

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Тепловые электрические станции»

ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА И РЕМОНТА
ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

*Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-43 01 04
«Тепловые электрические станции»*

В 2 частях

Часть 2

Минск
БНТУ
2014

УДК 621.311.22.035.9(076.5)

ББК 31.37я7

Т38

Составители части:

С. А. Качан, А. Г. Герасимова

Рецензенты:

Ю. В. Макошко, Н. Г. Хутская

Технология монтажа и ремонта оборудования тепловых электрических станций : лабораторный практикум для студентов специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции» : в 2 ч. / сост. : С. А. Качан, А. Г. Герасимова. – Минск: БНТУ, 2012–2014. – Ч. 2. – 40 с.

ISBN 978-985-550-285-3 (Ч. 2).

Лабораторный практикум соответствует программе изучаемой в вузе дисциплины «Технология монтажа и ремонта оборудования ТЭС».

Часть 2 лабораторного практикума посвящена изучению основ вибродиагностики и основных принципов балансировки роторов вращающихся механизмов, устройства и принципов работы балансировочного стенда и приборов «Прото-баланс» и виброколлектора STD-500.

Часть 1 (сост. С. А. Качан) вышла в БНТУ в 2012 г.

УДК 621.165.004.67 (075.8)

ББК 31.363я7

ISBN 978-985-550-285-3 (Ч. 2)

ISBN 978-985-525-982-5

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
Лабораторная работа № 1 КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ.....	6
Лабораторная работа № 2 БАЛАНСИРОВКА РОТОРОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ	20
ЛИТЕРАТУРА	40

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем практикуме содержатся методические указания и инструкции по выполнению лабораторных работ по курсу «Технология монтажа и ремонта оборудования ТЭС» для студентов специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции».

Первая часть практикума содержит методические указания по выполнению лабораторных работ на действующей ТЭС и в цехах ремонтного предприятия.

Во второй части практикума приведены методические указания и инструкции по выполнению лабораторных работ, выполняемых на оборудовании (лабораторных установках) непосредственно в учебных лабораториях кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета (БНТУ).

Выполнение лабораторных работ имеет своей целью не только закрепление теоретических знаний по соответствующим разделам курса «Технология монтажа и ремонта оборудования ТЭС», но и практическое применение этих знаний при проведении ответственных работ по измерению параметров вибрации и балансировке роторов вращающихся механизмов с применением учебного балансировочного стенда и приборов «Протон-баланс» и виброколлектора STD-500.

По результатам занятий студенты должны подготовить краткие отчеты, требования по оформлению которых приведены ниже.

ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Помещение лаборатории по степени опасности поражения электрическим током относится к категории повышенной опасности. Источником опасности в лаборатории является напряжение электрического тока 220 В.

Прежде чем приступить к работе, необходимо внимательно ознакомиться с заданием, правилами техники безопасности работы и противопожарными требованиями, а также проверить исправность приборов и инструмента. Все лабораторное электрооборудование должно быть надежно заземлено (занулено).

Запрещается включать и выключать электрические приборы и установки без разрешения руководителя.

Во время лабораторных занятий следует находиться непосредственно у лабораторной установки, на которой выполняется работа.

При обнаружении неисправностей, которые могут вызвать поражение электрическим током или порчу приборов и оборудования, необходимо немедленно отключить рубильник, прекратить работу и поставить об этом в известность преподавателя или лаборанта.

Если с товарищем произошел несчастный случай, немедленно сообщить об этом руководителю работ для оказания первой помощи. Пострадавшему необходимо оказать первую помощь, для этого в лаборатории должна быть аптечка, укомплектованная необходимыми лекарствами, после чего пострадавшего необходимо отправить в ближайший медицинский пункт для оказания квалифицированной медицинской помощи.

При возникновении пожара необходимо прекратить доступ воздуха к горящему предмету и локализовать очаг пожара. Для этого, если можно, закрыть горящее место асбестом, одеялом, засыпать песком. При сильном пламени применить огнетушители и вызвать пожарную охрану.

По окончании работы привести в порядок рабочее место, сдать приборы, материалы, инструкции лаборанту и только после этого можно покинуть лабораторию.

Лабораторная работа № 1

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ

Цель работы: ознакомление с основами вибродиагностики, измерение параметров вибрации на учебном стенде с использованием прибора «Протон-баланс» и виброколлектора STD-500.

Общие сведения

Вибрация обычна для оборудования, содержащего движущиеся части или связанного с движущимися системами и узлами. Она возникает из-за некоторых недостатков, являющихся естественным следствием изготовления элементов оборудования и свойств материалов. При увеличении вибрации эти недостатки могут развиваться в серьезные дефекты. В свою очередь развитие дефекта в оборудовании приводит к изменению характеристик вибрации. Таким образом, повышение вибрации выше определенного уровня может привести как к разрушению оборудования, так и характеризовать разрушение, т.е. вибрация служит как причиной развития дефектов, так и их индикатором [1–3].

Виды и параметры вибрации. *Вибрация* – движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его величин.

Абсолютная вибрация – колебания тела около положения своего равновесия (например, вибрация корпусов машин и подшипников, роторов, фундаментов, трубопроводов). *Относительная вибрация* – колебания одного тела относительно другого (например, вибрация вала относительно корпуса подшипника) (рис. 1.1).

Вибрация характеризуется следующими величинами:

– *виброперемещение* – мгновенное значение координаты положения точки при механической вибрации $s(t)$, мкм (мм);

– *виброскорость* – первая производная перемещения по времени:

$$v = \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s}, \text{ мм/с (м/с);} \quad (1.1)$$

– *виброускорение* – вторая производная виброперемещения по времени:

$$a = \frac{d^2 s(t)}{dt^2} = \ddot{s}, \text{ мм/с}^2 \text{ (м/с}^2\text{)}. \quad (1.2)$$

Из нескольких представлений единиц измерения вибрации: размах, среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости, пик и другие, СКЗ является самым важным (рис. 1.2).

