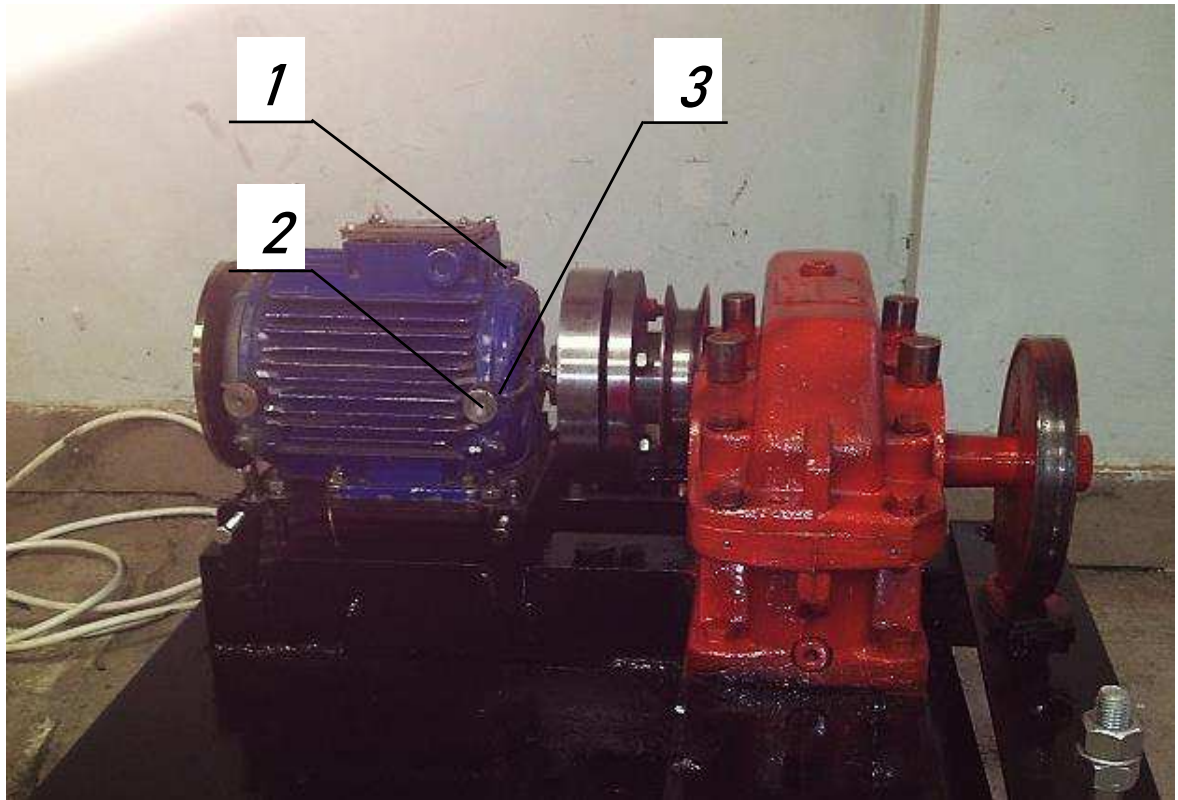


Рисунок 18 – Расположение мест крепления датчика:
 1 - вертикальное крепление датчика (точка 3);
 2 - осевое крепление датчика (точка б);
 3 - горизонтальное крепление датчика (точка 4).

Спектры вибрации, зафиксированные на подшипнике двигателя, расположенном рядом с муфтой, в трех направлениях: вертикальном, горизонтальном и осевом, показаны на рис. 19, 20, 21.

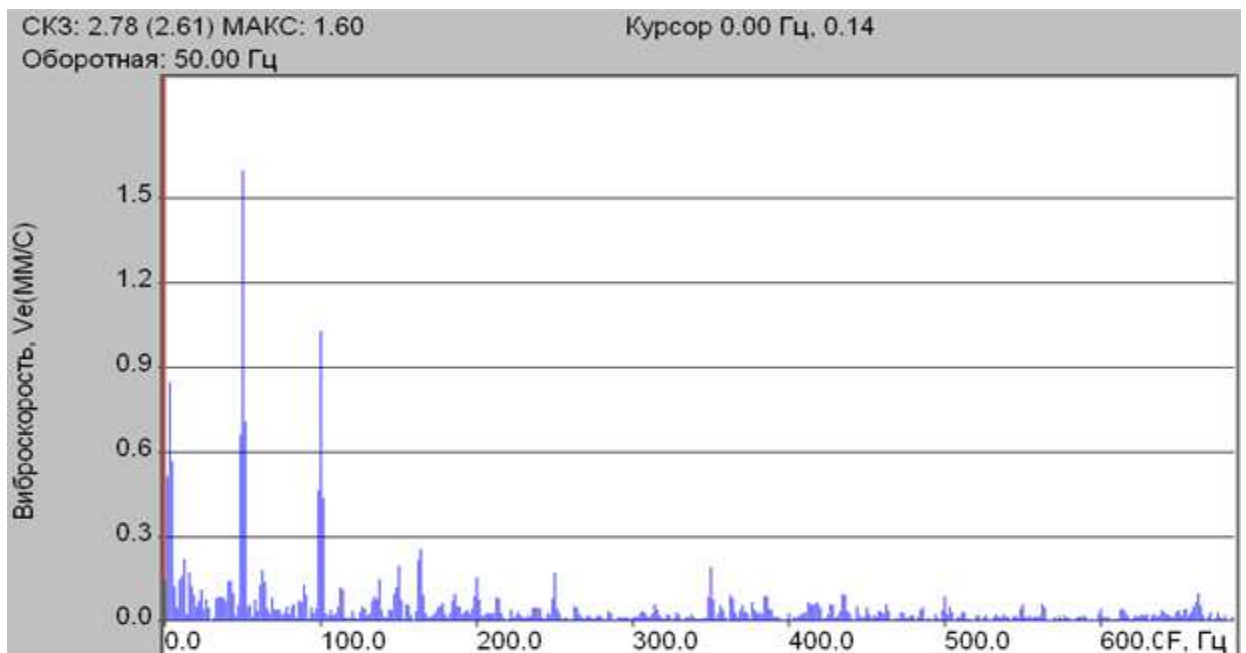


Рисунок 19 - Вертикальная составляющая виброскорости (точка 3)

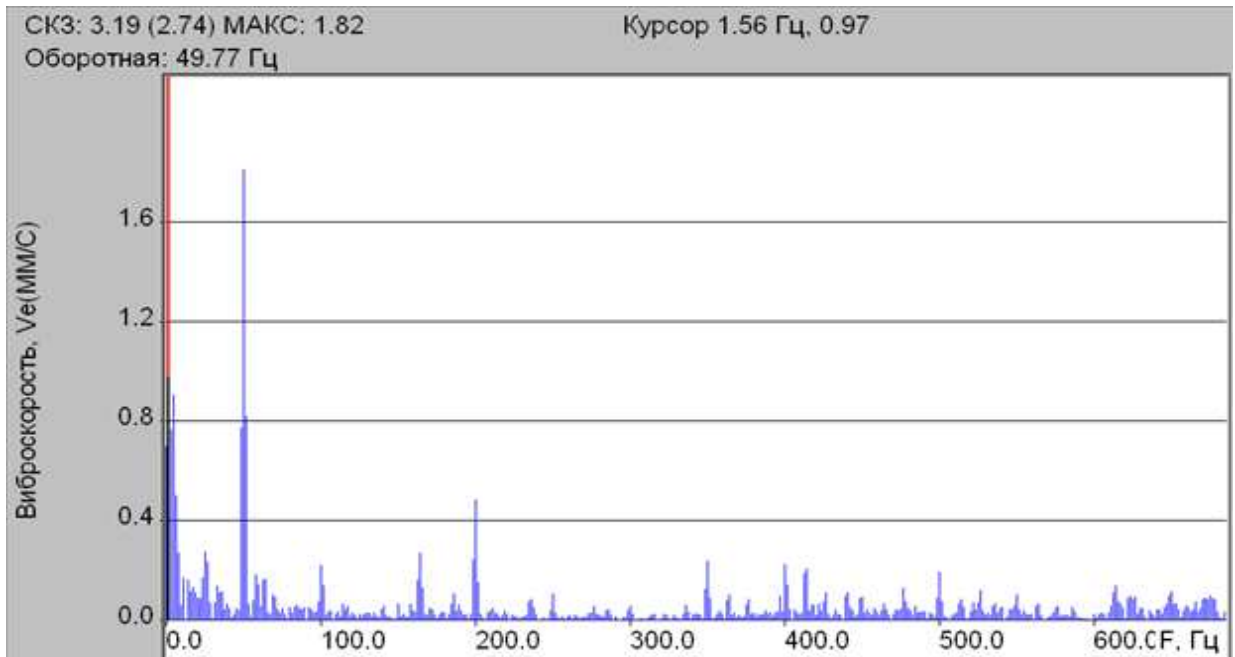


Рисунок 20 – Горизонтальная составляющая виброскорости (точка 4)

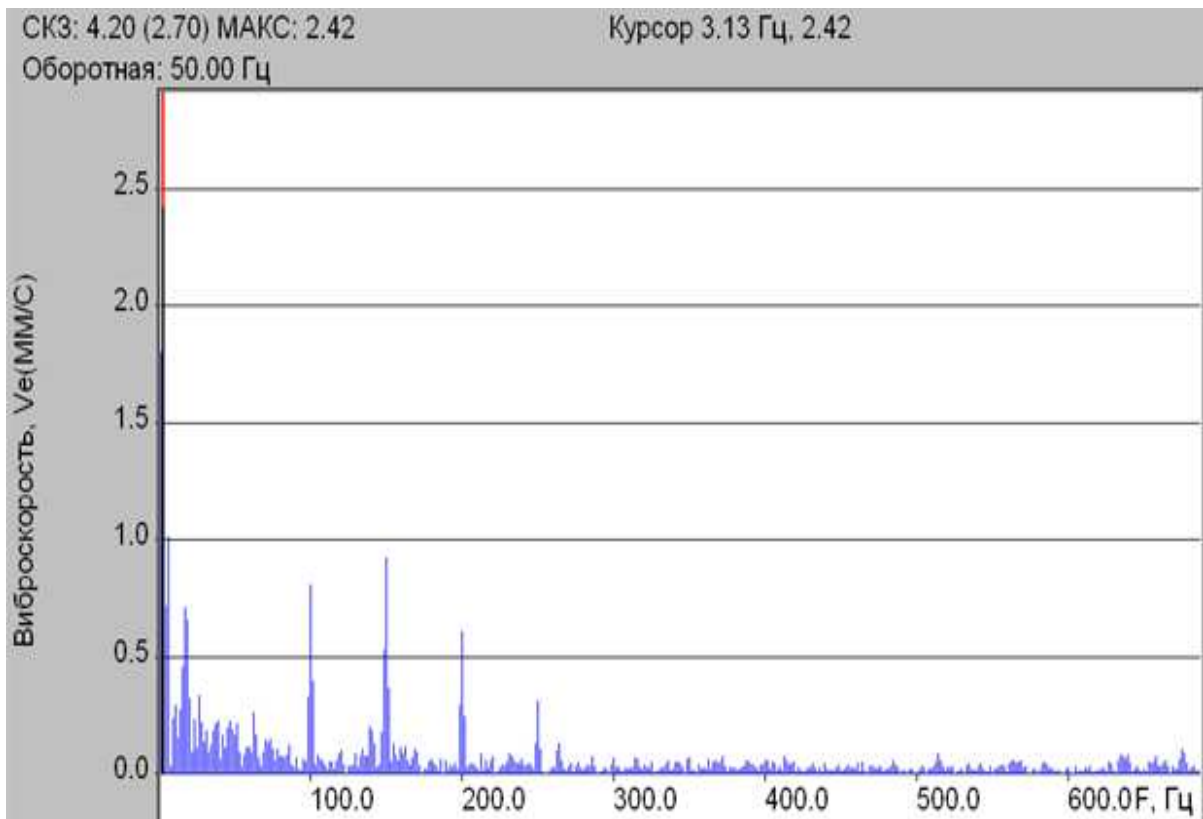


Рисунок 21 – Осевая составляющая виброскорости (точка 6)

По спектрам вибрации хорошо видно что вибрация сосредоточенная на первой, второй и третьей гармониках являются допустимыми. Среднеквадратичное значение не превышает 4.5 мм/с. Незначительные колебания вызваны из за некачественного фундамента. Можно сделать вывод, что данный привод отцентрован и может эксплуатироваться.

Расцентровка в вертикальной плоскости.

С помощью перемещения подвижной платформы, путем механического воздействия, относительно рамы рис. 22 на которой крепится двигатель смоделируем несоотность валов (расцентровку) в горизонтальной плоскости. После расцентровки снова произведем замеры в точках крепления (три, четыре и шесть) датчика. Также произведем замеры на редукторе в точках семь и восемь.

