

Методика вибрационного обследования силовых трансформаторов

1. Введение

1.1 Настоящая методика распространяется на вибрационную диагностику активной части и маслонасосов силовых трансформаторов напряжением 35 кВ и выше в процессе эксплуатации под рабочим напряжением, а также в отключенном состоянии. Приводятся принципы вибрационной диагностики силовых трансформаторов, средства и методы вибрационного контроля и анализ результатов диагностики. Вибрационное обследование проводится на баке и корпусах маслонасосов силового трансформатора. Цель обследования – определение состояния прессовки обмоток и магнитопровода, общего состояния крепления конструкции трансформатора, а также определение состояния подшипников маслонасосов для предотвращения аварийных ситуаций и проведения своевременных ремонтов.

Методика определяет минимальный объем диагностических испытаний. Допускается увеличивать объем измерений, а также расширять объем анализа (с целью, например, совершенствования данной методики), что должно оговариваться в программе испытаний.

1.2. Методика устанавливает метод и средства диагностики, меры безопасности при проведении работ, порядок проведения работ, формулировку заключения о выявленных дефектах. Проведение вибрационной диагностики должно производиться лицами, имеющими специальную подготовку, ознакомленными с конструкцией и принципом работы используемых приборов и имеющими соответствующий допуск по технике безопасности. При работе необходимо соблюдать “Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок”, “Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей”.

1.3. Вибрационное обследование трансформаторов позволяет оперативно оценить текущее техническое состояние активной части трансформатора (без вскрытия бака), а также маслонасосов, определить причины повышенной вибрации и, что особенно важно, своевременно выявить тенденции ухудшения технического состояния, как всего трансформатора, так и отдельных фаз обмотки и сердечника.

Существует несколько методов вибрационной диагностики технического состояния активной части трансформатора:

- Измерение уровня вибрации на стенке бака трансформатора
- Спектральный метод вибродиагностики
- Частотный метод контроля уровня прессовки обмоток

Измерение уровня вибрации на стенке бака трансформатора и спектральный метод вибродиагностики применяются на работающем трансформаторе. Частотный метод контроля применяется на отключенном и расшинуванном трансформаторе.

2. Правила безопасности

2.1. Все работы по вибрационной диагностике силовых трансформаторов проводятся по наряду в соответствии “Межотраслевыми правилами по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок”. Датчики должны устанавливаться только на заземленные части оборудования.

2.2. К работе с приборами для измерения и анализа вибрации допускается специально обученный персонал. Вибрационное обследование силового трансформатора проводится бригадой из двух и более человек, один из которых имеет группу допуска по технике безопасности не ниже четвертой. При работе с приборами для измерения вибрации запрещается подносить датчики к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на расстояние менее допустимого для этого класса напряжения.

2.3. Установка датчиков на бак силового трансформатора и корпус маслонасоса производится в соответствии с п.п.3-6.

3. Измерение уровня вибрации на стенке бака трансформатора

3.1. Описание физических процессов

Вибрация – механические колебания контролируемой точки агрегата относительно среднего, нейтрального положения. Вибрация свойственна всем работающим механизмам. Вибрация – один из наиболее информативных и обобщенных параметров, который может быть применен для “безразборной” оценки текущего технического состояния оборудования, для диагностики причин повышенной вибрации.

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

С физической точки зрения вибрация на поверхности бака мощного трансформатора качественно и количественно хорошо коррелируется с состоянием прессовки обмотки и магнитопровода. Изменение степени прессовки в процессе эксплуатации приводит к изменению общей вибрационной картины, усилению вибрации, изменению ее частоты, появлению модулированных колебаний. С этими изменениями достаточно часто сталкиваются работники эксплуатационных служб, выполняющие осмотры работающих трансформаторов.

На практике достаточно часто техническое состояние активной части трансформатора контролируется следующими вибрационными характеристиками: виброускорение, виброскорость и виброперемещение.

Для количественного описания вибросигналов наиболее широко используются виброперемещение и виброскорость.

Виброперемещение показывает максимальные границы перемещения контролируемой точки и характеризуется обычно двойной амплитудой и показывает перемещение от одного крайнего положения до другого, противоположного. Измеряется в “мкм”.

Виброскорость показывает максимальную скорость перемещения контролируемой точки в процессе ее прецессии. Измеряется в “мм/с”. В практике измеряется обычно не максимальное значение виброскорости, а ее среднеквадратичное значение СКЗ.

Виброускорение характеризует то силовое воздействие в агрегате, которое вызвало данную вибрацию. Измеряется в “м/с²”.

При измерениях виброускорения, виброскорости и виброперемещения используются переносные спектроанализаторы, регистрирующие сигнал с вибродатчика. Эти приборы достаточно легки, имеют вес менее 3 кг, оснащены вибродатчиками с магнитным креплением.

3.2. Условия проведения измерений

Измерение уровня вибрации на стенке бака трансформатора обычно проводится в двух режимах работы оборудования: в режиме холостого хода и в режиме нагрузки.

Рабочими условиями эксплуатации переносных спектроанализаторов обычно являются:

- температура окружающего воздуха от - 20 до + 60 °С;
- относительная влажность до 90 %;
- атмосферное давление от 630 до 800 мм. рт. ст.

3.3. Подготовительные операции

Для однозначного определения точек замера и последовательности проведения в них замеров вибрации принимаются несколько допущений.

Сторона, на которой расположены изоляторы наибольшего напряжения, стороной высокого напряжения. Ее далее везде в расчетах и измерениях называют стороной ВН.

Сторона, на которой расположены изоляторы наименьшего напряжения, стороной низкого напряжения, которую далее везде в расчетах и измерениях называют стороной НН.

Считается, если смотреть на трансформатор со стороны ВН, левую фазу "Фаза А", а правую - "Фазой С". Средняя фаза - "Фаза В". При "взгляде" на трансформатор со стороны НН фазы "А" и "С" поменяются местами.

Производится разметка бака трансформатора, при этом поверхность по высоте делится на несколько уровней. Уровень с меньшим порядковым номером находится в нижней части бака, уровень с большим порядковым номером – непосредственно под крышкой бака (или колокола бака) трансформатора. По периметру бак трансформатора разбивается на сектора, привязка которых осуществляется к ребрам жесткости. Отсчет номеров секторов удобно проводить от левого сектора на стороне ВН трансформатора (фаза А) в сторону фазы С и далее против часовой стрелки.

Перед проведением работ по вибрационному обследованию следует убедиться в работоспособности применяемых приборов, соединительных проводов и датчиков.

3.4. Порядок проведения измерений и обработка результатов

Для измерения вибрации используется переносной виброанализатор в режиме измерения виброускорений, виброскоростей или среднеквадратичных значений виброперемещений.

При обследовании датчик последовательно устанавливается в каждом секторе, и снимаются показания прибора.

Результаты вибрационного обследования сводятся в таблицу (табл.3.1). По значениям в таблице строится эпюра среднеквадратичных значений виброперемещений поверхности бака (рис.3.1). В табл.3.1 и на рис.3.1 в качестве примера приведены результаты вибрационного обследования шунтирующего реактора.