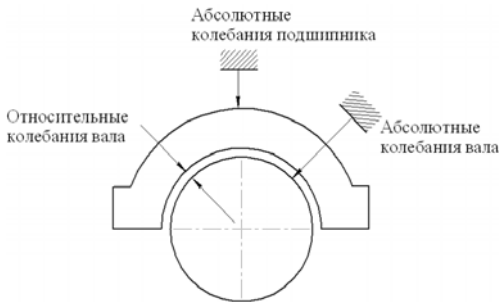


Рис. 1.1. Виды колебаний и места их измерений (на примере подшипника скольжения)

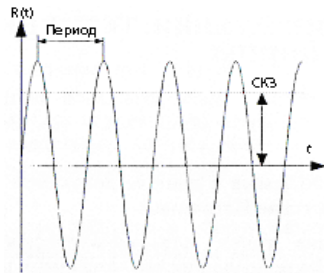


Рис. 1.2. Синусоидальная вибрация

Среднеквадратичное значение R_e ($R_e = S_e, V_e, A_e$) (англ. *RMS*; устаревшее – эффективное, действующее значение) определяется как:

$$R_e = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T R^2(t) dt}, \quad (1.3)$$

где T – период колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (1.4)$$

где ω – угловая частота:

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (1.5)$$

где f – частота гармонической вибрации.

Как показывает опыт, наиболее точно отображает опасность механических колебаний СКЗ виброскорости, измеряемое в частотном диапазоне 10–1000 Гц, поскольку характеризует энергию колебаний и, значит, их разрушающую способность.

Контрольные точки и направления вибрации. Уровень вибрации – максимальное значение вибрации в определенной точке или группе точек в выбранных направлениях, при определенных условиях и установившемся режиме работы.

Измерения вибрации проводят на элементах конструкции, которые в максимальной степени реагируют на динамические силы и характеризуют общее вибрационное состояние агрегата (подшипниковые опоры, корпус и пр.) в местах, называемых контрольными (штатными) точками измерения (рис. 1.3).

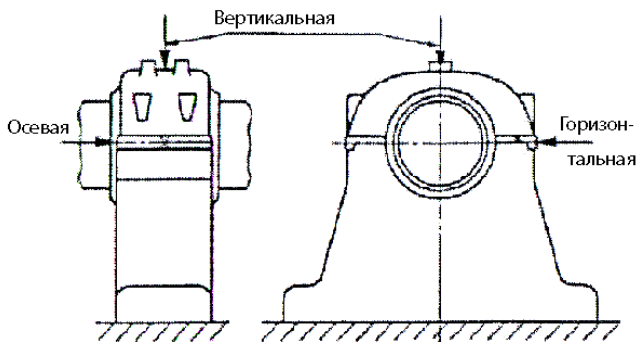
Абсолютную вибрацию при диагностировании большинства дефектов измеряют в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вертикальном, горизонтально-поперечном и осевом. Горизонтально-поперечную составляющую измеряют на уровне оси вала против середины вкладыша подшипника; осевую – в точке, максимально приближенной к оси вала на корпусе опоры подшипника вблизи горизонтального разъема; вертикальную – на верхней части крышки подшипника над серединой его вкладыша.

Если невозможно провести измерения по трем направлениям или требуется минимизация количества замеров, то допускается измерение вибрации по двум направлениям: осевом и одном из поперечных. Предпочтение отдается горизонтальному, обычно соответствующему направлению минимальной жесткости системы.

Методику измерения вибрации паровых турбин регламентируют ГОСТ 25364–97 и ГОСТ ИСО 108816-1-97.

Критерии оценки вибрационного состояния. В ГОСТ ИСО 10816-1-97 рассматриваются критерии двух видов, которые определяют:

- *зоны качества А, В, С, D* состояния агрегата по уровню вибрации (критерий условно можно назвать статическим);
- динамику изменения вибрации («скачки», тренды вибрации).



a



б

Рис. 1.3. Точки измерения вибрации:
a – на опоре подшипника; *б* – на корпусе подшипника

Принято выделять четыре класса агрегатов по мощности и характеристикам опор (фундаментов):

1 класс – отдельные части небольших двигателей и машин, соединенные с агрегатом (например, моторы мощностью до 15 кВт);

2 класс – машины средней величины (моторы 15–875 кВт) без специальных фундаментов; жестко установленные двигатели или машины (до 300 кВт) на специальных фундаментах;

3 класс – мощные первичные двигатели и другие машины с вращающимися массами, установленные на массивных фундамен-

тах, относительно жестких в направлении измерения вибрации (например, турбоагрегаты);

4 класс – мощные первичные двигатели и другие машины с вращающимися массами, установленные на массивных фундаментах, относительно податливых в направлении измерения вибрации.

По качеству вибросостояния принята следующая градация:

зона А – новые машины, только что введенные в эксплуатацию;

зона В – машины, годные к эксплуатации без ограничения срока;

зона С – машины, непригодные для длительной непрерывной эксплуатации; они могут функционировать ограниченный период времени до появления возможности проведения ремонтных работ;

зона D – аварийный уровень вибрации, серьезный, для того, чтобы вызвать повреждения машины.

В табл. 1.1 даны примерные критерии (выраженные в СКЗ виброскорости v_{rms} , мм/с), которыми можно пользоваться при отсутствии специальных нормативных документов.

Таблица 1.1

Примерные границы зон вибрации для машин различных классов

v_{rms} , мм/с	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
0,28	А	А	А	А
0,45				
0,71				
1,12	В	В	В	В
1,8				
2,8	С	С	С	С
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				
71				

Описание лабораторной установки

В ходе выполнения работы используются: учебный стенд «Протон-стенд» (модель роторного оборудования), прибор «Протон-

баланс», преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1, виброколлектор STD-500.

Устройство учебного стенда «Протон-стенд». Учебный стенд (рис. 1.4) состоит из динамической модели механизма 1, установленной на опорах 2, асинхронного трехфазного электродвигателя 3, соединенного с моделью с помощью гибкой муфты 4. Двигатель и модель установлены на основании 5. На опорах 2 модели установлены стальные площадки для магнитного крепления датчиков вибрации (возможно вертикальное, горизонтальное и осевое их крепление).