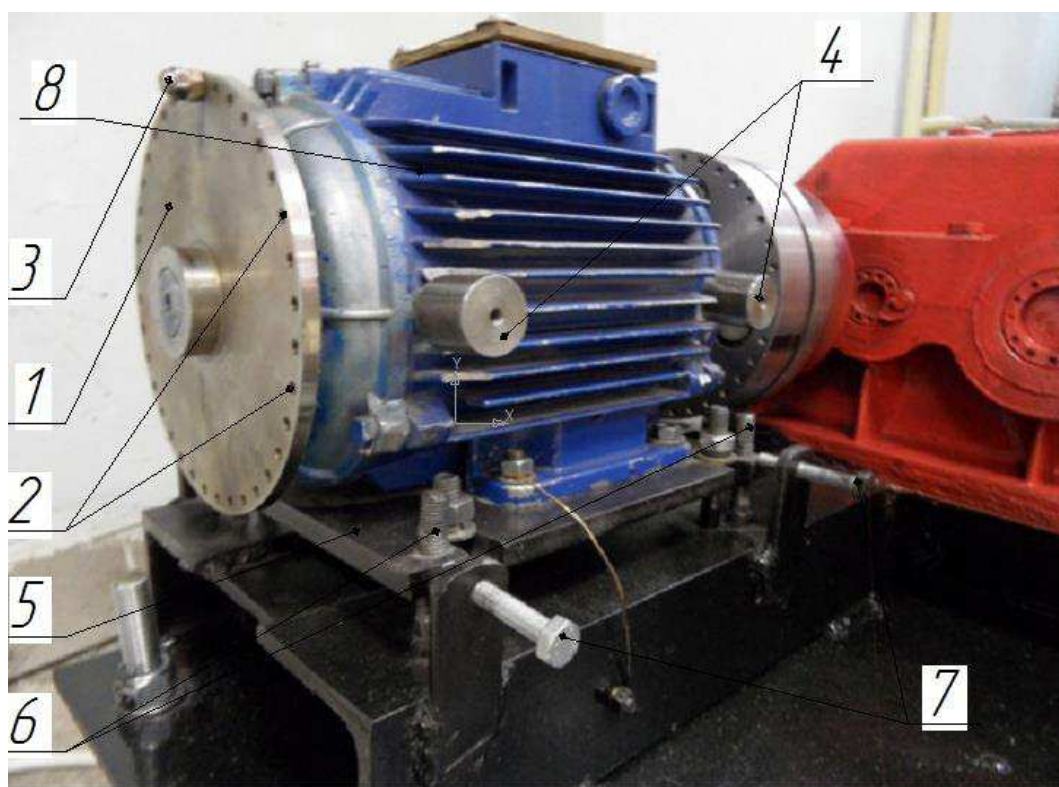


Рисунок 22 - Подвижная платформа:

- 1 - балансировочный диск; 2 - отверстия для моделирования дисбаланса
- 3 - груз; 4 - точки приложения датчика; 5 - подвижная платформа;
- 6- вертикальный регулировочный болт;
- 7 - горизонтальный регулировочный болт; 8- электродвигатель.

Спектры вибрации зафиксированные на подшипнике двигателя расположенные рядом с муфтой в точках 3, 4 и 6. Показаны на рис. 23, 24, 25.

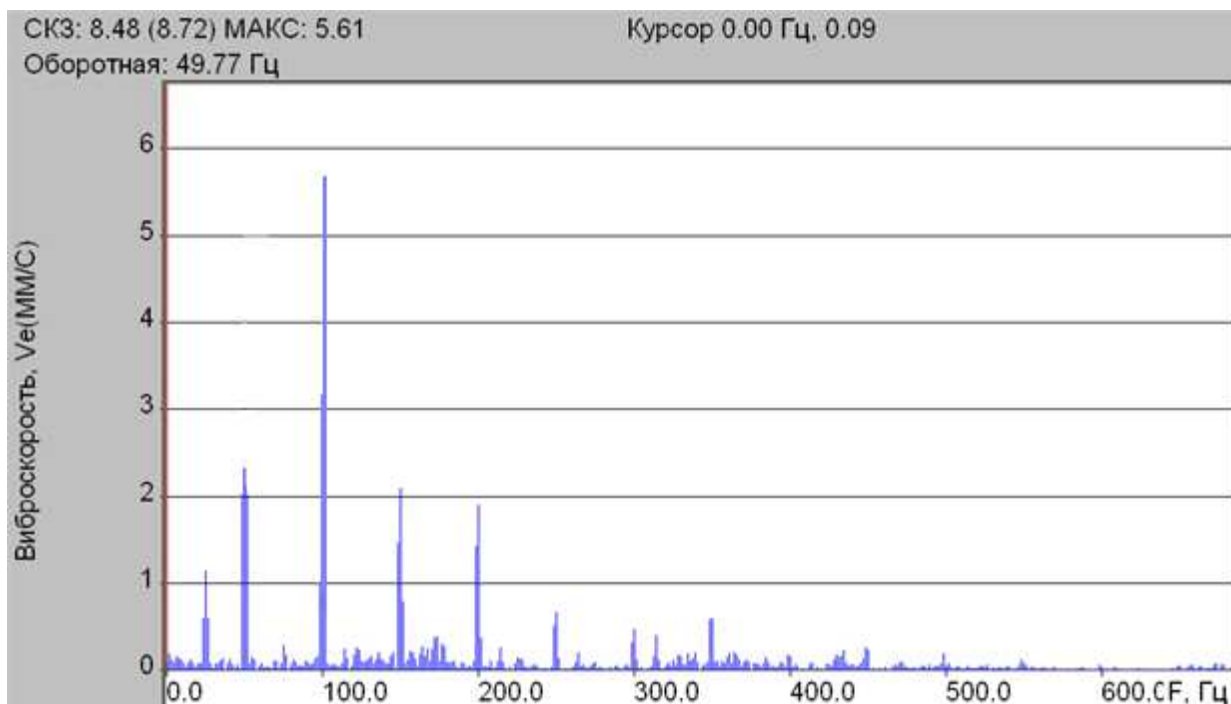


Рисунок 23 – Вертикальная составляющая при расцентровке (точка 3)

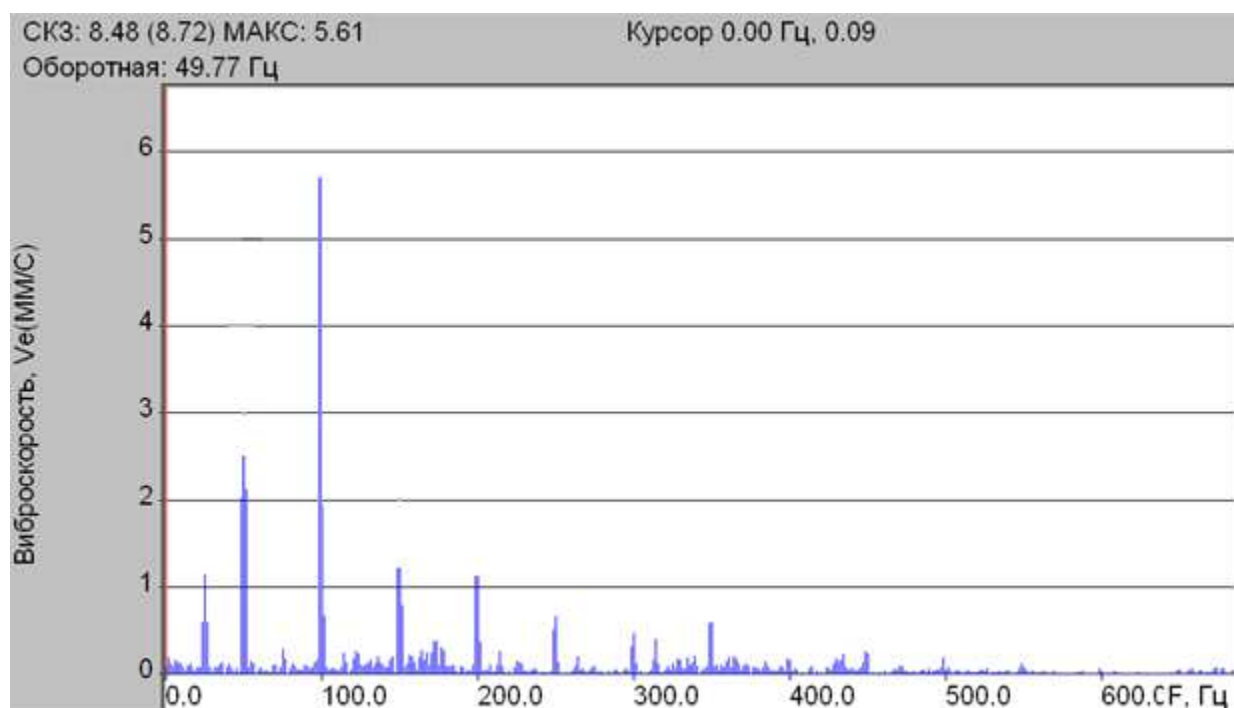


Рисунок 24 – Горизонтальная составляющая при расцентровке (точка 4)

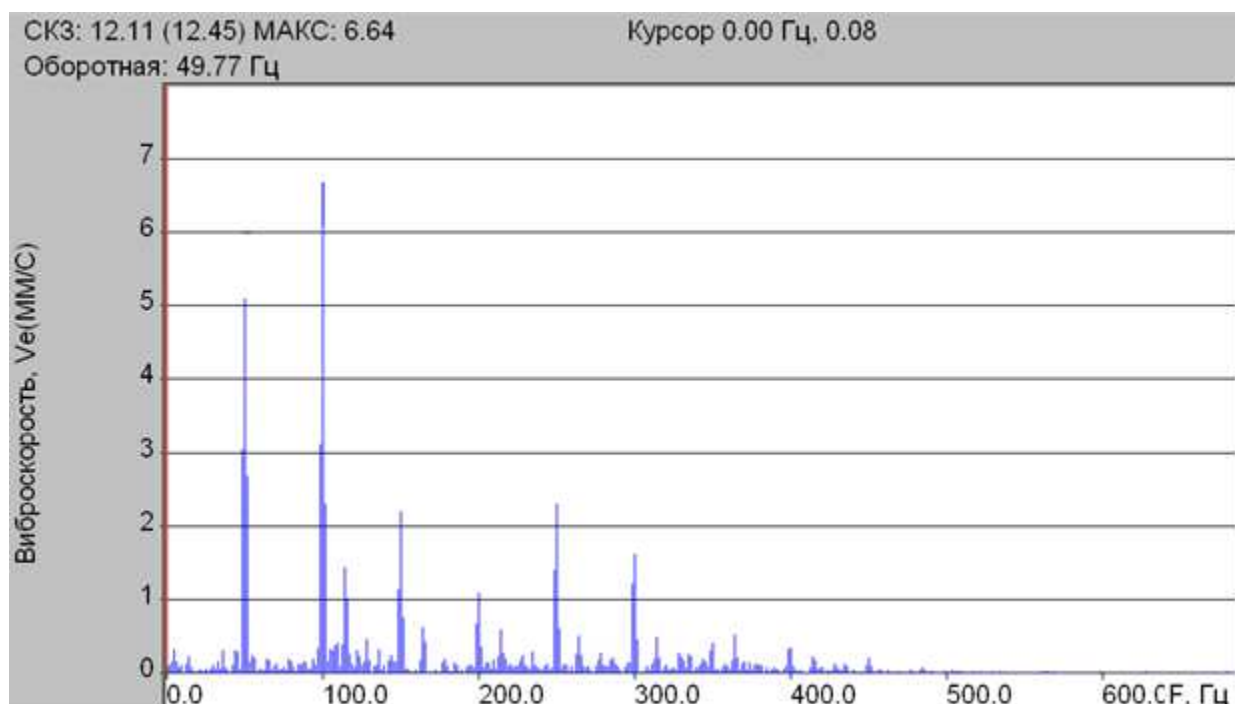


Рисунок 25 – Осовая составляющая при расцентровке (точка б)

На спектре вертикальной и горизонтальной составляющей рис.23, 24 уровень вибрации сосредоточен на второй гармонике, превышая допустимый уровень вибрации. На спектре осевой составляющей рис.25 уровень вибрации сосредоточен на 1 и 2 гармониках, так же превышая допустимый уровень вибрации. Исходя из показаний спектров виброскорости следует, что данный узел имеет значительную расцентровку и должен быть немедленно выведен из эксплуатации для ремонта.

Места крепления датчика в точках 7 и 8 показаны на рис. 26. Спектры вибрации на подшипнике редуктора, расположенного рядом с муфтой изображены на рис. 27, 28.