Зоны (см. табл. 3.1) в которых обнаружено превышение предельно допустимых значений выделяются цветом.

Таблица 3.1

Среднеквадратичное значение (СКЗ) виброперемещения

Сектор	СКЗ виброперемещения на уровне по высоте, мкм				
	I	II	III	IV	V
1	13	71	59	58	26
2	14	116	81	59	31
3	-	167	95	67	21
4	18	83	26	132	53
5	24	43	37	73	60
6	23	93	73	58	19
7	20	62	87	41	37
8	17	87	75	46	20
9	22	53	43	55	45
10	31	44	78	70	27
11	32	50	81	77	19
12	14	110	100	31	21
13	22	34	52	49	32
14	24	29	56	55	23
15	36	48	20	27	24
16	7	32	26	24	39
17	8	68	47	24	43
18	12	56	21	23	15
Предельно допустимое значение	60				

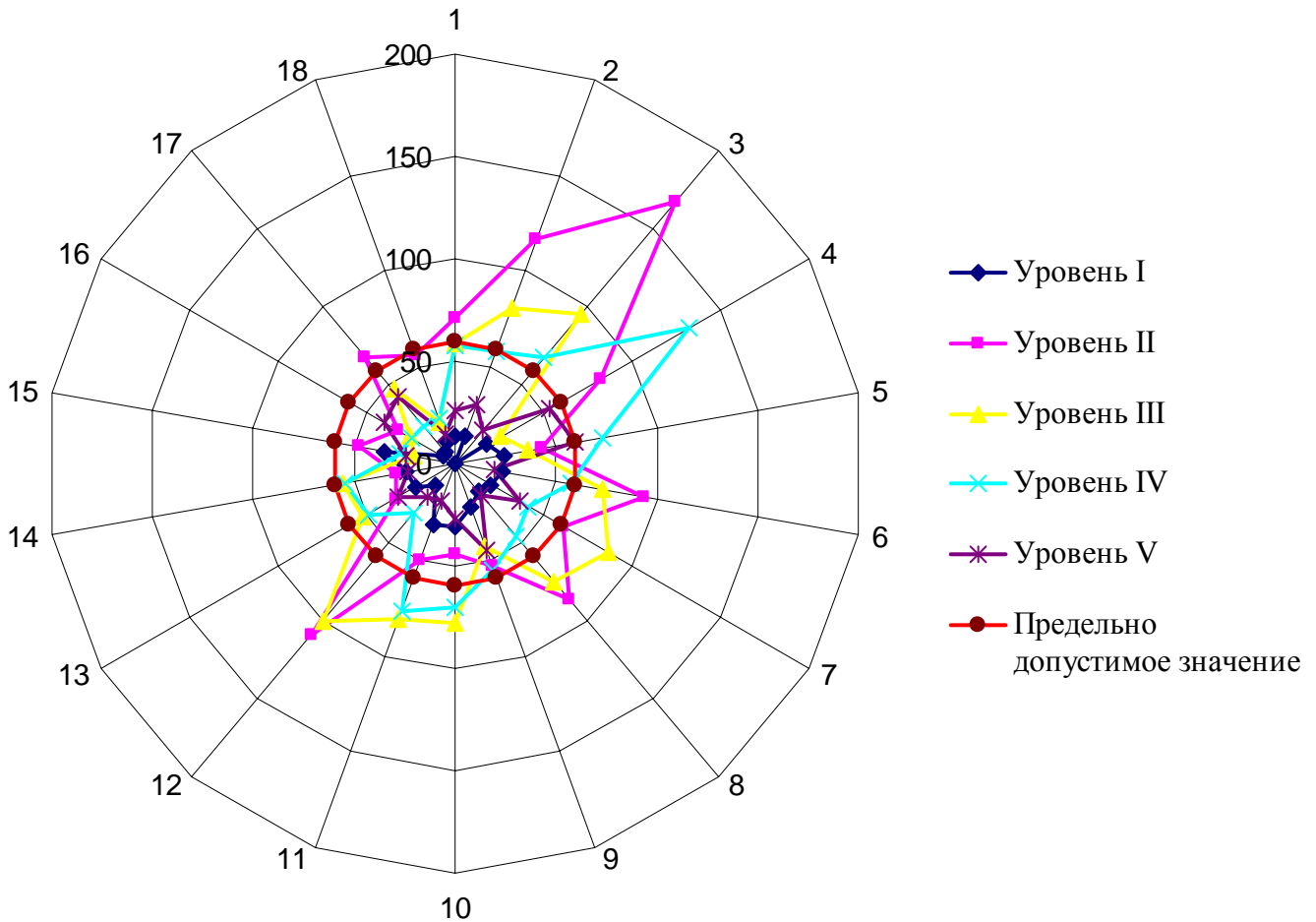


Рис. 3.1. Эпюры среднеквадратичного значения виброперемещений поверхности бака реактора

3.5. Анализ полученных результатов

Результаты, полученные при вибрационном обследовании трансформатора, сравниваются между собой, а также с результатами предыдущих измерений. Для реакторов также производится сравнение с предельно допустимыми значениями.

Согласно [1] для реакторов предельно допустимое значение виброперемещения стенки бака составляет 60 мкм, а системы охлаждения - 85 мкм.

Для трансформаторов не существует нормируемых значений по вибрации. Однако существует опыт накопленный некоторыми организациями который можно использовать при выдаче результатов вибрационного обследования. Так по опыту НИЦ “ЗТЗ-Сервис” нормально работающий трансформатор характеризуется следующими значениями вибрационных параметров:

- ускорение – ниже 10 м/с^2 ;
- виброскорость – ниже 10 мм/с ;
- виброперемещение – 100 мкм .

Данные ряда организаций показывают, что уровень виброскорости ниже $6 \dots 10 \text{ мм/с}$ может быть использован как некий барометр отсутствия ослабления пресовки обмоток и магнитопровода.

4. Спектральный метод вибродиагностики

4.1. Описание физических процессов

Большинство встречающихся в практике вибросигналов по своей внешней форме обычно являются очень сложными и, наряду с полезной для диагностики информацией, несут много бесполезной, шумовой.

При спектральном методе вибродиагностики с целью компенсации уменьшения объема исходной информации исходный вибросигнал преобразуется из временной области в частотную, где представляется совокупностью гармоник, различающихся частотой и амплитудой.

Спектры вибросигналов, зарегистрированных на поверхности бака трансформатора, имеют в своем составе от двух до 7 - 10 информативных гармоник. Наиболее информативная часть спектров находится в диапазоне от 100 до 700 Гц.

В зоне частот, меньших 100 Гц, сосредоточены в основном вибрации, вызванные вентиляторами системы охлаждения и маслонасосами. Здесь же обычно расположено несколько резонансных пиков с частотами собственного резонанса элементов конструкции бака. Информативность этой зоны для диагностики состояния прессовки обмотки и магнитопровода мала. Более высокочастотные колебания, выше 700 Гц, сильно затухают в масле. Полезной для диагностики информации в этой зоне, как и в низкочастотной, практически нет.