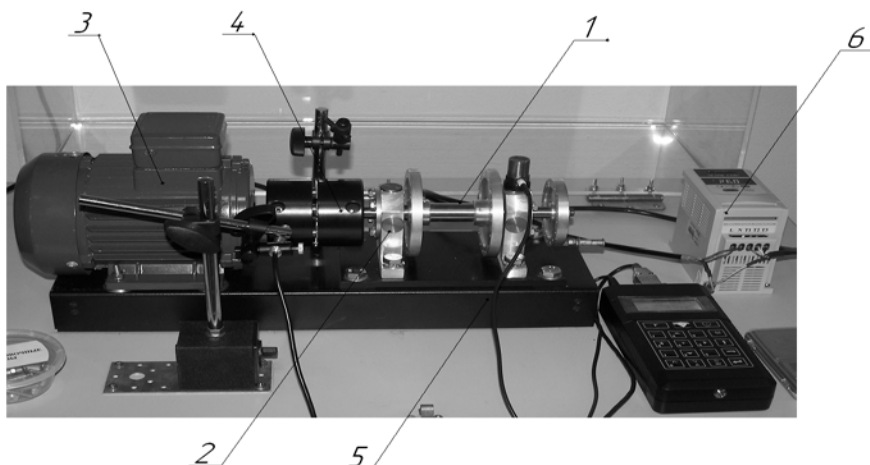


Рис.1.4. Внешний вид учебного стенда «Протон-стенд»

Основные технические характеристики учебного стенда:

– максимальная мощность привода, Вт	400
– частота вращения, Гц	5–50
– напряжение питания, В	220
– частота питающей сети, Гц	50
– вес, кг	10
– габаритные размеры (без преобразователя частоты), мм	510×130×260

Управление частотой вращения электродвигателя осуществляется с помощью преобразователя частоты E2-MINI 6 (рис. 1.5).

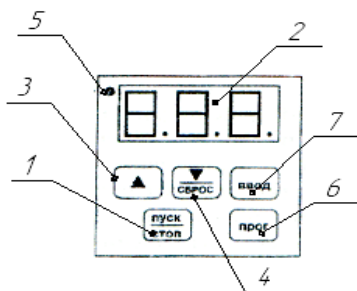


Рис. 1.5. Внешний вид панели управления преобразователя частоты E2-MINI:
 1 – пуск и останов двигателя; 2 – дисплей с показаниями частоты оборотов, Гц;
 3 – увеличение заданной частоты; 4 – уменьшение заданной частоты/сброс сигнала
 ошибки; 5 – индикатор питания; 6 – переход в режим программирования;
 7 – не используется

Устройство и режимы работы прибора «Протон-баланс».

Прибор «Протон-баланс» предназначен для измерения, регистрации и анализа параметров вибрации (фазы, частоты вращения ротора) и температуры работающих роторных машин и механических конструкций с целью контроля и диагностики их технического состояния. Также с помощью этого прибора могут решаться задачи балансировки роторных машин.

Внешний вид и органы управления прибора «Протон-баланс» показаны на рис. 1.6. Главное меню прибора состоит из трех пунктов: «ИЗМЕРЕНИЕ», «БАЛАНСИРОВКА» и «СЕРВИС».

Режимы «Виброметр», «Тахометр», «Термометр», «Фазометр» и вибрационный анализ сгруппированы в меню «ИЗМЕРЕНИЕ».

В режиме «Виброметр» прибор выполняет измерения общего уровня вибрации в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-97, т.е. СКЗ виброскорости в полосе частот 10-1000Гц.

В качестве датчика измерения вибрации используется вибропреобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1 (рис. 1.7), который состоит из основания 1, пьезоэлемента 2, инерционной массы 5, контакта 7 для снятия электрического потенциала, втулки 6, втулки 8, предназначенной для присоединения кабеля соединительного. На втулку 8 надето кольцо 10 и навинчен колпачок 9, предохраняющий от попадания влаги в вибропреобразователь во время хранения. Конструкция закрывается крышкой 4.

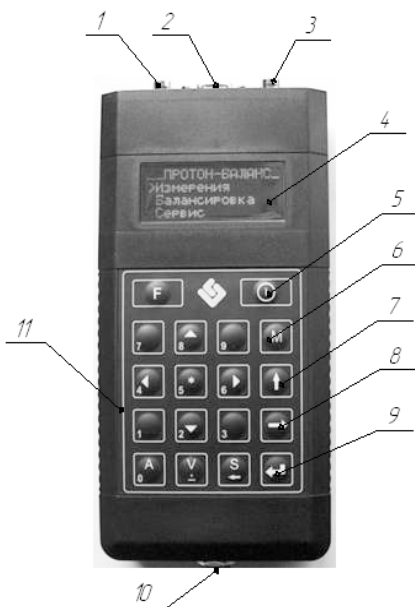


Рис. 1.6. Внешний вид прибора «Протон-баланс»:

1, 2 – разъемы подключения вибропреобразователя и таходатчика, интерфейсного кабеля или стробоскопа; 3 – разъем выхода вибросигнала на внешнюю аппаратуру; 4 – индикатор прибора (4 строки по 16 знаков); 5 – кнопка включения / выключения прибора; 6 – кнопка запоминания результатов; 7 – возврат прибора из любого состояния в меню режимов; 8 – кнопка включения / выключения однократного или многократного режима измерения; 9 – запуск прибора в выбранный режим прибора; 10 – гнездо подключения внешнего источника питания; 11 – кнопки цифровой клавиатуры для ввода данных и кнопки \blacktriangledown \blacktriangle выбора режимов работы меню (кнопка *F* в данной версии прибора не задействована)

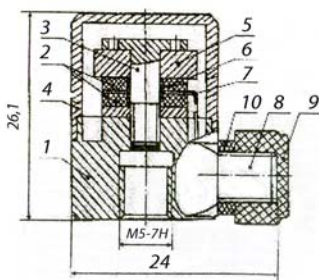


Рис. 1.7. Общий вид преобразователя пьезоэлектрического виброизмерительного ДН-3-М1 (без кабеля)

Принцип работы преобразователя основан на прямом пьезоэффекте: при воздействии механических колебаний вдоль продольной оси пьезоэлементы подвергаются деформации сжатия-растяжения, а на электродах пьезоэлемента возникают электрические заряды, пропорциональные действующему виброускорению.