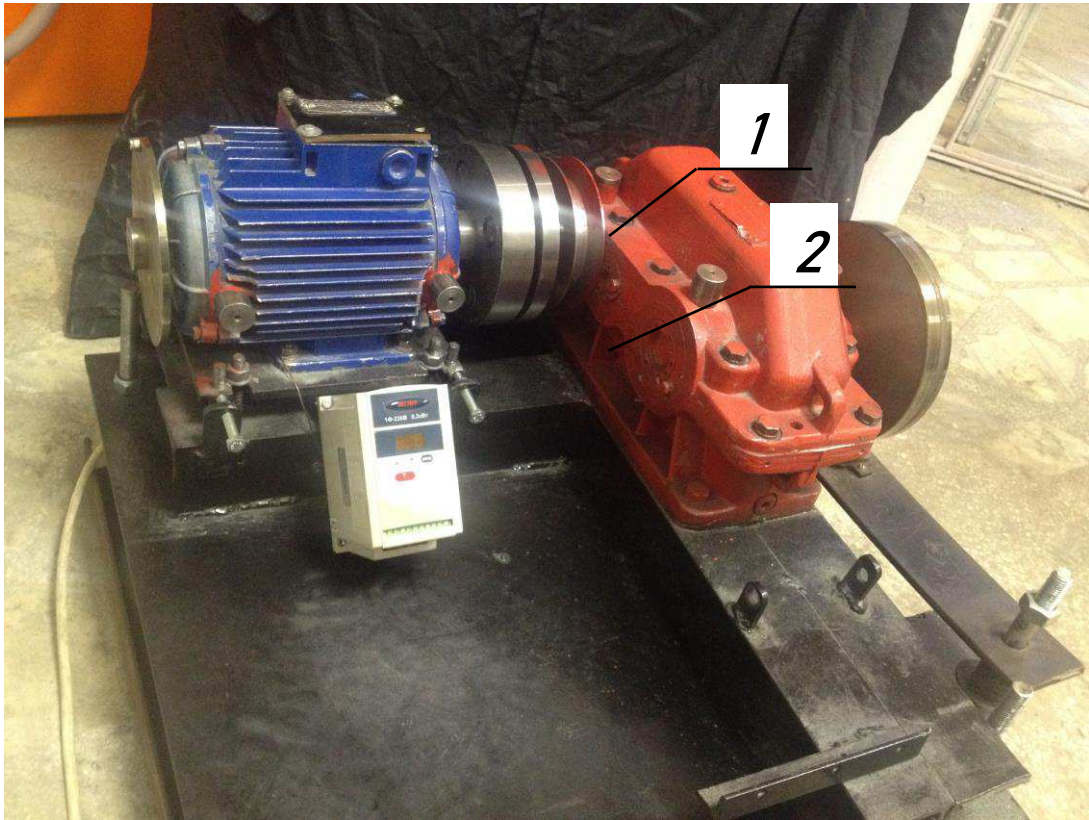


Рисунок 26 - Места крепления датчика:

- 1 - вертикальное крепление датчика (точка 7);
- 2 - горизонтальное крепление датчика (точка 8)

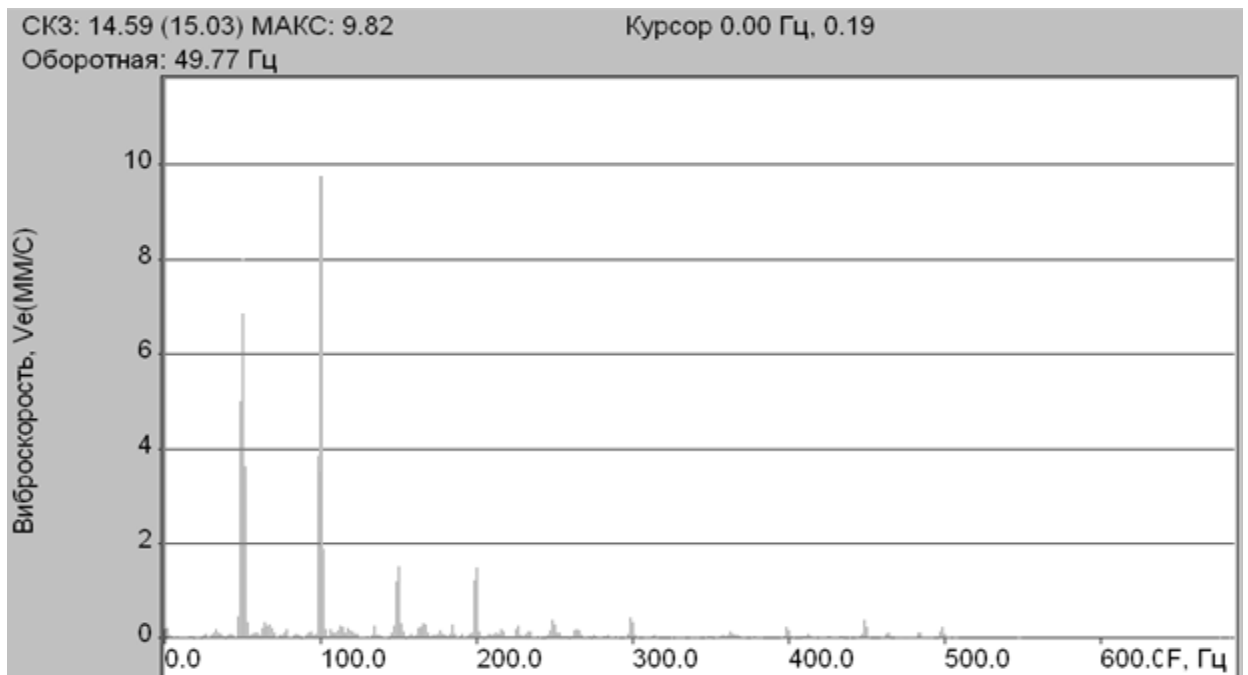


Рисунок 27 – Вертикальная составляющая при расцентровке (точка 7)

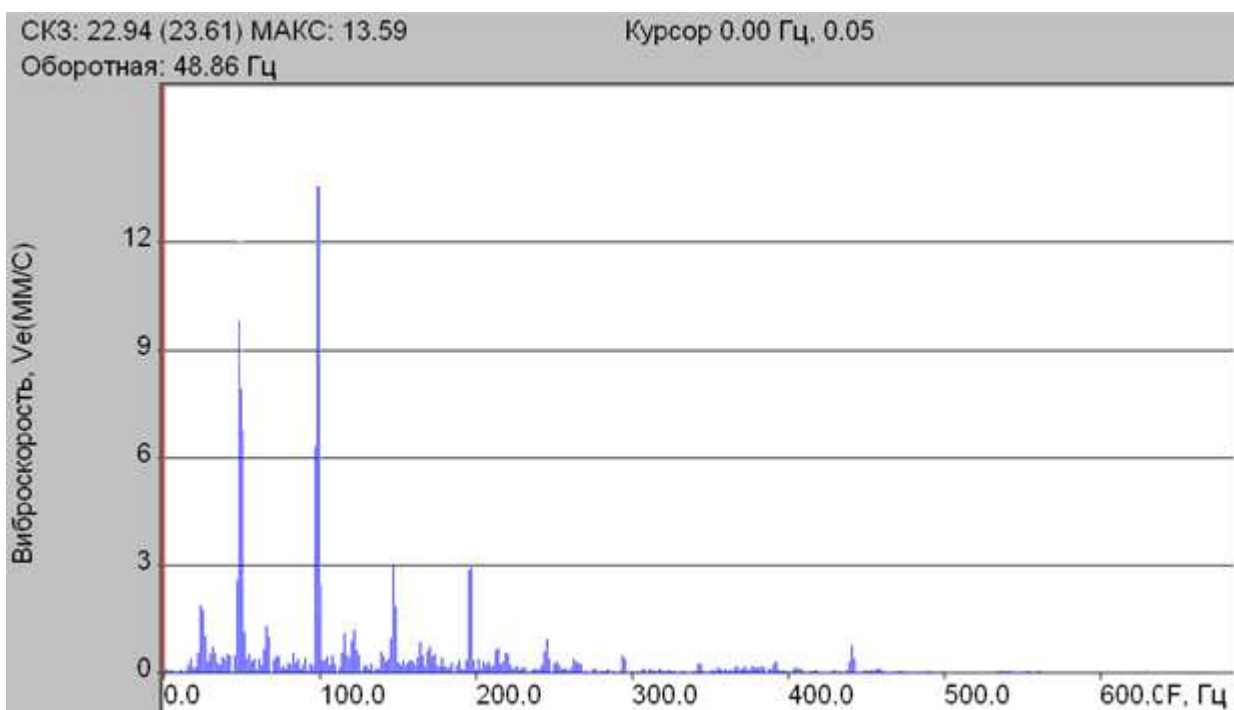


Рисунок 28 – Горизонтальная составляющая при расцентровке (точка 8)

По спектрам виброскорости в точках 7 и 8 хорошо видно, что преобладает вторая гармоника. Тем самым указывает на расцентровку данного узла. Среднеквадратическое значение превышает допустимое в несколько раз. Узел должен быть выведен из эксплуатации для ремонта.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Дисбаланс статический

Как было сказано выше статический дисбаланс возникает, когда основная ось инерции смещена параллельно оси вращения.

Значения ΔV , ΔH , ΔO_V , ΔO_H – это разность фаз, соответственно в вертикальной, горизонтальной, осевой вертикальной и осевой горизонтальной плоскостях.

Статический дисбаланс был смоделирован при частоте вращения ротора 49,5 Гц (2964 об/мин), результаты проведенных исследований получили данные табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений при статическом дисбалансе

Направл. оси датчика	Электродвигатель				Редуктор			
	1		2		1		2	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
$V_{\text{верх}}$	36,012	58,5	4,193	111,1	18,364	228,7	42,877	221,3
$V_{\text{низ}}$	24,046	125,7	6,005	250	13,219	33,7	46,505	54,7
ΔV	11,966	67,2	1,812	138,9	5,145	195	3,628	166,6
$H_{\text{лев}}$	14,290	118,2	16,340	70,7	11,325	37,8	12,290	40,9
$H_{\text{прав}}$	13,993	273,9	14,276	311,1	7,896	238	13,578	217,3
ΔH	0,297	155,7	2,064	240,4	3,429	200,2	1,288	135,7
$O_{\text{верх}}$	14,577	285,8	18,116	163,5	35,655	243,5	31,008	61,9
$O_{\text{низ}}$	15,095	134,9	14,099	183,9	18,509	131	12,263	128,9
ΔO_V	0,518	150,9	4,017	20,4	17,146	112,5	18,745	67
$O_{\text{лев}}$	11,555	319,3	14,436	157,7	6,928	315,1	22,497	68,4
$O_{\text{прав}}$	2,851	225,3	17,552	60,6	21,432	226	27,619	219,8
ΔO_H	8,704	94	3,116	97,1	14,504	89,1	5,122	151,4

Из анализа полученных данных (фазовых углов) получили следующие закономерности, в результате которых были выведены следующие правила:

Правило 1. Разница фаз в осевом направлении.

В этом правиле контрольным числом является 170° , т.к. в ходе эксперимента данные не превышали результирующее значение. ΔO_v и ΔO_h соответственно, разница фаз в осевом вертикальном и осевом горизонтальном направлениях.

Правило	Электродвигатель	
	1	2
$\Delta O_v \leq 170$	$150,9 \leq 170$	$126,4 \leq 170$
$\Delta O_h \leq 170$	$94 \leq 170$	$97,1 \leq 170$

Правило 2. Разница фаз в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Если разница между значениями фазы ΔV и ΔH составляет приблизительно 90 градусов, то в агрегате присутствует дисбаланс.

Значения ΔV и ΔH это разница фаз в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Правило	Электродвигатель	
	1	2
$\Delta V - \Delta H = 90 \pm 10^\circ$	88,5	101,5

4.2 Дисбаланс динамический

Динамический дисбаланс возникает, когда центральная ось инерции не является ни параллельной, ни пересекается с осью вращения.

Моделирование производилось при частоте вращения ротора $49,5$ Гц (2964 об/мин) результате проведенных исследований получили данные табл. 2.