Теоретический, идеальный, спектр виброскорости, зарегистрированный на поверхности бака трансформатора, находящегося в хорошем состоянии, должен содержать в себе только три спектральных пика. Первый, пик, имеющий частоту 100 Гц, присутствует всегда и есть результат действия электромагнитных сил, вызван эффектами магнитострикции в магнитопроводе и электродинамическими процессами в обмотке, пропорционален удвоенной частоте сети. Два других являются третьей и пятой гармоникой основного сигнала и имеют частоты 300 и 500 Гц. Они появляются в спектре вследствие влияния насыщения ферромагнитного сердечника трансформатора. У трансформатора, активные материалы которого запрессованы идеально, других гармоник, в принципе, быть не должно.

У реального трансформатора картина на спектре вибрации совершенно иная. Обычно имеют место гармоники в диапазоне частот до седьмой (700 Гц) и соотношение амплитуд этих гармоник, на первый взгляд, не поддается систематизации. У одного и того же трансформатора с трудом удастся найти хотя бы две точки с примерно одинаковой спектральной картиной. Здесь сказываются различия между трансформаторами, различная жесткость корпуса бака в местах измерения, разница сторон ВН и НН, разница внутренней и внешней фазы сердечника, наличие РПН и т. д.

Еще более сложной становится картина при попытке сравнить замеры вибрации в одной и той же точке под нагрузкой и на холостом ходу. "Вибрационной" особенностью трансформатора является то, что при переходе от холостого хода к режиму нагрузки общий уровень вибрации бака трансформатора обычно значительно уменьшается, до 40 %.

Проведенные исследования на реальных трансформаторах выявили много специфических особенностей физических процессов в трансформаторе, зависящих от типа трансформатора, конструкции, мощности и даже завода-изготовителя. Картина во многом была усложнена проведением измерений не на интересующем элементе трансформатора, а на значительном удалении от него, на корпусе бака, сигнал на котором ослаблен слоем масла.

Одновременный сравнительный анализ спектров вибросигналов и автоматическое формирование отчета производится с помощью современной компьютерной экспертной системы.

При спектральной вибродиагностике силовых трансформаторов используются переносные спектроанализаторы, регистрирующие сигнал с вибродатчика и разлагающего его на составные гармоники. Эти приборы достаточно легки, имеют вес менее 3 кг, оснащены вибродатчиками с магнитным креплением.

4.2. Условия проведения измерений

Спектральная вибродиагностика проводится в двух режимах работы оборудования: в режиме холостого хода и в режиме нагрузки.

Рабочими условиями эксплуатации переносных спектроанализаторов обычно являются:

- температура окружающего воздуха от - 20 до + 60 °С;
- относительная влажность до 90 %;
- атмосферное давление от 630 до 800 мм. рт. ст.

4.3. Подготовительные операции

Для однозначного определения точек замера и последовательности проведения в них замеров вибрации принимаются несколько допущений.

Сторона, на которой расположены изоляторы наибольшего напряжения, стороной высокого напряжения. Ее далее везде в расчетах и измерениях называют стороной ВН.

Сторона, на которой расположены изоляторы наименьшего напряжения, стороной низкого напряжения, которую далее везде в расчетах и измерениях называют стороной НН.

Считается, если смотреть на трансформатор со стороны ВН, левую фазу "Фаза А", а правую - "Фазой С". Средняя фаза - "Фаза В". При "взгляде" на трансформатор со стороны НН фазы "А" и "С" поменяются местами.

Место установки датчика на корпусе бака выбираются так, чтобы они "акустически захватывали" часть обмотки и сердечника. Это место соответствует верхнему или нижнему краю обмотки, на рис. 4.1 оно показано точками. В таком случае вибродатчик будет воспринимать сигналы от обмотки и от магнитопровода. Разное расстояние от источника вибрации, обмотки или магнитопровода, до поверхности бака в программе учитывается коэффициентами ослабления. Чем точнее это место будет выбрано на внешней поверхности бака - тем выше будет достоверность диагнозов программы. Очень важным является повторяемость результатов, поэтому желательно отметить в самом начале работ эти места, например мелом.

Для правильного выбора точек проведения измерения вибрации необходимо до проведения измерений вибраций познакомиться с технической документацией на трансформатор. Это является условием для правильной установки вибродатчиков на баке трансформатора.

На рис.4.1 цифрами показаны точки установки датчиков на баке трехфазного трехстержневого трансформатора. Для трехфазных пятистержневых трансформаторов и однофазных трехстержневых дополнительно устанавливаются датчики на свободные боковые ярма.

Перед проведением работ по вибрационному обследованию следует убедиться в работоспособности применяемых приборов, соединительных проводов и датчиков.

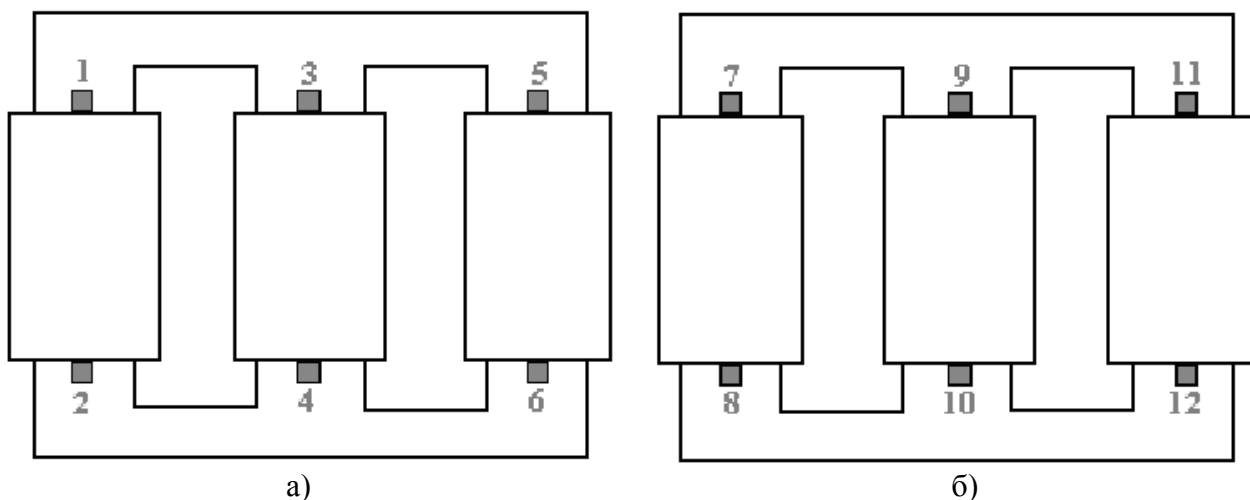


Рис. 4.1. Эскиз активной части трансформатора со стороны ВН (а) и стороны НН (б)

4.4. Порядок проведения измерений и обработки результатов

Наилучшие результаты измерений можно ожидать при одновременной записи сигналов во всех точках (рис.4.1). Однако такие измерения требуют достаточно дорогостоящих и сложных приборов. Поэтому на практике используют последовательную установку одного датчика. На рис. 4.1 номера рядом с квадратами указывают последовательность проведения замеров вибрации со стороны вводов ВН и НН трансформатора при измерениях вибраций одним датчиком, и использовании для обработки результатов экспертной системы “ВЕСТА” [3].