Устройство и принцип действия виброколлектора STD-500. Виброколлектор STD-500 предназначен для измерения и анализа вибрации способом *ручного щупа* (рис. 1.8).

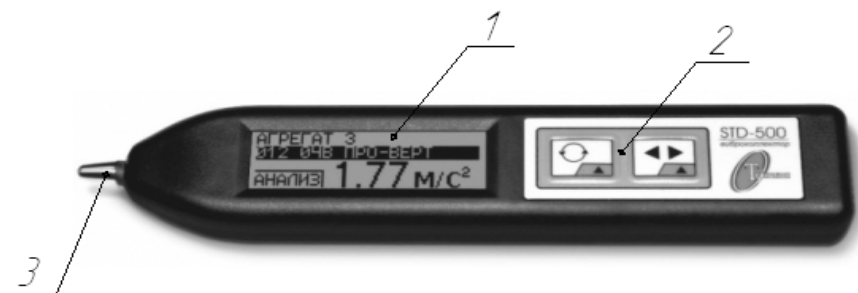


Рис. 1.8. Внешний вид виброколлектора STD-500:
1 – дисплей; 2 – клавиатура; 3 – щуп

Прибор позволяет: проводить измерения СКЗ виброперемещения, виброскорости, виброускорения; собирать и хранить данные обследований; анализировать данные непосредственно у агрегата (спектральный анализ) и передавать данные на компьютер для последующего спектрально-селективного анализа.

Виброколлектор состоит из вибропреобразователя, электронного измерительного блока и аккумуляторной батареи.

Вибропреобразователь – это пьезоэлектрический акселерометр (рис. 1.7), напряжение на входе которого пропорционально воздействию на него виброускорению. Напряжение подается на измерительный блок, который производит обработку сигнала, однократно интегрирует его и формирует СКЗ виброскорости.

Основные технические характеристики используемых приборов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Основные технические характеристики приборов

Параметры	«Протон-баланс»	STD-500
Диапазон частот измерения, Гц	10–1000	10–1000
Измеряемые параметры	Виброскорость, виброперемещение, частота вращения ротора, фаза, температура	Виброперемещение, виброскорость, виброускорение,
Диапазон измеряемых скоростей в СКЗ, мм/с	0,5–99,9	0,1–100
Погрешность измерения виброскорости и виброперемещения, %	±10	±5
Питание	Аккумуляторная батарея, щелочные элементы или от сети (220±22)В	Аккумуляторная батарея
Масса прибора, кг	0,6	0,15

Порядок выполнения работы

Контроль параметров вибрации с использованием прибора «Протон-баланс». Порядок использования прибора в режиме виброметра.

1. Присоединить вибропреобразователь к соответствующему разъему на приборе и установить его в контрольную точку на площадку для магнитного крепления датчиков вибрации на опорах учебного стенда (рис. 1.9).

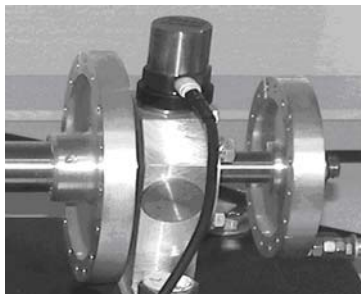


Рис. 1.9. Установка вибропреобразователя на магнитную площадку

2. Подключить учебный стенд к сети.

3. На пульте управления преобразователя частоты (рис. 1.5) выставить с помощью кнопок ▲ или ▼ необходимую частоту вращения и нажать клавишу «ПУСК». Двигатель начнет вращаться и через 5 секунд достигнет заданной частоты (для остановки двигателя нажать клавишу «СТОП»). Включить прибор в режим «КОНТРОЛЬ» и убедиться в его работоспособности по соответствию показаний паспортным данным.

4. Перевести прибор в режим «Виброметр» и выполнить измерения уровней вибрации последовательно во всех точках контроля (вертикальном, горизонтальном и осевом направлении) для различных частот вращения вала. Если в процессе измерений в какой-либо из точек видно, что выбранные рабочие параметры не оптимальны, измените параметры по своему усмотрению для получения наиболее достоверных результатов. Можно изменить:

– постоянную времени усреднения от 1 сек до 30 сек нажатием клавиш «▲» и «▼». При этом время усреднения будет отражаться в правом верхнем углу как цифровое значение, и в правом нижнем углу экрана в виде столбика определенной высоты.

– диапазон показаний аналоговой шкалы нажатием клавиш «◀» и «▶». При этом будет меняться значение размаха шкалы от 10 до 100 для виброскорости и от 100 до 1000 для виброперемещения.

Установки параметров по умолчанию: время усреднения 1 секунда, шкала максимальная 100 мм/с или 1000 мкм.

5. Результаты измерений занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерений параметров вибрации с использованием прибора «Протон-баланс»

Контрольные точки	Виброскорость, мм/с при частоте оборотов, Гц			Виброперемещение, мкм при частоте оборотов, Гц		
	20	30	40	20	30	40
Горизонтальная						
Вертикальная						
Осевая						

6. Произвести анализ измеренных СКЗ виброскорости в соответствии с табл. 1.1.

Контроль параметров вибрации виброколлектором STD-500.

1. На пульте управления преобразователя частоты (рис. 1.6) выставить с помощью кнопок ▲ или ▼ необходимую частоту вращения и нажать клавишу «ПУСК». Двигатель начнет вращаться и через 5 секунд достигнет заданной частоты вращения (для остановки двигателя нажать клавишу «СТОП»).



Рис. 1.10. Проведение измерений виброколлектором STD-500

2. Включить прибор, выбрать в приборе точку маршрута или немаршрутную точку, установить прибор щупом в точку измерения перпендикулярно поверхности контроля (рис.1.10) и нажать «Ввод».