Таблица 2 – Результаты измерений при динамическом дисбалансе

Направл. оси датчика	Электродвигатель				Редуктор			
	1		2		1		2	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
$V_{\text{верх}}$	56,543	218,4	11,028	158,3	25,869	26,2	53,922	16,8
$V_{\text{низ}}$	23,965	21,7	5,938	357,5	20,751	203,6	58,280	185,2
ΔV	32,578	196,7	5,090	199,2	5,118	177,4	4,358	168,4
$H_{\text{лев}}$	6,764	244,8	12,560	200,1	10,282	206,4	17,780	195,9
$H_{\text{прав}}$	6,973	135,9	10,909	49,2	6,956	35,9	12,254	41,4
ΔH	0,209	108,9	1,651	150,9	3,326	170,5	5,526	154,5
$O_{\text{верх}}$	10,904	88,7	23,765	221,8	45,783	30,8	38,237	197,6
$O_{\text{низ}}$	13,869	185,1	14,908	350,1	30,098	176,1	10,792	295,9
ΔO_V	2,965	96,4	8,857	128,3	15,685	145,3	27,445	98,3
$O_{\text{лев}}$	8,698	147,4	9,651	307,3	19,284	116,1	15,698	223,8
$O_{\text{прав}}$	14,852	49,2	18,151	216,7	7,970	26,7	10,342	189,3
ΔO_h	6,154	98,2	8,500	90,6	11,314	89,6	5,356	34,5

Из анализа полученных данных (фазовых углов) получили следующие закономерности, в результате которых были выведены следующие правила:

Правило 1. Разница фаз в осевом направлении.

В этом правиле контрольным числом является 170° , т.к. в ходе эксперимента данные не превышали результирующее значение. ΔO_V и ΔO_h соответственно, разница фаз в осевом вертикальном и осевом горизонтальном направлениях.

Правило	Электродвигатель	
	1	2
$\Delta O_V \leq 170$	$96,4 \leq 170$	$128,3 \leq 170$
$\Delta O_h \leq 170$	$98,2 \leq 170$	$90,6 \leq 170$

Правило 2. Разница фаз в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Если разница между значениями фазы ΔV и ΔH составляет приблизительно 90 градусов, то в агрегате присутствует дисбаланс.

Значения ΔV и ΔH это разница фаз в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Правило	Электродвигатель	
	1	2
$\Delta V - \Delta H = 90 \pm 10^\circ$	87,8	48,3

4.3 Резонанс

Резонанс возникает при резком возрастании амплитуды вынужденных колебаний, которое наступает при совпадении частоты внешнего воздействия с некоторыми значениями, определяемым свойствами системы.

Моделирование резонанса было воспроизведено при частоте вращения ротора 37,9 Гц (2274 об/мин), результате проведенных исследований получили данные табл. 3.

Таблица 3 – Результаты измерений при резонансе

Направл. оси датчика	Электродвигатель		Редуктор	
	1		2	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
$V_{\text{верх}}$	12,756	241	18,346	77,7
$V_{\text{низ}}$	11,365	67,5	16,429	259,1
ΔV	1,391	173,5	1,917	181,4
$H_{\text{лев}}$	19,079	70,1	7,813	123,3
$H_{\text{прав}}$	19,304	254,5	20,519	255,5
ΔH	0,225	184,4	12,706	175,8

Из анализа полученных данных (фазовых углов) получили следующие закономерности, в результате которых было выведено следующее правило:

Правило 1. Разница фаз в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Значения ΔV и ΔH соответственно, разница фаз в вертикальном и горизонтальном направлениях должны быть равны нулю или $180^\circ \pm 10^\circ$.

Правило	Электродвигатель	Редуктор
$\Delta V = 0$	173,5	181,4
$\Delta V = 180 \pm 10^\circ$		
Правило	Электродвигатель	Редуктор
$\Delta H = 0$	184,4	175,8
$\Delta H = 180 \pm 10^\circ$		

4.4 Расцентровка угловая

Угловая расцентровка - излом оси в месте сочленения валов на некоторый угол при хорошем совмещении центров валов в районе их торцов.

Моделирование производилось при частоте вращения ротора 49,5 Гц (2964 об/мин), в результате проведенных исследований получили данные табл. 4.

Таблица 4 – Результаты измерений при угловой расцентровке

Направл. оси дат- чика	Электродвигатель				Редуктор			
	1		2		1		2	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
$V_{\text{верх}}$	26,585	215	3,205	13,1	20,144	7,4	37,419	9
$V_{\text{низ}}$	25,413	6,7	5,661	212,6	19,031	189,2	42,376	188,2
ΔV	0,154	209,3	2,456	199,5	1,113	181,8	4,957	179,2

Продолжение таблицы 4

Н _{лев}	1,748	199,3	6,611	14,3	8,755	40,3	8,289	355,5
Н _{прав}	1,594	33,9	8,216	190,9	7,711	286,8	13,345	181,5
ΔН	0,154	165,4	1,605	176,6	1,044	246,5	5,056	174
О _{верх}	5,552	35,2	20,951	190,2	34,710	10,4	28,580	184,4
О _{низ}	9,242	266,8	9,510	4,7	7,830	192,7	3,493	244,9
ΔO _V	3,690	231,6	11,441	185,5	26,880	182,3	25,087	60,5
О _{лев}	10,277	14,1	14,533	262,9	16,028	14,2	4,794	206,9
О _{прав}	5,171	204,4	1,891	58,8	14,089	17,6	9,659	191
Δ O _h	5,106	190,3	12,642	204,1	1,939	3,4	4,865	15,9

Из анализа полученных данных (фазовых углов) получили следующие закономерности, в результате которых были выведены следующее правило:

Правило 1. Разница фаз при горизонтальном и вертикальном направлениях.

В этом правиле разница фаз в горизонтальном направлении должна быть больше 150° и не быть равным разнице фаз в вертикальном направлении.

Правило	Электродвигатель	Редуктор
	2	1
$\Delta H \geq 150$	$176,6 > 150$	$246,5 > 150$
$\Delta H \neq \Delta V$	$176,6 \neq 199,5$	$246,5 \neq 181,8$

4.5 Расцентровка параллельная

Параллельная расцентровка валов - параллельное взаимное смещение осей соседних центрируемых роторов друг относительно друга.

Моделирование производилось при частоте вращения ротора 49,5 Гц (2964 об/мин) результате проведенных исследований получили данные табл. 5.

Таблица 5 – Результаты измерений при параллельной расцентровке

Направл. оси датчика	Электродвигатель				Редуктор			
	1		2		1		2	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
$V_{\text{верх}}$	27,751	238	8,479	16,9	22,125	25,9	42,099	20,3
$V_{\text{низ}}$	22,111	58,7	9,512	211,4	25,755	191,6	45,444	215,2
ΔV	5,640	179,3	1,033	194,5	3,630	165,7	3,345	194,9
$H_{\text{лев}}$	1,902	153,1	7,295	200,6	8,367	211,3	7,362	21,9
$H_{\text{прав}}$	0,397	363,1	6,410	27,2	7,978	18,6	9,190	23
ΔH	1,505	210	0,885	173,4	0,389	192,7	1,828	1,1
$O_{\text{верх}}$	14,573	251,2	8,960	5,6	31,832	42,7	26,410	193,6
$O_{\text{низ}}$	12,612	24,7	23,730	197,5	25,153	51,6	3,137	223
ΔO_V	1,961	226,5	14,770	191,9	6,679	8,9	23,273	29,4
$O_{\text{лев}}$	6,171	222,2	2,803	44,4	17,099	38,2	6,735	206,3
$O_{\text{прав}}$	5,759	34,2	10,140	231,9	16,305	45,3	12,911	200
ΔO_h	0,412	188	7,337	187,5	0,794	7,1	6,176	6,3

Из анализа полученных данных (фазовых углов) получили следующие закономерности, в результате которых были выведены следующее правило:

Правило 1. Разница фаз при горизонтальном и вертикальном направлениях

В этом правиле разница фаз в горизонтальном направлении должна быть больше 150° и не быть равным разнице фаз в вертикальном направлении.

Правило	Электродвигатель	Редуктор
	2	1
$\Delta H \geq 150$	$173,4 > 150$	$192,7 > 150$
$\Delta H \neq \Delta V$	$173,4 \neq 194,5$	$192,7 \neq 165,7$

5 КОНТРОЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ ЭШ10/70

В целях установления работоспособности метода анализа по фазовым углам было проведено диагностическое обследование привода подъёма шагающего экскаватора ЭШ 10/70. Исследовательский эксперимент проводился на территории ТЭЦ АО «Русал-Ачинск».

На рис. 31 изображены контрольные точки (КТ) привода подъёма ЭШ-10/70, точки необходимые нам для исследования обведены в круг. Соответственно, точки 1, 2 – точки измерения на подшипниках левого электродвигателя; 8, 7 - точки измерения на подшипниках правого электродвигателя; 3, 9 – точки измерения на подшипниках редуктора.

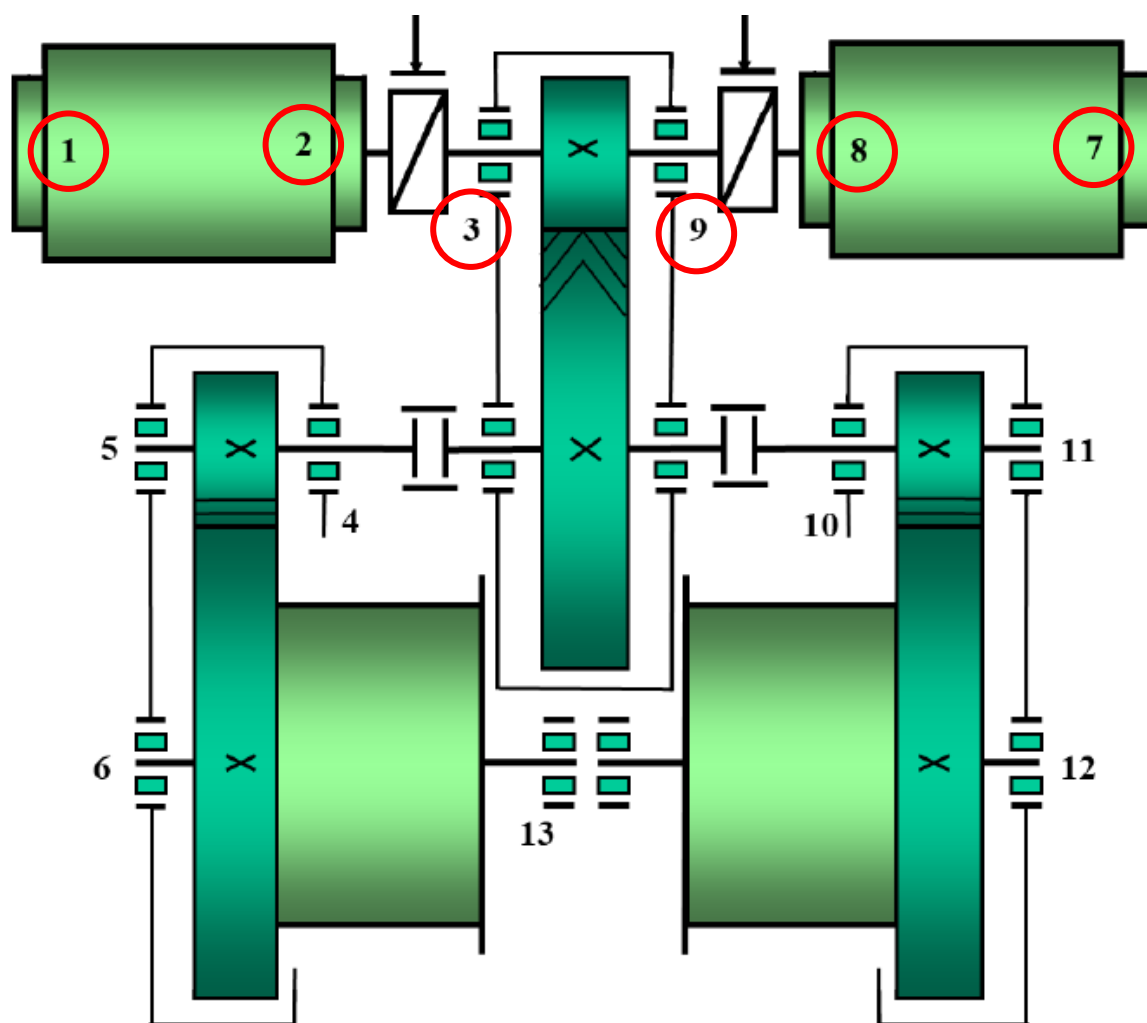


Рисунок 29 – Схема контрольных точек привода подъёма

Измерения вибрации проводились на подшипниковых узлах в трех взаимно-перпендикулярных направлениях (V – вертикально; Н – горизонтально; О – аксиально – вдоль оси вращения вала).

Измерения уровня вибрации агрегата с переменной скоростью и направлением вращения проводились без нагрузки при скорости вращения вала не менее 75% максимальной, скорость вращения в процессе измерения не изменялась.