Условно можно сказать, что при проведении измерений трансформатор обходится, глядя на него сверху, против часовой стрелки, начиная с левой части стороны ВН. Для каждой фазы замер сначала делается сверху, затем в нижней части.

При установке датчика следует придерживаться следующих правил:

- Датчик должен иметь надежный контакт с поверхностью объекта измерений. Перед установкой датчика необходимо очистить поверхность бака и удалить возможные загрязнения (масло, стружку и т.п.). Желательно произвести смазку поверхности датчика смазкой типа Литол-24.
- При проведении измерений датчик и соединительный кабель должны быть неподвижны.

Производится запись сигналов зарегистрированных вибродатчиком в спектроанализатор в каждой из размеченных точек. Измерения выполняются в режимах нагрузки и холостого хода.

После записи полного цикла замеров вибрации в память виброанализатора эта информация переписывалась в компьютер, где производился ее анализ с помощью экспертной системы, например “ВЕСТА” [3].

Экспертная система “ВЕСТА” представляет результаты вибрационного обследования в табличной форме (табл.4.1), а также имеется возможность просмотра вибросигналов в каждой точке измерения (рис. 4.2). Кроме того, программа выдает отчетный документ о техническом состоянии системы прессовки элементов трансформатора. Образец такого заключения представлен в табл. 4.2 – 4.4 и на рис. 4.3 – 4.4.

Таблица 4.1

Среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости в точках замера

Сторона трансформатора	Точки	СКЗ виброскорости в точках замера, мм/с					
		А		В		С	
		XX	PH	XX	PH	XX	PH
ВН	Верхняя	5,80	11,25	3,6	3,37	3,0	2,77
	Нижняя	1,20	1,43	7,8	2,45	2,2	1,75
НН	Верхняя	2,66	2,36	3,3	6,11	1,3	1,12
	Нижняя	1,40	1,72	3,1	3,28	2,3	1,97

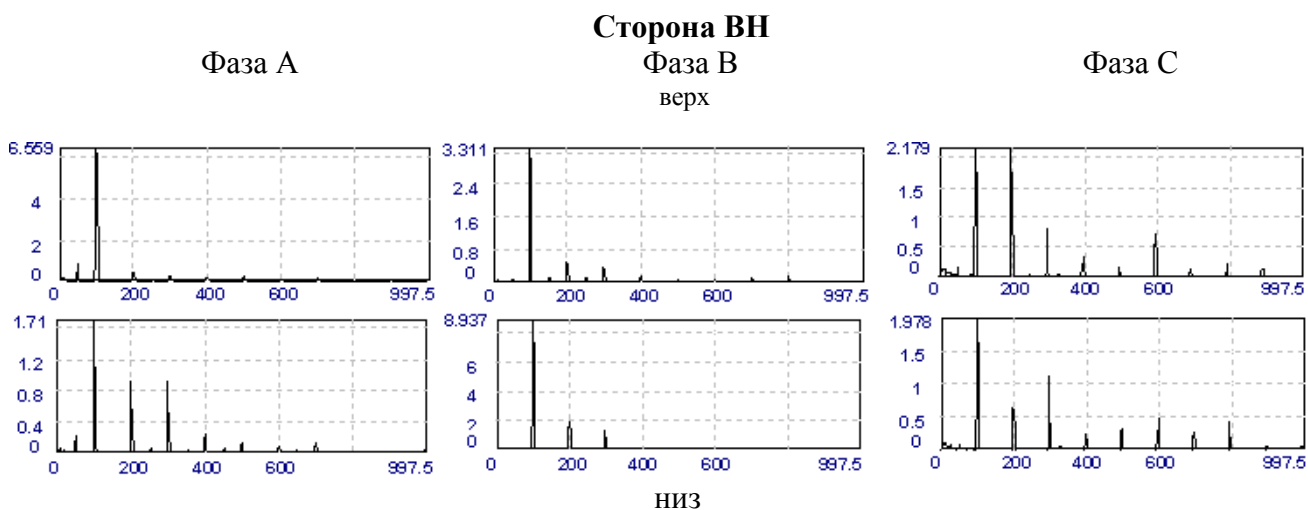


Рис. 4.2. Спектры виброскоростей (мм/с), полученные при измерениях на поверхности бака со стороны ВН при обследовании в режиме холостого хода

Таблица 4.2

Коэффициенты прессовки обмоток трансформатора

Сторона трансформатора	Точки	Коэффициент прессовки обмоток в фазе		
		А	В	С
ВН	Верхняя	0,93	0,96	0,88
	Нижняя	0,91	0,93	0,88
НН	Верхняя	0,94	0,94	0,88
	Нижняя	0,94	0,95	0,88

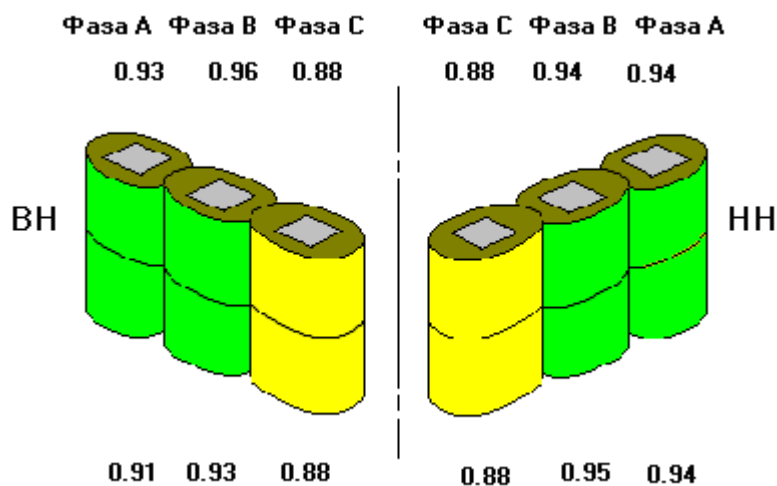


Рис. 4.3. Состояние прессовки обмоток трансформатора

Таблица 4.3

Коэффициенты прессовки магнитопровода трансформатора

Сторона трансформатора	Точки	Коэффициент прессовки магнитопровода в фазе		
		А	В	С
ВН	Верхняя	0,89	0,97	0,89
	Нижняя	0,88	0,97	0,92
НН	Верхняя	0,89	0,95	0,88
	Нижняя	0,86	0,97	0,95