После окончания измерения на дисплее прибора появится сообщение «Измерение закончено» и на экране высветится значение измеренного параметра, а собранная волна запишется в память прибора.

3. Провести измерения во всех точках контроля (вертикальном, горизонтальном и осевом направлении) для разных частот вращения, результаты которых занести в табл. 1.4.

4. Провести анализ измеренных СКЗ виброскорости в соответствии с табл. 1.1.

Таблица 1.4

Результаты измерений параметров вибрации
с использованием виброколлектора STD-500

Контрольные точки	Виброскорость, мм/с, при частоте оборотов, Гц			Виброперемещение, мкм, при частоте оборотов, Гц			Виброускорение, м/с ² , при частоте оборотов, Гц		
	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Горизонтальная									
Вертикальная									
Осевая									

Меры безопасности

При выполнении работы следует строго соблюдать нижеприведенные меры безопасности для исключения случаев травматизма и выхода из строя оборудования.

Преобразователи частоты на выходе формируют опасное электрическое напряжение и регулируют скорость вращения различных узлов и механизмов. Монтаж, наладка и техническое обслуживание этого оборудования должны производиться квалифицированным специалистом по электронике, ознакомленным с инструкцией по эксплуатации оборудования. Прибор имеет конденсаторы в звене постоянного тока, поэтому даже после отключения на силовых клеммах преобразователя частоты некоторое время сохраняется высокое напряжение.

Заземление преобразователя частоты должно быть видимым. Не смотря на то, что преобразователь заземлен через провод питания, необходимо заземление отдельными проводами корпуса преобразователя и электродвигателя. Это позволит избежать электротравм и уменьшить электромагнитные помехи для работы аппаратуры.

Категорически запрещается прикасаться руками или какими-либо предметами к деталям и узлам приводимого во вращение оборудования, когда подключено напряжение питания, либо когда конденсаторы в звене постоянного тока еще не разряжены.

Запускать или останавливать двигатель только с помощью пульта управления. Установку датчиков осуществлять только при остановленном двигателе и отключенном преобразователе частоты оборотов.

Обеспечить невозможность попадания датчиков и кабелей приборов в движущие конструкции механизма.

При работе с сетевым адаптером соблюдать те же меры предосторожности, что и при работе с электрооборудованием. В самих приборах и на датчике вибрации отсутствует напряжение, представляющее угрозу для жизни.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- ответы на контрольные вопросы;
- описание учебного стенда и приборов для контроля вибропараметров;
- порядок проведения контроля при измерении параметров вибрации с использованием прибора «Протон-баланс» и виброколлектора STD-500;
- таблицы результатов измерений;
- анализ измеренных параметров вибрации;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое вибрация?
2. Какие существуют виды вибрации?
3. Какими основными параметрами характеризуется вибрация?
4. Как выбирают контрольные точки для измерения вибрации?
5. Какие критерии существуют при оценке вибрационного состояния роторных машин?
6. Что относится к основным техническим характеристикам приборов для контроля вибрации?
7. Каков принцип действия пьезоэлектрического вибропреобразователя?

Лабораторная работа № 2

БАЛАНСИРОВКА РОТОРОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ

Цель работы: изучение основных принципов балансировки роторов вращающихся механизмов; устройство балансировочного стенда и порядок работы прибора «Протон-баланс».

Общие сведения.

Методические основы балансировки

Общие положения. Наиболее распространенной причиной вибрации турбины является неуравновешенность ротора, под которой понимаются нарушения в распределении масс ротора относительно оси его вращения.

Неуравновешенная масса ротора при его вращении вызывает появление возмущающей силы, которая равна центробежной силе неуравновешенной массы и определяется по формуле (2.1).

$$C = m \omega^2 r, \quad (2.1)$$

где m – неуравновешенная масса, кг;

$\omega = 3,14n/30$ – угловая скорость вращения, с^{-1} (n – число оборотов ротора, мин^{-1});

r – расстояние центра тяжести неуравновешенной массы от оси вращения, м.

Вибрация, вызванная неуравновешенностью вала, имеет характерные особенности, позволяющие отличить ее от вибрации, вызванной другими причинами. Она имеет синусоидальный характер и ее интенсивность растет с увеличением частоты вращения.

Процесс уравнивания роторов называется *балансировкой*.

Причины возникновения вибрации могут быть разными в зависимости от конструкции механизма и режимов его работы.

В условиях эксплуатации это прогиб вала, неравномерный износ лопаток вследствие эрозии и коррозии, неравномерный занос

лопаток отложениями солей, неисправность соединительных муфт между роторами и др.

Ухудшение вибрационного состояния агрегата может быть вызвано неудовлетворительным выполнением таких ремонтных работ, как замена или пересадка дисков и других деталей на роторе, переоблопачивание, замена и ремонт соединительной муфты, правка или проточка шеек ротора и др.

Причины возбуждения вибрации могут быть и более сложные.

Отсюда ясно, что необходимость балансировки роторов возникает не во всех случаях нарушения первоначального баланса.

Балансировкой нельзя устранять вибрацию, которая вызывается, например, прогибом вала, заносом лопаток накипью, ослаблением посадки дисков на валу, задеваниями в уплотнениях и т.д.

Однако в большинстве практических случаев динамическая балансировка является самым эффективным средством снижения уровней вибрации на частоте вращения, а часто и снижение общих уровней вибрации механизма [2–4].

Статическая и динамическая неуравновешенность. Ротор считается уравновешенным (отбалансированным), когда его центральная ось инерции совпадает с осью вращения.

При *статической неуравновешенности (статическом дисбалансе)* все неуравновешенные массы ротора могут быть приведены к одной массе, центр тяжести которой не лежит на оси вращения, а расположен на некотором расстоянии от нее (рис. 2.1, а).

При вращении неуравновешенная масса дает центробежную силу P , которая и вызывает вибрацию. Эта масса может быть обнаружена и устранена статически, т.е. без вращения ротора.