Таблица 6 - Нормы вибрации для обследованного класса машины

Наименование оборудования	Группа	Класс оценок (V_e), мм/с			
		Хорошо	Удовлетворительно	Допустимо	Недопустимо
ЭШ 10/70					
Привод подъёма	2	1,8	1,8...4,5	4,5...11	>11

Таблица 7 – Результаты измерений КТ

Контрольные точки измерения	Показатели	Направление оси датчика		
		V	Н	О
1	V_e , мм/с	13,7	11,1	11,1
	Δ Фаза, град	215,2	186,4	225
2	V_e , мм/с	10,9	23,9	9,45
	Δ Фаза, град	205,41	171,7	198,11
3	V_e , мм/с	11,5	6,76	8,66
	Δ Фаза, град	172,5	276	37
7	V_e , мм/с	7,02	5,36	4,93
	Δ Фаза, град	153,9	6,8	246,8
8	V_e , мм/с	8,29	6,93	4,71
	Δ Фаза, град	306	214,6	222
9	V_e , мм/с	17,1	11,4	16,9
	Δ Фаза, град	169,28	180,15	91,7

В таб. 7 занесены полученные данные виброскорости и разности фаз, необходимые нам для анализа технического состояния агрегата. Так по анализу спектра вибрации мы можем сделать следующие заключения:

1. Электродвигатель (левый), состояние агрегата недопустимое. Уровни вибрации значительно превышают норму. Можно сделать вывод о наличии следующего дефекта – несоосность вала между электродвигателем и редуктором (уровень дефекта - сильный).
2. Электродвигатель (правый), состояние агрегата недопустимое. Уровни вибрации значительно превышают норму. Можно сделать вывод о наличии следующего дефекта – несоосность вала между электродвигателем и редуктором (уровень дефекта - сильный).
3. Редуктор, состояние агрегата недопустимое. Уровни вибрации значительно превышают норму. Можно сделать вывод о наличии следующего дефектов - несоосность вала между редуктором и электродвигателем (уровень дефекта - сильный);
- износ подшипников (3, 9) быстроходного вала (уровень дефекта - сильный).

В заключение можно сказать, что состояние агрегата оценивается как недопустимое, эксплуатация без ремонта недопустима.

Проводим анализ по фазовым углам с применением ранее выведенных правил. В первую очередь проверим ЭД на дисбаланс.

Правило 1. Разница фаз в осевом направлении.

Правило	Электродвигатель левый		Электродвигатель правый	
	1	2	7	8
$\Delta O \leq 170$	$225 > 170$	$198,11 > 170$	$246,8 > 170$	$222 > 170$

Правило 2. Разница фаз в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Правило	Электродвигатель левый		Электродвигатель правый	
	1	2	7	8
$\Delta V - \Delta H = 90 \pm 10^\circ$	28,8	33,3	147,1	91,4

По результатам – дисбаланс маловероятен.

Далее проверяем на резонанс.

Правило 1. Разница фаз в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Правило	Электродвигатель левый		Электродвигатель правый		Редуктор	
	1	2	7	8	3	9
$\Delta V = 0$						
$\Delta V = 180 \pm 10^\circ$	215,2	205,41	153,9	306	172,5	169,28
$\Delta H = 0$						
$\Delta H = 180 \pm 10^\circ$	186,4	171,7	6,8	214,6	276	10,15

По результатам – резонанс маловероятен.

Последним идёт анализ агрегата на расцентровку.

Правило 1. Разница фаз в горизонтальном и вертикальном направлениях

Правило	Электродвигатель левый	Редуктор	Электродвигатель правый	Редуктор
	2	3	8	9
$\Delta H \geq 150$	$171,7 > 150$	$276 > 150$	$214,6 > 150$	$180,15 > 150$
$\Delta H \neq \Delta V$	$171,7 \neq 205,41$	$276 \neq 172,5$	$214,6 \neq 306$	$180,15 \neq 169,28$

Можно сделать вывод о наличие следующего дефекта – несоосность вала между электродвигателем и редуктором.

В ходе проведения экспериментов в лабораторных условиях на установке, а так же натурального исследования на приводе подъёма ЭШ 10/70 было установлено, что метод анализа фазовых углов работоспособен и может в полной мере применяться на практике.

6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Календарное планирование на стадиях проведения ВКР имеет своей целью установление взаимосвязанных сроков начала и окончания работ по каждой теме с учётом имеющихся ресурсов. Календарное планирование отдельных конструкторских работ включает определение состава и последовательности этапов этих работ, трудоёмкости, длительности и календарных планов-графиков работ по выполнению каждой темы, определение затрат от использования инноваций.

Задачей экономической части дипломной работы является расчёт продолжительности и стоимости проведения исследовательской работы по теме «Диагностирование дефектов методом анализа фазовых углов в приводах горного оборудования».

Большая сложность и комплексность проведения исследовательских работ, одновременное участие многих исполнителей, необходимость параллельного выполнения работ, зависимость начала многих работ от результатов других, значительно осложняют планирование работы.

Наиболее удобными, в этих условиях, являются системы сетевого планирования и управления (СПУ), основанные на применении сетевых моделей планируемых процессов, допускающих использование современной вычислительной техники, позволяющей быстро определить последствия различных вариантов управляющих воздействий и находить наилучшие из них.

6.1 Расчёт сетевого графика выполнения разделов ВКР:

В рамках сетевого планирования ВКР на тему: «Диагностирование дефектов методом анализа фазовых углов в приводах горного оборудования», был создан перечень работ, приведенный в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень работ по выполнению ВКР

Код работы	Наименование работы	Код события	Наименование события	Продолжительность работы, дни.
0	Подготовка к ВКР	1	Получение задания	1
1-2	Изучение и анализ литературы	2	Задание составлено	1
2-3а	Построение чертежа установки	3а	Чертёж установки создан	1
3а-3б	Создание установки	3б	Установка собрана	9
2-4	Выполнение первого раздела ВКР	4	Выполнил первый раздел ВКР	3
4-5	Выполнение второго раздела ВКР	5	Выполнил второй раздел ВКР	4
5-6	Выполнение третьего раздела ВКР	6	Выполнил третий раздел ВКР	3
6-7	Моделирование дефектов на установке	7	Выполнил моделирование дефектов на установке	6
7-8	Выполнение четвертого раздела ВКР	8	Выполнил четвертый раздел ВКР	4
8-9а	Составление раздела безопасности жизнедеятельности	9а	Раздел безопасность жизнедеятельности составлен	2
8-9б	Составление экономического раздела	9б	Экономический раздел составлен	2
9-10	Составление структуры доклада и наглядного материала	10	Доклад и презентация созданы	1
10-11	Защита диплома	11	Диплом защищён	1

Срок выполнения ВКР не имеет резерва времени. Исходя из этой информации и данных из таблицы 8 строю сетевой график выполнения разделов ВКР.

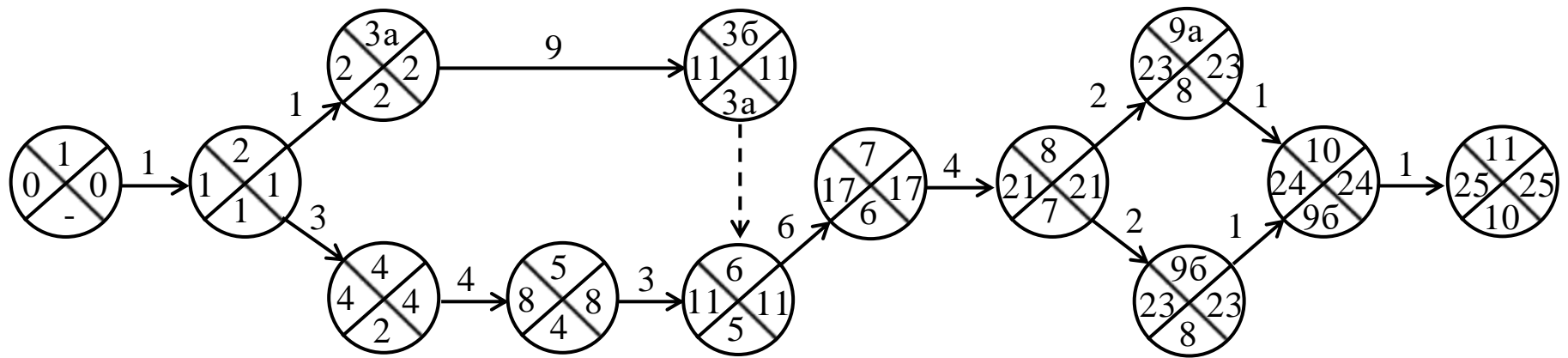


Рисунок 30- Сетевой график выполнения разделов ВКР

Расчёт продолжительности работ и определения срока выполнения ВКР приведён в таблице 9.

Таблица 9 – Расчёт параметров сетевого графика табличным методом

Предшествующие события, i	Последующее событие, j	Продолжительность работы, t_{ij}	Раннее начало работ, $t_{ij}^{рн}$	Раннее окончание работ, $t_{ij}^{ро}$	Позднее начало работ, $t_{ij}^{пн}$	Позднее окончание работ, $t_{ij}^{по}$	Полный резерв времени, $R_{ij}^п$	Частный резерв времени, $Ч_{ij}$
1	2	1	0	1	0	1	0	0
2	3а	1	1	2	1	2	0	0
3а	3б	9	2	11	2	11	0	0
2	4	3	1	4	1	4	0	0
4	5	4	4	8	4	8	0	0
5	6	3	8	11	8	11	0	0
6	7	6	11	17	11	17	0	0
7	8	4	17	21	17	21	0	0
8	9а	2	21	23	21	23	0	0
8	9б	2	21	23	21	23	0	0
9	10	1	23	24	23	24	0	0
10	11	1	24	25	24	25	0	0

Для расчёта полного и частного резервов времени работ используются следующие формулы:

$$R_{ij}^п = t_{ij}^{по} - t_{ij}^{ро} \quad (1)$$

$$Ч_{ij} = t_{ih}^{рн} - t_{ij}^{ро} \quad (2)$$

где $t_{ih}^{рн}$ – раннее начало последующей работы.

Выводы: сетевой график выполнения ВКР имеет пути:

$$l_1 = 1 - 2 - 3а - 3б - 6 - 7 - 8 - 9а - 10 - 11; t_{L1} = 25 \text{ дн.}$$

$$l_2 = 1 - 2 - 4 - 4 - 6 - 7 - 8 - 9б - 10 - 11; t_{L2} = 25 \text{ дн.}$$

Исходя из сетевого графика (рис. 30) можно заметить, что дипломная работа не имеет широких разветвлений по параллельным работам, так как большая часть работ выполняется после достижения положительного результата в ранее идущих работах.

Выполнение ВКР строго линейно и составляет продолжительность в 25 дней. Как можно увидеть из графика большую часть времени занимает создание экспериментальной установки и проведение лабораторных опытов.

6.2 Смета затрат на создание экспериментальной установки

Себестоимость продукции - это стоимостная оценка используемых в процессе производства продукции природных ресурсов, сырья, материалов, топлива, энергии, основных фондов, трудовых ресурсов, а также других затрат на её производство и реализацию [9]. Состав себестоимости регламентируется Постановлением Правительства РФ №552 от 05.08.92 г. с учетом изменений и дополнений №661 от 01.07.95 г. и главой 25 Налогового кодекса РФ:

- материальные затраты (за вычетом стоимости возвратных отходов);
- затраты на оплату труда (все виды оплаты труда и другие выплаты);
- отчисления на социальные нужды;
- амортизация основных фондов;
- прочие денежные затраты.

Общие расходы на выполнение ВКР работы составили.

6.2.1 Расчёт стоимости оборудования и амортизации

Стоимость элементов оборудования и норма амортизации показаны в таблице 10.

Таблица 10 – Стоимость элементов оборудования.

Наименование	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Общая сумма, руб.	Норма амортизации, %	Амортизация оборудования, руб.
Редуктор	1	7689	7689	20	1537,8
Эл.двигатель	1	5832	5832	20	1166,4
Плита	1	2100	2100	20	420
Муфта	1	4230	4230	20	846
Диск	1	2000	2000	20	400
Преобразователь частоты	1	4669	4669	20	933,8
Итого			26521		5304

Амортизация оборудования:

- за год:

$$S_A = C \cdot N_a, \quad (3)$$

где C - стоимость оборудования, $C = 26521$ руб.,

N_a - норма амортизации.

$$S_A = 26521 \cdot 0,2 = 5304 \text{ руб.}$$

- за установленный срок:

$$S_A = \frac{5304}{365} \cdot 25 = 363 \text{ руб}$$

Материальные ресурсы для выполнения работы составили незначительную часть и поэтому не учитывались.

6.2.2 Расходы на оплату труда

В рамках главы проводим расчёт оплаты труда исполнителю, занятому созданием программы, руководителю дипломной работы, консультантам по экономике и БЖД.

Исполнитель - студент СФУ специальности «Горные машины и оборудование» - создание установки было совмещено с учебной программой, а потому, не требовало дополнительной оплаты.