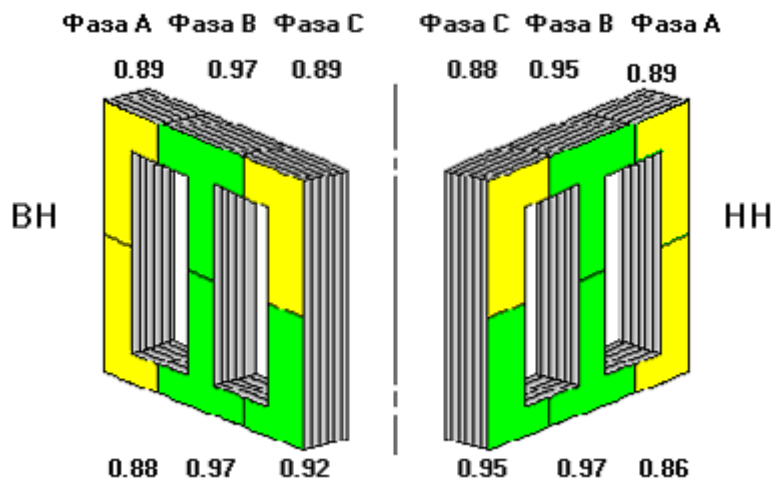


Рис. 4.4. Состояние прессовки магнитопровода трансформатора

Таблица 5.4

Коэффициенты общего крепления конструкции трансформатора

Сторона трансформатора	Точки	Коэффициент общего крепления конструкции в зоне стержня		
		А	В	С
ВН	Верхняя	0,91	0,96	0,88
	Нижняя	0,90	0,95	0,90
НН	Верхняя	0,87	0,95	0,89
	Нижняя	0,83	0,96	0,95

4.5. Заключение о выявленных дефектах и анализ полученных результатов

По результатам вибрационного обследования трансформатора программа выдает относительные коэффициенты качества прессовки элементов трансформатора. Все эти коэффициенты рассчитываются как для всего трансформатора, так и для каждой фазы и для любой контролируемой точки.

Для всех коэффициентов заложен следующий качественный принцип – чем больше коэффициент отличается в меньшую сторону от единицы, тем хуже состояние. Максимальное значение коэффициента – единица, соответствующая идеальному состоянию данного параметра.

Количественно приняты следующие усредненные диапазоны технического состояния качества прессовки элементов трансформатора:

- От 1,0 до 0,9 – зона хорошего состояния контролируемого параметра. Это зона нормальной эксплуатации трансформаторов.
- От 0,9 до 0,8 – зона удовлетворительного состояния контролируемого параметра. Это зона “тревожного” состояния трансформатора. В этой зоне очень важным является выявление тенденций изменения общего состояния в “худшую” сторону, что является очень тревожным параметром. Уменьшение коэффициента общего состояния трансформатора в меньшую сторону говорит об интенсивном ухудшении состояния.
- От 0,8 и менее – зона неудовлетворительного состояния контролируемого параметра. При таком значении параметров трансформатора, особенно при их периодическом “ухудшении” (уменьшении), следует принимать решение, как минимум об усиленном контроле всеми средствами, а лучше о проведении регламентных и ремонтных работ.

При анализе полученных результатов необходимо учитывать, что спектральный метод вибрационной диагностики обладает методической погрешностью. В определенной степени полученные результаты носят качественный характер.

5. Частотный метод контроля

5.1. Описание физических процессов

Методика частотного метода контроля базируется на определении частотных характеристик активной части трансформатора по ее вибрационной реакции на импульсное механическое воздействие небольшого уровня 3...5 кДж. Импульсное механическое воздействие осуществляется по наиболее жесткой части корпуса трансформатора и исключает любые повреждения конструкции.

Определение усилия прессовки производится по изменению частоты (частот) колебаний механической системы прессовки обмоток. При уменьшении усилия прессования происходит смещение частоты максимума спектральной плотности (ЧМСП) в область низких частот, а при увеличении усилия прессования, смещение ЧМСП в область более высоких частот.

Колебания системы прессовки обмоток оцениваются на основании измерений временных реализаций процессов напряжения, наведенного в обмотках, при импульсном механическом воздействии.

Появление напряжения на вводах трансформатора является следствием изменения градиента напряженности магнитного поля остаточной намагниченности активной части при распространении по ней волн механических напряжений, вызванных импульсным механическим воздействием. Часто это физическое явление называют пьезомагнетизмом. Спектральный состав напряжения, наведенного в обмотках, характеризует спектральный состав колебаний активной части трансформатора.

5.2. Условия проведения измерений

Все работы по определению усилия прессовки обмоток частотным методом контроля проводятся на отключенном и расхинованном трансформаторе.

5.3. Подготовительные операции

На вводы предварительно расхинованного трансформатора производится установка необходимых датчиков.

5.4. Порядок проведения измерений

Оценка остаточных усилий прессовки обмоток трансформатора проводится при помощи диагностического комплекса ДИК - 2С.

Осуществляется нагружение трансформатора импульсными механическими воздействиями (ударами) с одновременной регистрацией напряжения наведенного в обмотках. Сигналы напряжения, наведенные в обмотках трансформатора, подвергаются обработке с целью получения оценок спектральных плотностей мощности (СПМ). Оценка СПМ напряжения, наведенного в обмотке трансформатора производится на основе модели авторегрессии скользящего среднего (АРСС) (рис.5.1).

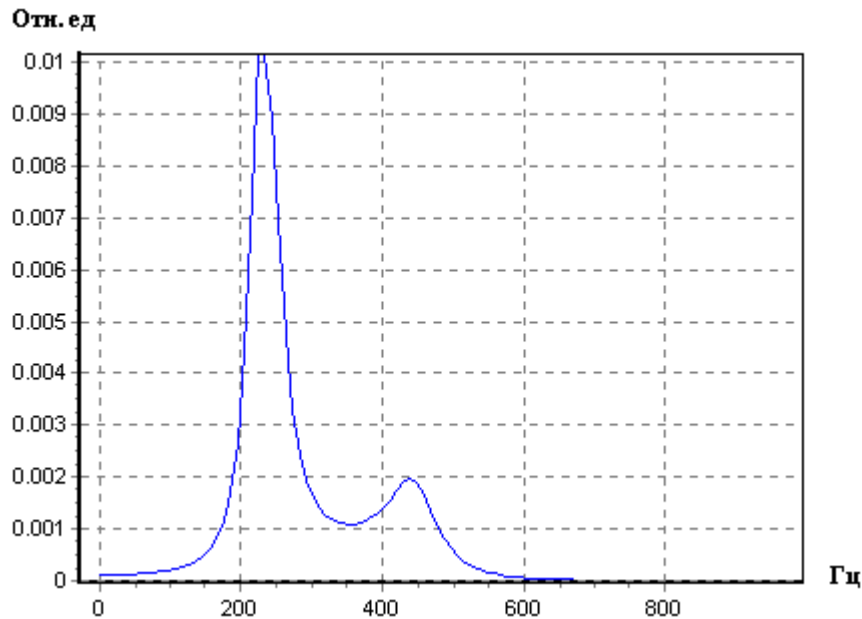


Рис. 5.1. АРСС-модель оценки СПМ напряжения, наведенного в обмотке ВН.

Согласно «Методики диагностики усилия прессовки обмоток трансформаторов» [2], выполняются расчеты и получается величина усилия прессовки обмоток (в % от номинального – давление на картон 40 кгс/см^2).

5.5. Заключение о выявленных дефектах

Определение величины смещения ЧМСП активной части трансформатора производится относительно ее предыдущих измерений на данном экземпляре трансформатора. При первом измерении, которое будем называть эталонным, усилие прессовки обмоток должно быть известно. Эталонные измерения производятся на новом трансформаторе или после его капитального ремонта, или после подпрессовки обмоток.