При *динамической неуравновешенности (динамическом дисбалансе)* все неуравновешенные массы ротора могут быть приведены к двум массам, центры тяжести которых находятся по разные стороны от оси вращения ротора (рис. 2.1, б). При вращении ротора эти две массы дают две центробежные силы P_1 и P_2 , воздействующие на подшипники и вызывающие вибрацию. Этот небаланс можно выявить и устранить только при вращении ротора.

Более правильно говорить о трех видах дисбаланса (рис. 2.2).

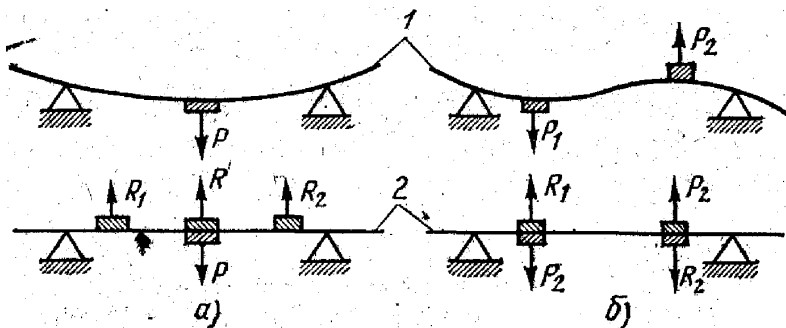


Рис. 2.1. Статически (а) и динамически (б) неуравновешенные роторы: P, P_1, P_2 и R, R_1, R_2 , – центробежные силы от действия небаланса и уравновешивающего груза соответственно; 1 – действие небаланса; 2 – уравновешивание небаланса

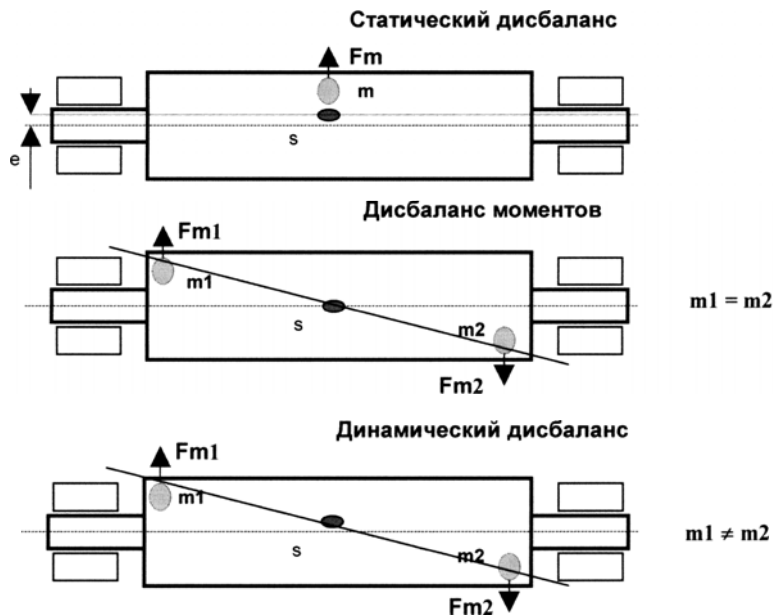


Рис. 2.2. Виды дисбалансов

Статический дисбаланс вызывает параллельное смещение центральной главной оси инерции по отношению к оси ротора. Это же расстояние соответствует и смещению центра тяжести ротора.

При *дисбалансе моментов* (или прецессии) центральная главная ось инерции находится под некоторым углом к геометрической оси ротора и пересекает эту ось в центре тяжести ротора.

Статический дисбаланс и дисбаланс моментов – это два предельных и, идеализированных случая. На практике всегда присутствует и то и другое, и главная ось инерции имеет отклонения от центра тяжести – это и называется *динамическим дисбалансом*.

Статическая и динамическая балансировка. *Статической балансировке* подвергаются однодисковые роторы или снятые с вала облопаченные диски (рис. 2.3).

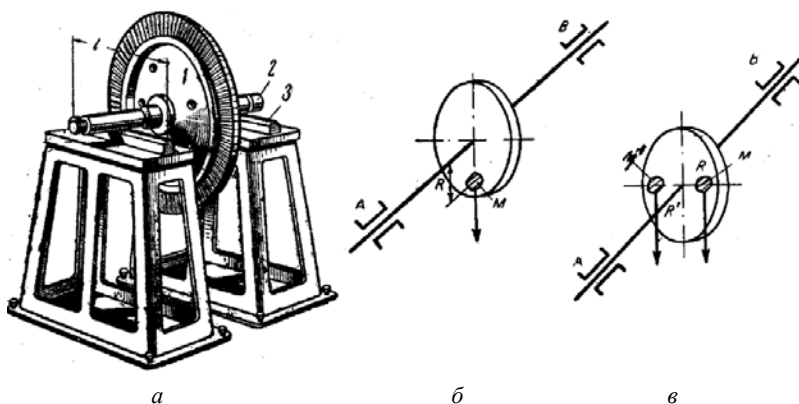


Рис. 2.3. Схема статической балансировки и станок для ее проведения:
1 – диск; 2 – оправка; 3 – ножи-призмы

Диск 1 надевают на оправку 2 и устанавливают на призматические ножи 3 из закаленной стали (рис. 2.3, а). Если диск не уравновешен, то он повернется так, что его центр масс окажется внизу (рис. 2.3, б). Тогда с противоположной стороны устанавливают балансировочный груз или, при возможности, в зоне центра масс снимают ее избыток (рис. 2.3, в). Затем статически отбалансированные диски насаживают на вал.

Для многодисковых роторов необходима *динамическая балансировка*, задачей которой является определение величины и места расположения балансировочных грузов, установка которых на ротор вызовет появление дополнительных центробежных сил R_1 и R_2 ,

равных по значению и противоположных по направлению центростремительным силам P_1 и P_2 , создающим неуравновешенность ротора (рис. 2.1). При этом грузы обычно располагают в двух различных плоскостях коррекции по разные стороны от оси вращения (обычно на крайних дисках ротора).