Таблица 11 – Расчёт фонда заработной платы

№ п/п	Категория работающих	Разряд	Часовая тарифная ставка, руб.	Действительный фонд рабочего времени, час.	Списочная численность, чел.	Основная заработная плата, руб.	Общая сумма основной заработной платы с районным коэффициентом
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Руководитель: профессор д.т.н.	16	187	20	1	3740	5984
2	Консультант по экономике: доцент к.э.н.	13	140	5	1	700	1120
3	Консультант по БЖД: доцент к.т.н.	13	140	3	1	700	1120
4	Итого					5140	8224

6.2.3 Расходы на электроэнергию

Приводом установки является асинхронный двигатель АД80Ф2У3 мощностью 1,5 кВт. Затраты энергии при работе установки во время выполнения ВКР 15 дней, по 4 часа равны:

$$1,5 * 15 * 4 = 90 \text{ кВт}$$

Тариф на электроэнергию на 2021г. для промышленных предприятий равен 2,52 руб./кВт.

Стоимость затрат на электроэнергию для выполнения экспериментов, во время ВКР, составила:

$$90 * 2,52 = 226,8 \text{ руб.}$$

Таблица 12 – Смета затрат на выполнение ВКР

№ п/п	Наименование	Затраты, руб.
1	2	3
1	Материальные затраты	26521
2	Затраты на оплату труда	8224
3	Отчисления на социальные нужды	2467
4	Амортизация основных фондов	363
5	Прочие денежные затраты	3757
6	ИТОГО	41332

В результате выполнения экономической части ВКР было произведено календарное планирование с построением сетевого графика и расчётом его параметров. Так же была создана смета затрат на создание экспериментальной установки и просчитаны расходы на оплату труда и затрат на электроэнергию.

Общая сумма затрат на проведение дипломной работы составляет 41.332 руб. Основной статьёй затрат является создание экспериментальной установки (64%) 26.521 руб.

7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Соблюдение правил техники безопасности является главным условием предупреждения производственного травматизма. Самые совершенные условия труда и новейшие технические мероприятия по технике безопасности не смогут дать желаемые результаты, если работник не понимает их назначения. Знание производственных трудовых процессов, применяемого оборудования, приспособлений, инструмента и безопасных способов и приемов в работе создают условия для производительного труда без травматизма.

Большое значение для этого имеют инструктажи по технике безопасности. По характеру и времени проведения они подразделяются на:

- Вводный. Его должны пройти все вновь принятые, командированные, практиканты и другие сотрудники, которые принимаются для постоянной или временной работы;

- Первичный. Проводится перед началом самостоятельной работы;

- Повторный. Сотрудники проходят его не реже одного раза в полгода по программам, разработанным для первичного инструктажа на рабочем месте;

- Внеплановый. Проводится в случае каких-либо изменений, например если появляется новое законодательство об охране труда или изменяются технологические процессы;

- Целевой. Сотрудники должны проходить его, если нужно выполнить разовые работы, ликвидировать аварию, стихийное бедствие или их последствия.

Инструктажи по технике безопасности позволяют ознакомить рабочих с опасными факторами производства, рассказать о средствах защиты от этих факторов, а также ознакомление с безопасными методами работы. Так же за счет инструктажей рабочий получает навыки оказания первой медицинской помощи. В целом инструктажи по технике безопасности предназначены для предупреждения и снижения травматизма на рабочих местах.

Главной целью данного раздела является: защита человека от опасных факторов.

К основным опасным факторам предлагаемой установки относятся:

- вращающиеся части установки;
- опасное воздействие электрического тока.

Требования безопасной эксплуатации электроустановок

- Проектирование, эксплуатация и ремонт электроустановок должны осуществляться в соответствии с действующими нормативными требованиями по безопасной эксплуатации электроустановок.

В электрических схемах должна быть предусмотрена защита потребителей от перегрузок и коротких замыканий.

- На каждом пусковом аппарате должна быть четкая надпись, указывающая включаемую им установку.

- При обслуживании электроустановок необходимо применять электрозащитные средства (диэлектрические перчатки, боты и ковры, указатели напряжения, изолирующие штанги, переносные заземления и др.) и индивидуальные средства защиты.

Защитные средства должны удовлетворять действующим требованиям правил применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках и подвергаться обязательным периодическим электрическим испытаниям в установленные сроки.

Перед каждым применением средств защиты необходимо проверить их исправность, отсутствие внешних повреждений, загрязнений, срок годности по штампу. Пользоваться средствами с истекшим сроком годности запрещается.

- Персонал, допускаемый к работе с электротехническими устройствами, электрифицированным инструментом или соприкасающийся по характеру работы с электроприводом машин и механизмов, должен иметь квалификационную группу по электробезопасности.

Все работники должны быть обучены способам освобождения пострадавших от действия электрического тока, оказания первой помощи пострадавшему от действия электрического тока и других травмирующих факторов.

- Запрещается применять электронагревательные приборы и электрооборудование несерийного изготовления, установка и работа которых не соответствуют действующим правилам и нормам безопасности.

- Перед пуском временно отключенного оборудования его нужно осмотреть, убедиться в готовности к приему напряжения и предупредить работающих на нем персонал о предстоящем включении.

- Запрещается эксплуатация оборудования с неисправными защитами, блокировками, кабелями.

- Запрещается снимать с аппаратов знаки, надписи, пломбы лицам, не имеющим на это права.

- После останова электродвигателя на ремонт с питающего кабеля на щите или сборке должно быть снято напряжение, а на приводе выключателя вывешен плакат: "Не включать! Работают люди!".

Снять плакат: "Не включать! Работают люди!" и включить машину можно только после того, как лицо, выполнявшее работы, сделает в журнале запись об окончании работ, а лицо, принявшее работу, сделает отметку о разрешении на включение электродвигателя.

Пожарная опасность при эксплуатации электрооборудования

Основными причинами возникновения пожаров из-за неправильной эксплуатации электроустановок являются:

- искрение в электрических машинах и аппаратах;
- токи короткого замыкания и электрические перегрузки проводов, вызывающие их недопустимый перегрев;
- электрическая дуга, возникающая между контактами аппаратов в момент их отключения под нагрузкой;

- перегрев обмоток электрических машин и трансформаторов вследствие их перегрузки и междувитковых коротких замыканий;

Противопожарные требования к эксплуатации электроустановок

Запрещается:

- использовать электродвигатели и другое электрооборудование, поверхностный нагрев которого при работе, превышает температуру окружающей среды более чем на 40°С;

- использовать кабели и провода с поврежденной изоляцией, потерявшей в процессе эксплуатации защитные электроизоляционные свойства;

- оставлять под напряжением электрические провода и кабели с неизолированными концами;

- пользоваться поврежденными розетками, распределительными коробками, рубильниками и другими электроустановочными изделиями;

Электропитание устройств, предназначенных для обеспечения безопасности людей (аварийного, пожарного водоснабжения и сигнализации, противоподымовой защиты, оповещения и знаков безопасности) должно осуществляться от независимого источника питания или переключаться на него автоматически при отключении основного источника. Сеть аварийного электроосвещения не должна иметь штепсельных розеток. Дополнительные потребители присоединяют к существующей электросети только при наличии запаса сечения токоведущих жил по токовой нагрузке и с ведома лица, ответственного за состояние электрохозяйства.

Типы проводок и кабелей, способы их прокладки, конструкции распределительных коробок выбирают в зависимости от характера помещений и условий окружающей среды в соответствии с ПУЭ и "Указаниями по выбору и применению установочных электрических проводок".

В распределительных устройствах кабели снабжают бирками с обозначением марки, напряжения, сечения жил, номера или наименования подклю-

ченного потребителя. Электродвигатели, пускорегулирующие и конечные выключатели выбирают в соответствии с требованиями к электроустановкам и условиям окружающей среды.

Требования безопасной эксплуатации вращающихся частей оборудования

- Все вращающиеся части должны быть закрыты глухими кожухами.
- Кожухи должны быть выполнены из прочного материала.
- Защитный кожух должен жестко крепиться к раме или к корпусу оборудования.
- Расстояние от вращающейся части узла до кожуха должно быть не более 10 мм.

Правильно сконструированное и изготовленное ограждение обеспечивает надежную защиту не только работающего, но и окружающих, так как при поломке ограждаемого узла его части не разлетятся в сторону; ограждение защищает работающего и от брызг смазочно-охлаждающих и других жидкостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выпускной квалификационной работы был создан метод диагностирования по анализу фазовых углов.

Первая глава данной работы посвящена разработанной экспериментальной установке. В которой рассмотрены её конструктивные особенности и возможности моделирования дефектов в оборудовании.

Вторая глава посвящена изучению теоретической основы диагностики горного оборудования, возникновению вибраций; средства и способы измерения вибраций.

В третьей главе целью стояло освоение методов моделирования дефектов на экспериментальной установке, а так же изучение основ работы с виброанализатором СД-21.

Четвёртая глава посвящена анализу полученных данных и составлению по ним правил диагностики методом фазовых углов. В ней приведены результаты исследования.

В пятой главе было проведено исследование на ЭШ 10/70, и установлено, что выведенные правила верны и пригодны к использованию.

Вибрационные испытания в условиях эксплуатации являются жизненно важным компонентом программы технического обслуживания, основанной на надёжности. Датчики вибрации, приборы и программное обеспечение способны предоставить ключевую информацию о состоянии машины. Слабым звеном в этой цепочке является способность аналитика интерпретировать данные, точно диагностировать проблему и отслеживать неисправность до тех пор, пока не придет время рекомендовать корректирующие действия.

Анализ по фазовым углам может стать мощным диагностическим инструментом, использование данной методики значительно облегчит работу технического персонала по выявлению дефектов приводов горного оборудования, таких как: дисбаланс; расцентровка; резонанс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ширман А.М., Соловьев А.А. “Практическая вибродиагностика (учебный курс) и мониторинг состояния механического оборудования”.
2. Русов В.А. “Спектральная вибродиагностика”, 1996 г.
3. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И., “Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов”. - М.: Наука, 1984 – 129с.
4. Карасев В.А., Ройтман А.Б., “Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы”. – М.: Машиностроение, 1986 – 192с.
5. Коллакот Р.А., “Диагностирование механического оборудования”. – М.: Судостроение, 1980 – 296с.
6. Гольдин А.С., “Вибрация роторных машин”: - 2-е изд. исправл. - М.:Машиностроение, 2000 - 344 с.
7. Баркова Н.А., Дорошев Ю.С. “Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования”, изд. Изд. ДВГТУ, 2009.
8. Налоговый кодекс РФ. Часть первая: от 31.07.1998 № 146-ФЗ : (ред. от 15.02.2016 N 32-ФЗ, от 05.04.2016 N 101-ФЗ, от 05.04.2016 N 102-ФЗ, от 26.04.2016 N 110-ФЗ).
9. "Методические указания по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на предприятиях цветной металлургии" (утв. Роскомметаллургией 07.12.1993).
10. ГОСТ ИСО 10816-1-97.
11. ГОСТ ИСО 10816-3-2002.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Презентация ВКР

СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт Горного Дела, Геологии и Геотехнологий

«Диагностика дефектов по данным анализа
фазовых углов в при»

Выполнил: студент группы ЗГГ 14-06 Д.В. Ситников

Научный руководитель: доцент д.т.н. А.О. Шигин

Красноярск 2021 г.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В условиях горных предприятий недостаточно развита вибродиагностика приводов машин, а так же существует дефицит специалистов. Поэтому в помощь для эксплуатирующего и обслуживающего персонала была создана методика в значительной степени облегчающая распознавание таких дефектов как:

- дисбаланс;
- расцентровка;
- резонанс.

ОБЩИЙ ВИД УСТАНОВКИ

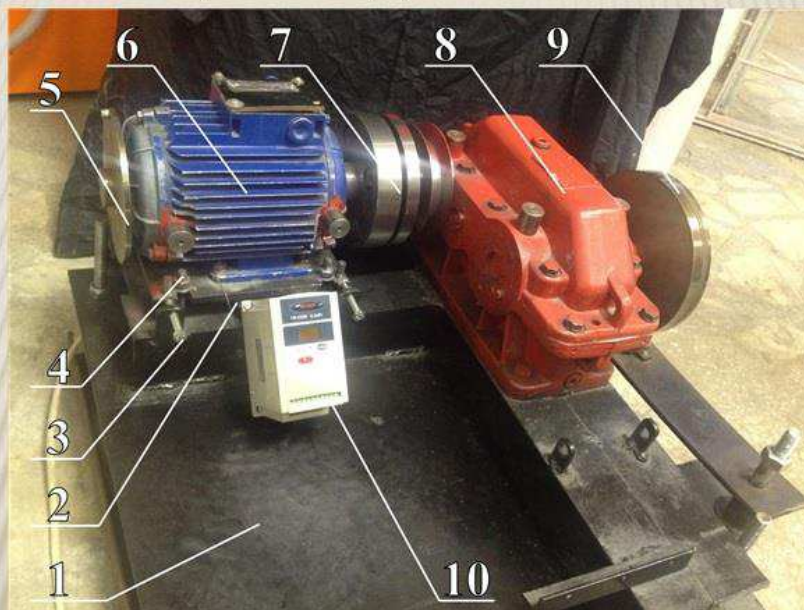


Рисунок 1. Общий вид установки:

- 1 - рама; 2 - подвижная платформа; 3 – горизонтальный регулировочный болт;
4 - вертикальный регулировочный болт; 5 - перфорированный диск; 6 - электродвигатель;
7 - муфта; 8 - редуктор; 9 – нагрузочный диск; 10 – преобразователь частоты.