Допускается производить оценку усилия прессовки обмоток на других трансформаторах аналогичного типа. В исключительных случаях возможна оценка усилия прессовки трансформаторов другого типа близких (подобных) по массе и конструкции к трансформатору, на котором выполнены эталонные измерения.

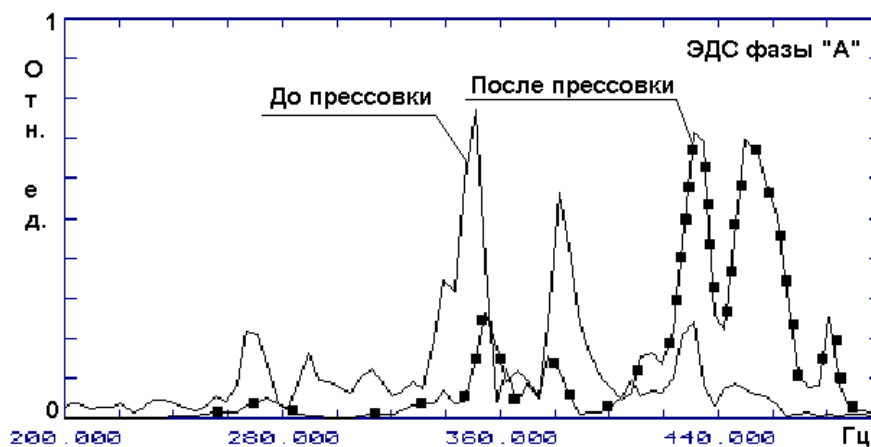


Рис.5.2 Оценка спектральной плотности мощности напряжения, наведенного в одной из обмоток трансформатора ТЦ-630000/500, при различных усилиях прессовки

Для оценки прессовки обмоток трансформаторов используются следующие диагностические правила.

а) Для однотипных трансформаторов усилие прессовки обмоток определяется по результатам определения частоты максимума спектральной плотности (ЧМСП) мощности напряжения, наведенного в обмотках каждой фазы трансформатора, и сравнение ее с ЧМСП мощности напряжения при эталонных измерениях по формуле

$$\bar{P}_i = \bar{P}_0 \cdot \left(\frac{f_i}{f_0} \right)^n, \quad (1)$$

где, $\bar{P}_i = \frac{P_i}{P_{i\max}}$ - относительное усилие прессовки обмоток исследуемого i -го трансформатора;

P_i - усилие прессовки обмоток исследуемого i -го трансформатора;

$P_{i\max}$ - допустимое (номинальное) усилие прессовки i -го трансформатора;

$\bar{P}_0 = \frac{P_0}{P_{0\max}}$ - относительное усилие прессовки обмоток трансформатора-эталона;

P_0 - усилие прессовки обмоток трансформатора-эталона;

$P_{0\max}$ - допустимое (номинальное) усилие прессовки обмоток трансформатора-эталона.

б) В случае отсутствия эталонных данных ЧМСП по исследуемому трансформатору допускается использовать ЧМСП, полученные для «эталонного» трансформатора иного типоразмера, подобного по массе и конструкции к трансформатору, на котором выполнены эталонные измерения. Для этого в формулу (1) необходимо ввести массовые характеристики трансформаторов, см. формулу (2)

$$\bar{P}_i = \bar{P}_0 \cdot \left(\frac{f_i}{f_0} \right)^n \cdot \left(\frac{m_i}{m_0} \right)^{n-2} \quad (2)$$

где, $\bar{P}_i = \frac{P_i}{P_{i\max}}$ - относительное усилие прессовки обмоток исследуемого i -го трансформатора;

P_i - усилие прессовки обмоток исследуемого i -го трансформатора;

$P_{i\max}$ - допустимое (номинальное) усилие прессовки i -го трансформатора;

$\bar{P}_0 = \frac{P_0}{P_{0\max}}$ - относительное усилие прессовки обмоток трансформатора-эталона;

P_0 - усилие прессовки обмоток трансформатора-эталона;

$P_{0\max}$ - допустимое (номинальное) усилие прессовки обмоток трансформатора-эталона;

m_i - масса активной части исследуемого трансформатора;

m_0 - масса активной части трансформатора-эталона.

Следует отметить, что в настоящее время наиболее надежные результаты в части оценки прессовки обмоток получены для трансформаторов имеющих эталонные измерения, использование эталонных данных с одного типа трансформаторов для другого, хотя и имеющего подобное конструктивное решение, но отличающийся размерами и массой, приводит к уменьшению достоверности диагностируемых параметров.

Результаты измерений процессов виброускорений с пьезоакселерометров, получаемые в процессе работ по данной методике, позволяют в отдельных случаях получать оценки состояния плотности сборки магнитопровода и определять наличие в конструкции трансформатора раскрепленных элементов.

Наличие незакрепленных элементов конструкции оценивается по вибрационным процессам, зарегистрированным на днище трансформатора с помощью пьезоакселерометров. В случае присутствия в исследуемой конструкции незакрепленных элементов реализации

вибрационных процессов, как правило, характеризуются наличием виброударных проявлений в виде высокочастотных "всплесков" (рис.5.3).

При необходимости, для получения более точных данных по качеству закрепления магнитных шунтов на внутренней стенке бака трансформатора, рекомендуется размещать пьезоакселерометры в районе мест установки шунтов. Ориентация измерительной оси пьезоакселерометров осуществляется перпендикулярно плоскости поверхности бака. Импульсное механическое воздействие может осуществляться, как с использованием маятникового ударного устройства, так и с помощью обычной кувалды. В этом случае удар осуществляется по поверхности бака в районе установки шунтов через резиновую прокладку толщиной 10...20мм. Целесообразно, чтобы расстояние между местом размещения пьезоакселерометра и местом нанесения воздействия, составляло не менее 1...1.5м.