Особенности балансировки гибких и жестких роторов.

Каждому телу или системе свойственна определенная частота свободных колебаний, которая зависит от упругих свойств материала, конструкции, размера, характера крепления и т. д. Такая частота называется собственной.

Если частота возмущающей силы равна (или кратна) частоте собственных колебаний тела, наступает явление резонанса, что опасно, т.к. может привести к разрушениям.

Частота вращения ротора, при которой частота вынужденных колебаний равна или кратна частоте собственных колебаний ротора, называется критической частотой вращения.

Если критическая частота ротора выше его номинальной, рабочей частоты, то ротор принято считать *жестким*; ротор, рабочая частота вращения которого превышает критическую, называют *гибким*.

Условия балансировки гибких и жестких роторов различны, так как есть связь между максимумом амплитуды колебаний и «тяжелым» местом ротора, а ее характер зависит от типа ротора:

– *жесткие* или *дорезонансные* ротора вращаются вокруг оси, задаваемой конструкцией, т.е. вокруг геометрической оси симметрии и вызываемые дисбалансом перемещения ротора находятся в фазе с возмущающей силой;

– *гибкие* или *зарезонансные* ротора вращаются вокруг своего центра тяжести и их перемещения от дисбаланса находятся в противофазе с возмущающей силой.

Это два идеализированных случая. На практике сдвиг фаз между направлением перемещения ротора и вызывающей эти перемещения динамической силой может быть любым от 0 до 360 градусов. Это связано с тем, что помимо типа ротора на его поведение в динамике оказывают влияние еще множество факторов, не поддающихся предварительному и точному учету.

Жесткие роторы успешно балансируются, как на низко-частотных балансировочных станках, так и на рабочей частоте вращения. При этом динамическую балансировку *жесткого* ротора достаточно проводить в двух плоскостях коррекции, расположенных обычно на концах ротора.

Уравновешенный же на пониженной частоте вращения на балансировочном станке *гибкий* ротор может оказаться разбалансированным на рабочей частоте вращения из-за влияния динамического прогиба.

Поэтому балансировку *гибких* роторов современных турбогенераторов следует производить на рабочей частоте вращения:

- либо отдельного ротора на балансировочном станке в специальной вакуумной камере (в условиях завода-изготовителя);
- либо всего валопровода турбоагрегата в сборе в собственных подшипниках (в условиях электростанции).

Принципы динамической балансировки. Для балансировки роторов в составе механизмов необходимо использовать технические средства для измерения амплитуд и фаз вибрации во всем рабочем диапазоне оборотов, во всем диапазоне углов от 0 до 360 градусов.

Смысл операций, положенных в основу динамической балансировки поясним с помощью векторных построений.

Дисбаланс может быть охарактеризован уровнем вибрации на частоте вращения ротора, а вибрация на конкретной частоте есть величина векторная, т.е. ее полное описание включает в себя не только величину, но и направление вибрации или ее фазу (в отличие от, например, общего уровня вибрации в широкой полосе частот, который является энергетической характеристикой вибрационного процесса и является величиной чисто скалярной).

В общем виде задачу балансировки можно сформулировать так:

- дан вращающийся ротор, имеющий динамически неуравновешенные массы. Расположение этих масс и их величины неизвестны, доступно только измерение вектора вибрации (величины и фазы) от суммарного дисбаланса всех неуравновешенных масс. Имеется возможность устанавливать на ротор известные массы в любом угловом положении по окружности ротора. Место установки масс называется плоскостью балансировки. Обычно по длине ротора располагаются несколько таких плоскостей;

– в результате балансировки необходимо определить величину и угловое положение массы, которая минимизирует суммарный динамический дисбаланс ротора. Критерием является минимизация, т.е. снижение до определенной, заданной величины, уровней вибрации на частоте вращения в контролируемых точках механизма.

Для упрощения пояснения принципа балансировки положим, что минимизировать нужно вибрации одной точке контроля, и на роторе есть только одна балансировочная плоскость.

Воспользуемся векторным построением, показанным на рис. 2.4. При этом: угловая разметка ротора выполнена против направления вращения ротора; все построения делаются в абсолютных единицах измерения вибрации, тип измеряемой величины (виброускорение, виброскорость, виброперемещение) значения не имеет.

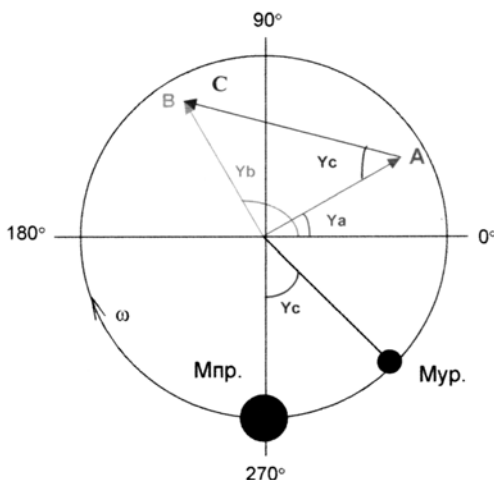


Рис. 2.4. Векторное построение

Шаги векторного построения:

– построить на круге вектор $A(Ya)$ вибрации в исходном состоянии ротора, с неизвестными неуравновешенными массами;

– установить в любом угловом положении пробную массу $M_{пр}$, измерить и построить на круге получившийся при этом вектор вибрации $B(Yb)$, который характеризует суммарное влияние на вибрацию неизвестного исходного дисбаланса и известного внесенного небаланса $M_{пр}$;

– из конца вектора A к концу вектора B построить вектор C .

Из векторного построения следует, что вектор C есть разность $C = B - A$, в чистом виде характеризующий ту вибрацию, которая возникает только от установки пробной массы $M_{пр}$. В результате становится известным влияние пробной массы $M_{пр}$ на вибрацию ротора. Тогда цель балансировки (полная компенсация вектора A исходного дисбаланса) будет достигнута, если удастся определить величину и положение уравнивающей массы, при которой вектор C будет равен вектору A по величине и противоположен по направлению.