ВИБРОАНАЛИЗАТОР СД-21



Рисунок 2. Виброанализатор СД - 21 с датчиком вибрации (вибропреобразователем) и датчиком углового положения вала (оборотов)

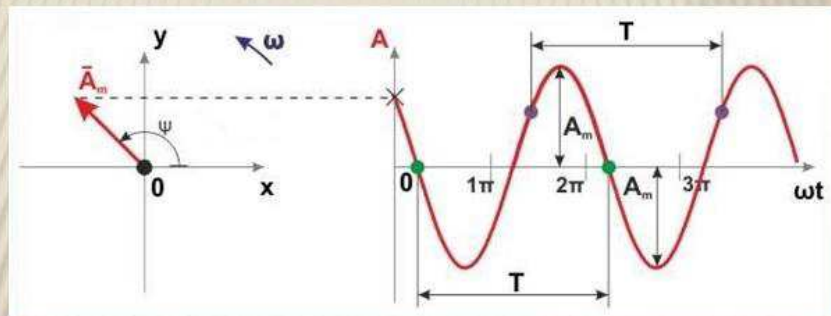
СД-21 двухканальный цифровой измеритель вибрации, анализатор, который позволяет проводить измерения:

- временной сигнал (режим осциллографа);
- уровни вибрации в полосах (предусмотренных ГОСТами, и другими нормативными документами);
- автоспектры;
- скорость вращения;
- амплитуда и фаза сигнала на частоте вращения и ее гармониках и т.д.

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Фаза колебаний — состояние колебательного процесса в определенный момент времени.

В уравнении колебаний фазу определяет аргумент синуса (или косинуса). То есть, в выражении: $a = A_m \sin(\omega t + \psi)$, значение $(\omega t + \psi)$ — и есть фаза синусоидального колебания a . Фаза выражается в угловых единицах — *радианах* или *градусах*.

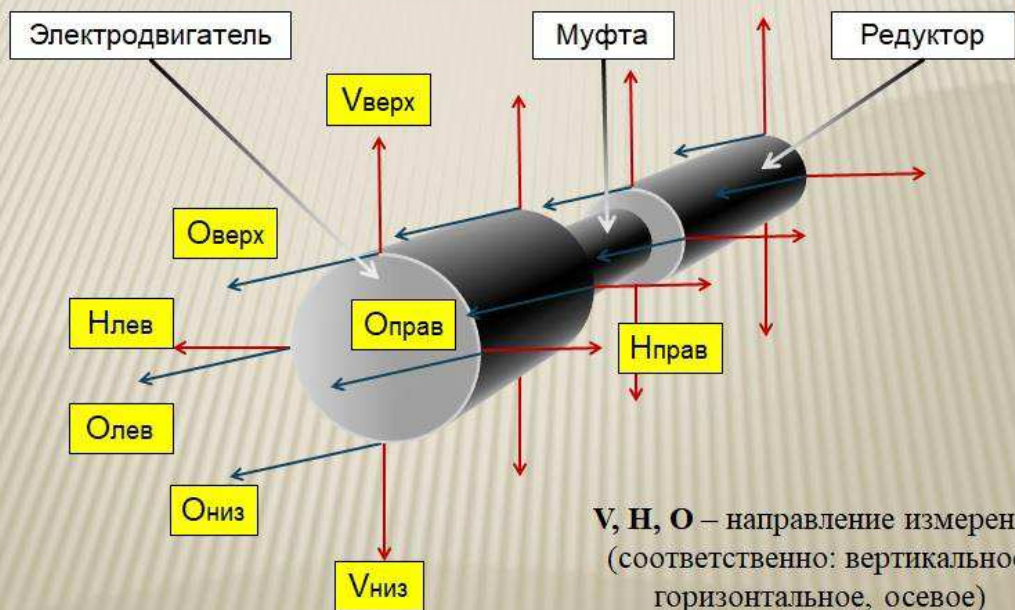


A_m — *амплитуда колебаний* — наибольшее отклонение (от среднего значения) величины, совершающей гармонические колебания.

ω — *угловая частота (круговая частота)* — число полных колебаний, совершающихся при периодическом колебательном процессе за 2π единиц времени.

ψ — *начальная фаза* — представляет собой значение фазы в момент времени $t = 0$, то есть фаза, с которой начинаются колебания.

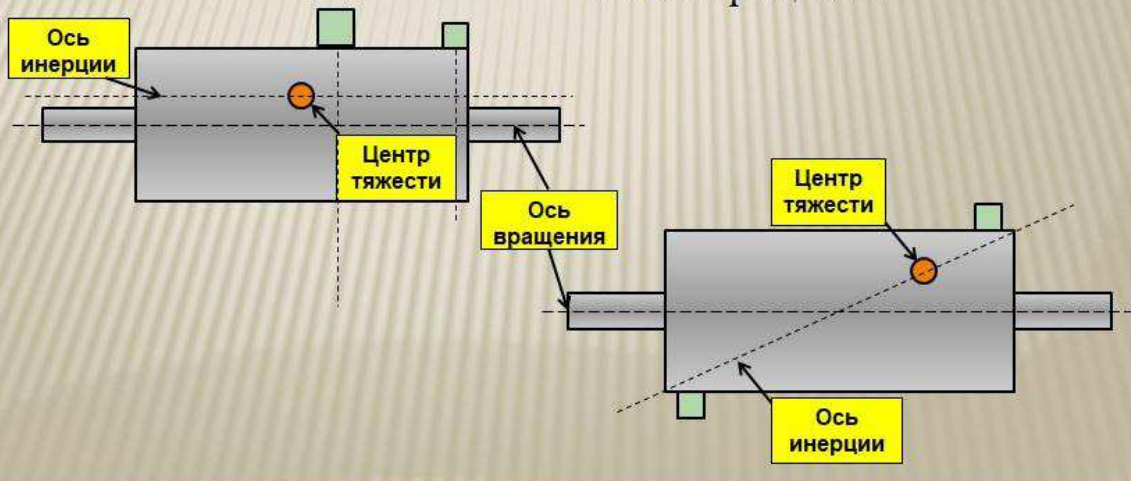
СХЕМА НАПРАВЛЕНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ



СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИСБАЛАНС

Статический дисбаланс возникает, когда основная ось инерции смещена параллельно оси вращения.

Динамический дисбаланс возникает, когда центральная ось инерции не является ни параллельной, ни пересекается с осью вращения.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ДИСБАЛАНСЕ

Направл. оси датчика	Электродвигатель				Редуктор			
	1		2		3		4	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
V _{верх}	36,012	58,5	4,193	111,1	18,364	228,7	42,877	221,3
V _{низ}	24,046	125,7	6,005	250	13,219	33,7	46,505	54,7
ΔV	11,966	67,2	1,812	138,9	5,145	195	3,628	166,6
H _{лев}	14,290	118,2	16,340	70,7	11,325	37,8	12,290	40,9
H _{прав}	13,993	273,9	14,276	311,1	7,896	238	13,578	217,3
ΔH	0,297	155,7	2,064	240,4	3,429	200,2	1,288	135,7
O _{верх}	14,577	285,8	18,116	163,5	35,655	243,5	31,008	61,9
O _{низ}	15,095	134,9	14,099	183,9	18,509	131	12,263	128,9
ΔO _V	0,518	150,9	4,017	20,4	17,146	112,5	18,745	67
O _{лев}	11,555	319,3	14,436	157,7	6,928	315,1	22,497	68,4
O _{прав}	2,851	225,3	17,552	60,6	21,432	226	27,619	219,8
ΔO _H	8,704	94	3,116	97,1	14,504	89,1	5,122	151,4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ДИСБАЛАНСЕ

Направл. оси датчика	Электродвигатель				Редуктор			
	1		2		3		4	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
V _{верх}	56,543	218,4	11,028	158,3	25,869	26,2	53,922	16,8
V _{низ}	23,965	21,7	5,938	357,5	20,751	203,6	58,280	185,2
ΔV	32,578	196,7	5,090	199,2	5,118	177,4	4,358	168,4
H _{лев}	6,764	244,8	12,560	200,1	10,282	206,4	17,780	195,9
H _{прав}	6,973	135,9	10,909	49,2	6,956	35,9	12,254	41,4
ΔH	0,209	108,9	1,651	150,9	3,326	170,5	5,526	154,5
O _{верх}	10,904	88,7	23,765	221,8	45,783	30,8	38,237	197,6
O _{низ}	13,869	185,1	14,908	350,1	30,098	176,1	10,792	295,9
ΔO _γ	2,965	96,4	8,857	128,3	15,685	145,3	27,445	98,3
O _{лев}	8,698	147,4	9,651	307,3	19,284	116,1	15,698	223,8
O _{прав}	14,852	49,2	18,151	216,7	7,970	26,7	10,342	189,3
ΔO _h	6,154	98,2	8,500	90,6	11,314	89,6	5,356	34,5

ПРАВИЛА ДЛЯ ДИСБАЛАНСА

- 1) Разница фаз в осевом направлении не должно превышать контрольного числа 170°.

Правило	Электродвигатель (при статическом дисбалансе)		Электродвигатель (при динамическом дисбалансе)	
	1	2	1	2
$\Delta O_V \leq 170$	$150,9 \leq 170$	$20,4 \leq 170$	$96,4 \leq 170$	$128,3 \leq 170$
$\Delta O_h \leq 170$	$94 \leq 170$	$97,1 \leq 170$	$98,2 \leq 170$	$90,6 \leq 170$

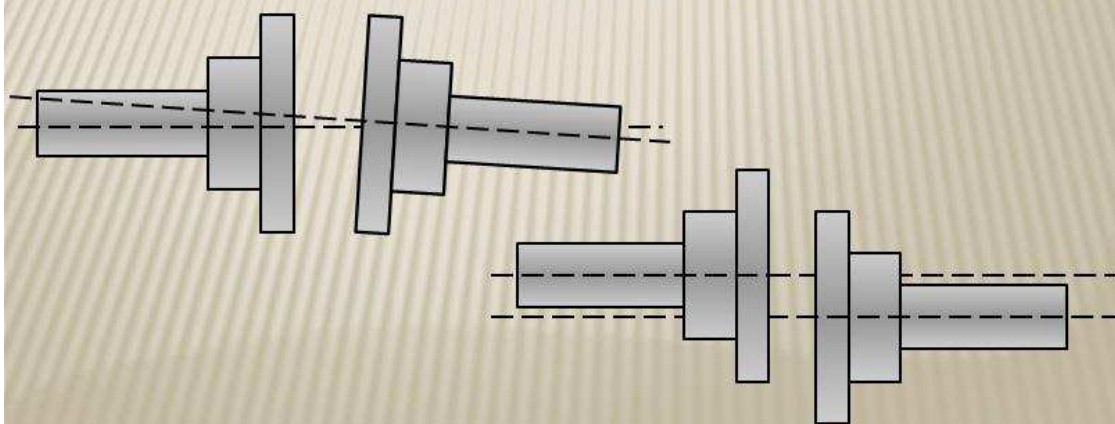
- 2) Если разница между значениями фазы ΔV и ΔH составляет приблизительно 90°, то в агрегате присутствует дисбаланс.

Правило	Электродвигатель (при статическом дисбалансе)		Электродвигатель (при динамическом дисбалансе)	
	1	2	1	2
$\Delta V - \Delta H = 90 \pm 10^\circ$	88,5	101,5	87,8	48,3

РАСЦЕНТРОВКА

Угловая расцентровка - это излом оси в месте сочленения валов на некоторый угол при хорошем совмещении центров валов в районе их торцов.