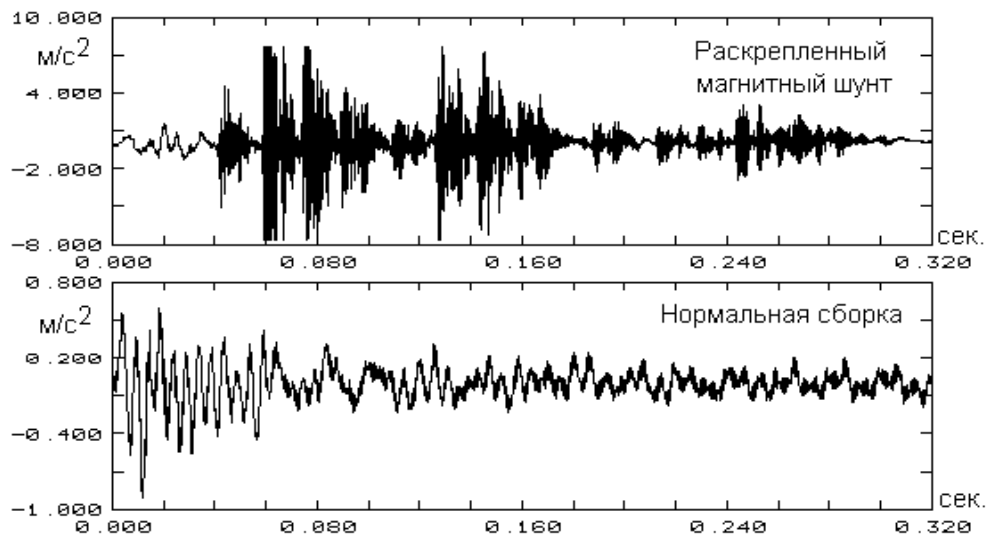
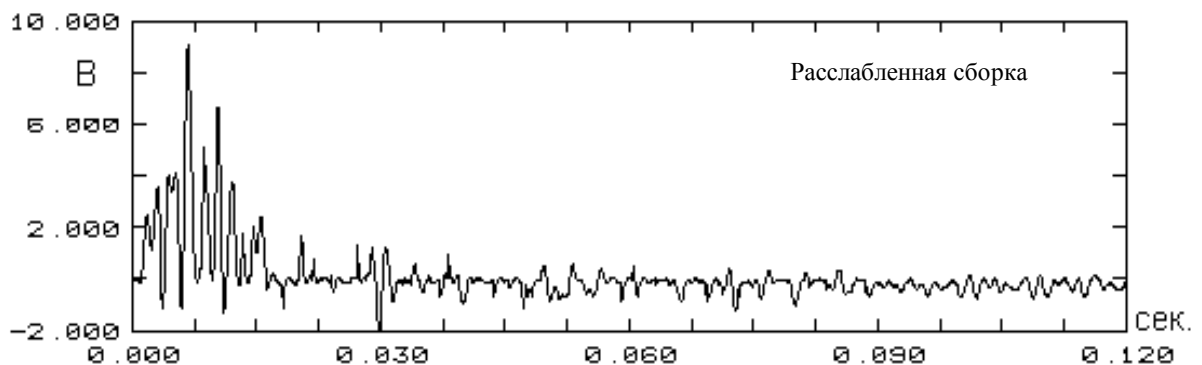


Рис.5.3 Форма вибрационных процессов, зарегистрированных на днище трансформатора ТЦ 630000/500 при раскрепленном шунте и при нормальной сборке

Плотность сборки стержней каждой фазы с ярмом оценивается по форме сигнала наведенной ЭДС. Нормальная плотность сборки характеризуется равномерно затухающими колебаниями, для расслабленной сборки характерны "срывы" колебаний ниже некоторого амплитудного значения (рис.5.4).



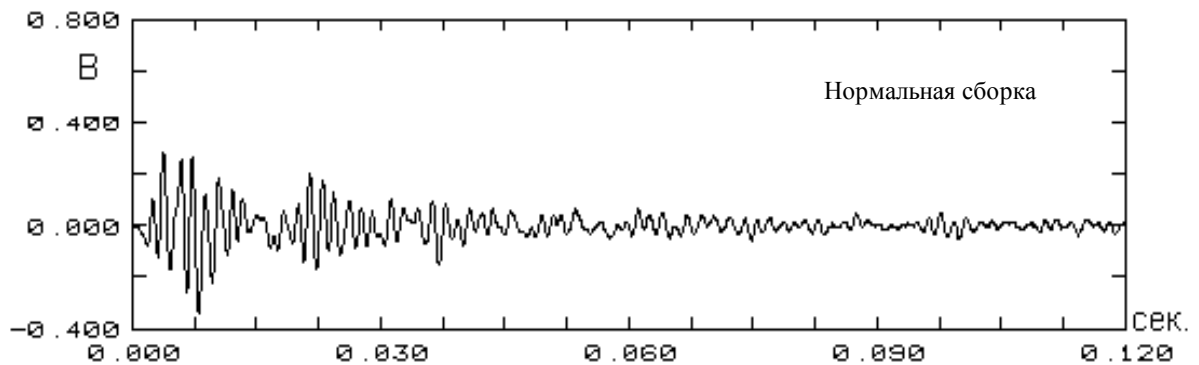


Рис.5.4 Изменение формы процессов наведенной ЭДС при раслабленной сборке стержня и ярма магнитопровода и при нормальной сборке

6. Вибрационная диагностика состояния маслонасосов системы охлаждения

6.1. Описание физических процессов

В основу определения состояния маслонасосов положены методы спектральной диагностики, позволяющие определять следующие виды дефектов:

- Изгиб вала ротора
- Ослабление механических соединений – болтов или входных (выходных) трубопроводов
- Неисправность двигателя
- Небаланс рабочего колеса маслонасоса
- Дефекты подшипников
- Гидродинамические проблемы насоса

6.2. Условия проведения измерений

Вибрационное обследование маслонасосов проводится по возможности на отключенном трансформаторе.

6.3. Порядок проведения измерений

Замеры вибрации на маслонасосах проводятся переносным виброанализатором, регистрирующим вибросигнал в диапазоне от 10 до 1000 Гц (для насосов с числом оборотов ротора равным 3000 об/мин) или от 10 до 400 Гц (для насосов с числом оборотов ротора равным или меньшим 1500 об/мин). Измерения проводятся на каждом подшипнике двигателя маслонасоса в трех направлениях – вертикальном (В), горизонтальном или поперечном (П) и осевом (О) (рис. 6.1, а). Внешний подшипник двигателя считается подшипником №1 – сечение 1-1), а подшипник, расположенный ближе к улитке насоса подшипником №2 – сечение 2-2 (рис. 6.1, б).

Для исключения влияния наведенных частот от работающего трансформатора измерения вибрации маслонасосов необходимо проводить по возможности на отключенном трансформаторе.

Для контроля состояния рабочего колеса насоса необходимо проводить измерение вибрации на улитке насоса в вертикальном или горизонтальном направлении – сечение 3-3 (рис. 6.1, б).

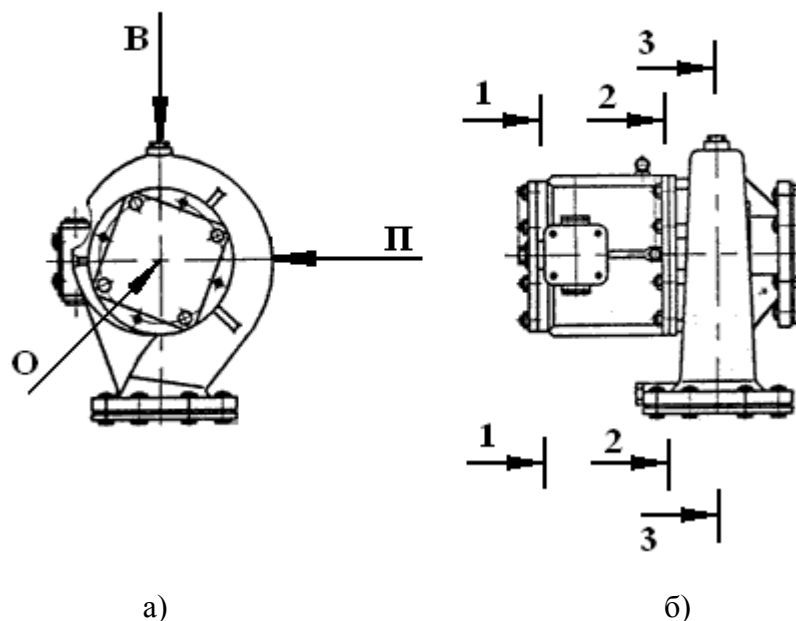


Рис. 6.1 Схема измерений вибраций маслонасоса

Результатом проведения полного замера будут 7 сигналов – по 3 на корпусе каждого подшипника и 1 – на улитке насоса.