Параллельная расцентровка валов - это параллельное взаимное смещение осей соседних центрируемых роторов друг относительно друга.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ УГЛОВОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАСЦЕНТРОВКЕ

Направл. осв датчика	Угловая расцентровка				Параллельная расцентровка			
	Электродвигатель		Редуктор		Электродвигатель		Редуктор	
	2	3	2	3	2	3	2	3
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
V _{верх}	3,205	13,1	20,144	7,4	8,479	16,9	22,125	25,9
V _{низ}	5,661	212,6	19,031	189,2	9,512	211,4	25,755	191,6
ΔV	2,456	199,5	1,113	181,8	1,033	194,5	3,630	165,7
H _{лев}	6,611	14,3	8,755	40,3	7,295	200,6	8,367	211,3
H _{прав}	8,216	190,9	7,711	286,8	6,410	27,2	7,978	18,6
ΔH	1,605	176,6	1,044	246,5	0,885	173,4	0,389	192,7

ПРАВИЛО ДЛЯ РАСЦЕНТРОВКИ

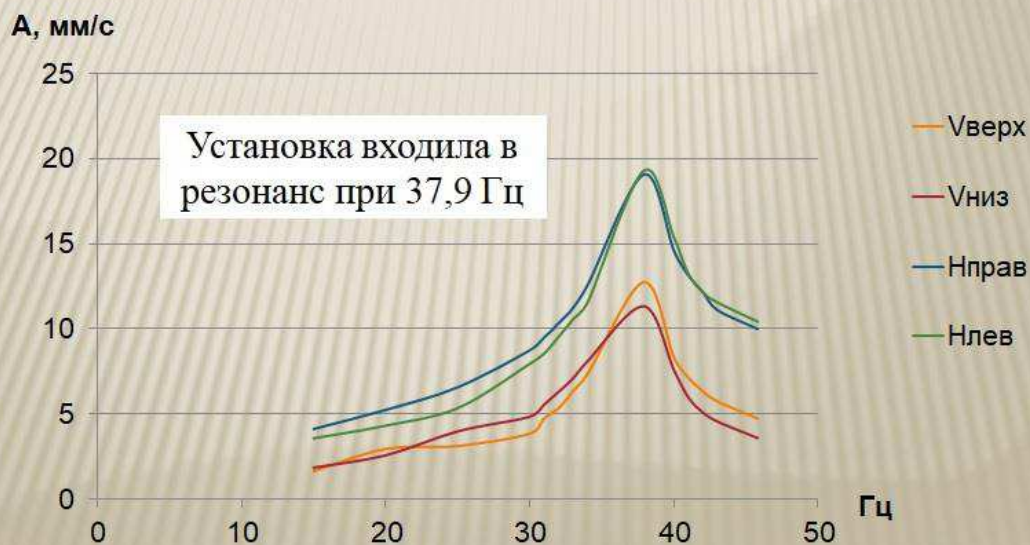
- 1) В этом правиле разница фаз в горизонтальном направлении должна быть больше 150° и не быть равным разнице фаз в вертикальном направлении.

Угловая расцентровка		
Правило	Электродвигатель	Редуктор
	2	3
$\Delta H \geq 150$	$176,6 > 150$	$246,5 > 150$
$\Delta H \neq \Delta V$	$176,6 \neq 199,5$	$246,5 \neq 181,8$

Параллельная расцентровка		
Правило	Электродвигатель	Редуктор
	2	3
$\Delta H \geq 150$	$173,4 > 150$	$192,7 > 150$
$\Delta H \neq \Delta V$	$173,4 \neq 194,5$	$192,7 \neq 165,7$

РЕЗОНАНС

Резонанс — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, которое наступает при совпадении частоты внешнего воздействия с некоторыми значениями, определяемым свойствами системы.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РЕЗОНАНСЕ

Измерения производились при частоте вращения ротора 37,9 Гц

Направл. оси датчика	Электродвигатель		Редуктор	
	2		3	
	Вибрация мм/с	Фаза град	Вибрация мм/с	Фаза град
V _{верх}	12,756	241	18,346	77,7
V _{низ}	11,365	67,5	16,429	259,1
ΔV	1,391	173,5	1,917	181,4
H _{лев}	19,079	70,1	7,813	123,3
H _{прав}	19,304	254,5	20,519	255,5
ΔH	0,225	184,4	12,706	175,8

ПРАВИЛА ПРИ РЕЗОНАНСЕ

- 1) Значения ΔV и ΔH соответственно, разница фаз в вертикальном и горизонтальном направлениях должны быть равны нулю или $180^\circ \pm 10^\circ$.

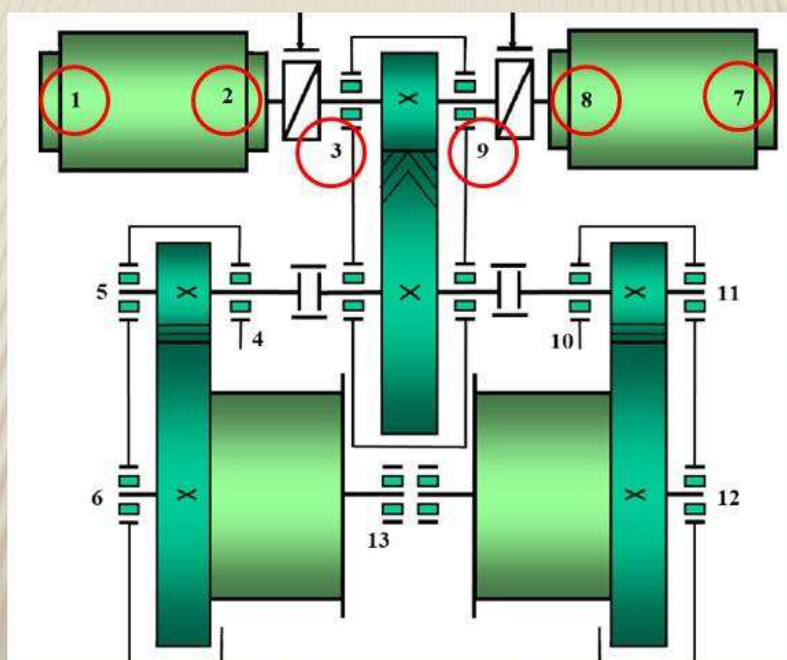
Правило	Электродвигатель	Редуктор
$\Delta V = 0$	173,5	181,4
$\Delta V = 180 \pm 10^\circ$		

Правило	Электродвигатель	Редуктор
$\Delta H = 0$	184,4	175,8
$\Delta H = 180 \pm 10^\circ$		

НАТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭШ 10/70



СХЕМА КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК ПРИВОДА ПОДЪЁМА



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КТ

Контрольные точки измерения	Показатели	Направление оси датчика		
		V	H	O
1	V_e , мм/с	13,7	11,1	11,1
	Δ Фаза, град	215,2	186,4	225
2	V_e , мм/с	10,9	23,9	9,45
	Δ Фаза, град	205,41	171,7	198,11
3	V_e , мм/с	11,5	6,76	8,66
	Δ Фаза, град	172,5	276	37
7	V_e , мм/с	7,02	5,36	4,93
	Δ Фаза, град	153,9	6,8	246,8
8	V_e , мм/с	8,29	6,93	4,71
	Δ Фаза, град	306	214,6	222
9	V_e , мм/с	17,1	11,4	16,9
	Δ Фаза, град	169,28	180,15	91,7

ПРИМЕНЕНИЕ ПРАВИЛ ДИСБАЛАНСА И РЕЗОНАНСА

1) Дисбаланс - маловероятен

Правило	Электродвигатель левый		Электродвигатель правый	
	1	2	7	8
$\Delta O \leq 170$	$225 > 170$	$198,11 > 170$	$246,8 > 170$	$222 > 170$

Правило	Электродвигатель левый		Электродвигатель правый	
	1	2	7	8
$\Delta V - \Delta H = 90 \pm 10^\circ$	28,8	33,3	147,1	91,4

2) Резонанс - маловероятен

Правило	Электродвигатель левый		Электродвигатель правый		Редуктор	
	1	2	7	8	3	9
$\Delta V = 0$						
$\Delta V = 180 \pm 10^\circ$	215,2	205,41	153,9	306	172,5	169,28
$\Delta H = 0$						
$\Delta H = 180 \pm 10^\circ$	186,4	171,7	6,8	214,6	276	10,15

ПРИМЕНЕНИЕ ПРАВИЛА РАСЦЕНТРОВКИ

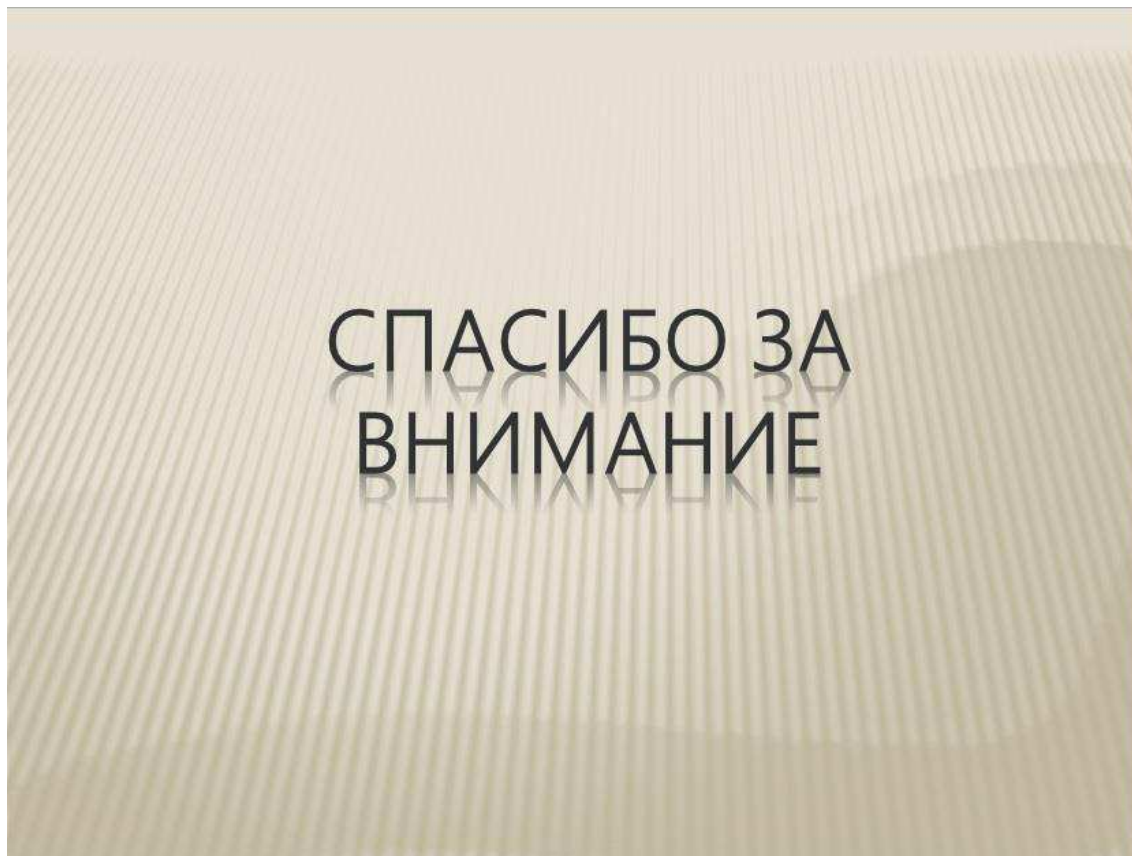
Правило	Электродвигатель левый	Редуктор	Электродвигатель правый	Редуктор
	2	3	8	9
$\Delta H \geq 150$	$171,7 > 150$	$276 > 150$	$214,6 > 150$	$180,15 > 150$
$\Delta H \neq \Delta V$	$171,7 \neq 205,41$	$276 \neq 172,5$	$214,6 \neq 306$	$180,15 \neq 169,28$

Можно сделать вывод о наличие следующего дефекта:
– расцентровка вала между электродвигателем и редуктором.

ВЫВОД:

В ходе проведения экспериментов на установке в лабораторных условиях, а так же натурального исследования на приводе подъёма ЭШ 10/70 было установлено, что метод анализа фазовых углов работоспособен и может в полной мере применяться на практике, для облегчения диагностирования дефектов в приводах горного оборудования.

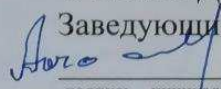
Окончание приложения А



Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Горного дела, геологии и геотехнологий
институт
Горные машины и комплексы
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

 Заведующий кафедрой
А.С. Морин
подпись инициалы, фамилия
« 29 » 01 2021 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА


21.05.04.09 «Горные машины и оборудование»

код и наименование специальности

«Диагностирование дефектов по данным анализа фазовых углов

тема

в приводах горного оборудования»

Руководитель  25.01.21 профессор, д.т.н.
подпись дата должность, ученая степень

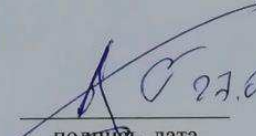
А.О. Шигин
инициалы, фамилия

Выпускник  25.01.21
подпись дата

Д.В. Ситников
инициалы, фамилия

Консультанты:

Безопасность жизнедеятельности
и охрана труда
наименование раздела

 27.01.21
подпись, дата

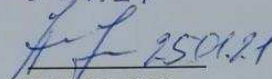
А.В. Галайко
инициалы, фамилия

Экономическая часть
наименование раздела

Бурменко
подпись, дата
29.01.21

Р.Р. Бурменко
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

 25.01.21
подпись, дата

А.О. Шигин
инициалы, фамилия

Красноярск 2021