После записи замеров в память вибронализатора эта информация с помощью специального кабеля переписывается в компьютер, где производится ее анализ с помощью экспертной системы, например “ВЕСТА” [3].

Экспертная система “ВЕСТА” представляет результаты вибрационного обследования в табличной форме (табл. 6.1), а также имеется возможность просмотра вибросигналов в каждой точке измерения (рис. 6.1). Кроме того, программа выдает отчетный документ о техническом состоянии маслонасосов трансформатора. Образец такого заключения представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерения вибрации маслонасосов трансформатора

Название маслонасоса	Направление	СКЗ виброскорости в сечениях, мм/с			Состояние маслонасоса
		1	2	3	
1 раб. группа	В	0,9070	0,6558	0,4768	Удовлетворительное
	П	0,6589	0,6337		
	О	0,3643	0,3633		
2 раб. группа	В	1.2124	0,8903	0,5130	Удовлетворительное
	П	0,6936	0,8770		
	О	0,4566	0,3976		
Дополнительная группа	В	0,6393	0,6615	1,3466	Удовлетворительное, увеличены зазоры в подшипниках
	П	2,0601	1,9432		
	О	0,2432	0,2319		
Резервная группа	В	0,0444	0,0446	0,0544	Удовлетворительное
	П	0,0480	0,0508		
	О	0,0446	0,0482		

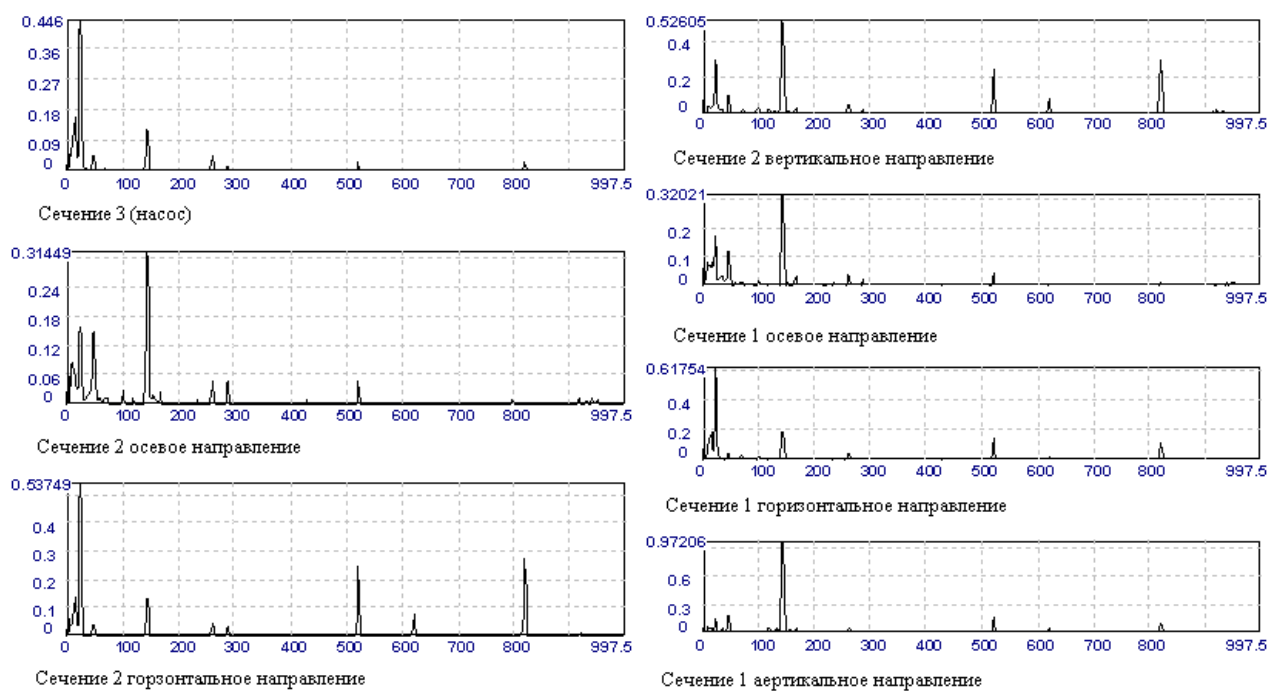


Рис. 6.1. Спектры виброскоростей (мм/с) в различных сечениях маслонасоса 1 раб. группы

6.4. Заключение о выявленных дефектах

При оценке состояния маслонасоса применяются три оценочных уровня:

- Нормальное состояние – допустима длительная эксплуатация
- Удовлетворительное состояние – эксплуатация еще допустима, но требуются более частые повторные обследования с целью выявления динамики развития дефектов
- Неудовлетворительное состояние – необходимо проведение ремонтных мероприятий или замена

7. Используемые приборы

Настоящая методика предполагает использование оборудования, приведенного в табл. 7.1

Таблица 7.1

Приборы и оборудование

Метод	Наименование и тип оборудования	Основные характеристики	Кол-во	
1. Измерение уровня вибрации на стенке бака трансформатора 2. Спектральный метод вибродиагностики 3. Вибрационная диагностика состояния маслонасосов системы охлаждения	Прибор для измерения и анализа вибрации "Корсар" или аналог	Рабочий диапазон частот – 10 – 1000 Гц Число линий в спектре – 400 Диапазоны измерения. виброускорение (м/с^2) – 0,3 – 100 виброскорость (мм/с) – 0,3 – 100 виброперемещение (мкм) – 5,0 - 500	1	
		Датчик вибрации ВК-310 А	Рабочий диапазон частот – 5 – 8000 Гц	1
		Кабель соединительный к вибродатчику		1
Частотный метод контроля	Пьезоакселерометры типа АНС-09 и (или) АДП-13 - 4шт		4	
	Блок согласующего усилителя (СУ) напряжения (4 канала с 1-го по 4-й) и заряда (4 канала с 5-го по 8-й) - 1шт		1	
	Плата аналого-цифрового преобразователя типа ЛА-2(3) - 1шт		1	
	Комплект программного обеспечения «ЛА» для регистрации временных реализаций и «ОВР» для их анализа		1	
	Ударное устройство		1	
	Комплект кабелей		1	

8. Список литературы

1. **ТУ16-90 (ИАЯК. 672000. 047ТУ).** Реакторы масляные шунтирующие 500 и 750 кВ. Технические требования.
2. **Гервиц М.Н., Емельянов В. И., Осотов В.Н. и др.** «Методика диагностики усилия прессовки обмоток трансформаторов» Электрические станции, 1997, №5.
3. **«Экспертная система диагностики качества прессовки активных материалов маслонаполненных трансформаторов по вибропараметрам»,** г. Пермь, «Вибро-Центр».