Видно, что цель будет достигнута, если:

– пробную массу сместить по направлению разметки ротора на угол γ_c (т.е. в ту же сторону и на тот же угол, на который надо повернуть вектор C для его совмещения с вектором A);

– изменить пробную массу в соотношении $M_{ур} = M_{пр} A / C$.

***Примечание.** Если направление вращения ротора и направление угловой разметки на роторе совпадают, то уравнивающая масса должна смещаться относительно углового положения пробной массы на угол γ_c , но в сторону, противоположную направлению вращения вектора C для его совмещения с вектором A . Поэтому, во избежание возможной путаницы, лучше всегда делать угловую разметку на роторе в направлении, противоположном направлению вращения ротора.*

Таким образом, для динамического уравнивания ротора необходимо два раза измерить векторы вибрации:

– при исходном, неизвестном дисбалансе – вектор A ;

– при добавлении к исходному дисбалансу известного дисбаланса от $M_{пр}$ – вектор B .

Для решения задачи балансировки не обязательно прибегать к векторным построениям. Результаты измерений можно записать в виде системы линейных уравнений в проекциях на ортогональные оси. Решение системы уравнений также как и векторное построение дает однозначный результат.

Векторное построение является наглядным для пояснения принципа балансировки и используется для практического решения задач балансировки при небольшом количестве точек контроля.

При увеличении количества точек контроля и количества баланси́ровочных плоскостей, практическое решение задачи векторным построением становится слишком громоздким и сложным, вследствие взаимного влияния баланси́ровочных плоскостей на векторы вибрации в одной и той же точке. В этом случае точное и быстрое решение задачи возможно уже только при использовании вычислительной техники и специализированного программного обеспечения. Однако, как бы ни усложнялся алгоритм решения задачи, основной принцип баланси́ровки, изложенный выше, сохраняется.

Отметим, что любая методика баланси́ровки основывается на предположении о линейности колебательной системы относительно воздействия на нее корректирующих масс, которое может быть сформулировано следующими постулатами:

– приращения амплитуд вибрации на частоте вращения ротора пропорциональны приращениям дисбалансов, а при неизменном радиусе установки груза и вносимым корректирующим массам;

– фазовые углы между силами дисбалансов в баланси́ровочных плоскостях и соответствующими векторами вибрации в точках контроля неизменны при постоянных оборотах.

Из этого следует (рис. 2.5):

– если пробные грузы разной массы устанавливать в одном и том же месте, то вектор C меняется по величине, не изменяя своего углового положения;

– если груз неизменной массы перемещать по баланси́ровочной плоскости, то вектор C , не меняя своей величины, будет на тот же угол поворачиваться вокруг своего начала.

Исходную величину пробного груза можно оценить по формуле:

$$M_{\text{пр}} = 804 (P \cdot A) / (R \cdot N), \text{ г}, \quad (2.2)$$

где P – масса ротора, кг;

A – уровень вибрации (виброскорость) в точке, выбранной для баланси́ровки, мм/с;

R – радиус установки груза в баланси́ровочной плоскости, см;

N – обороты ротора, об./мин.

Эмпирическое соотношение (2.2) гарантирует от установки недопустимого дисбаланса с точки зрения прочности подшипников.

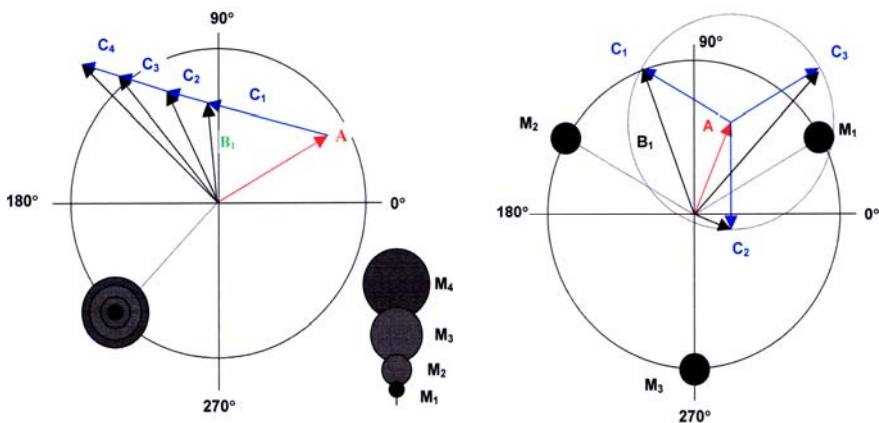


Рис. 2.5. Пояснения о линейности колебательной системы

Положение установки пробного груза произвольно – в любом удобном месте на балансировочной плоскости.

После пуска ротора с пробным грузом измеряется вектор вибрации B (рис. 2.4) и принимается решение о том удачно или нет установлен пробный груз. Определяющее значение имеет изменение фазы вибрации от установки $M_{пр}$, т.е. для получения корректных данных для балансировочного расчета, необходимо, чтобы вектор B сместился относительно вектора A не менее чем на 20–30 градусов. При этом по величине он может оставаться неизменным.

Если этого не произошло, значит, положение или вес пробного груза выбраны неудачно, и его надо переместить на 90 градусов и повторить измерения. Иногда это приходится проделывать несколько раз, что необходимо, поскольку правильно выбранный пробный груз и корректные исходные данные гарантируют качество и быстроту выполнения балансировки. Попытки быстрее провести балансировочный расчет с исходными данными, где отлчия между векторами A и B находятся в пределах аппаратурной точности измерения параметров, приведут к бесполезной трате времени.

В случаях, когда приходится заниматься балансировкой большого количества однотипных механизмов, оптимальный пробный груз может быть определен статистически.

В классических методах балансировки (рис. 2.4, 2.5), необходимо измерять векторы вибрации A и B , т.е. **определять уровни и фазы вибрации на частоте вращения.**

Уровень вибрации обычно измеряется в достаточно узкой полосе частот в районе частоты вращения ротора. Выбор полосы анализа должен производиться исходя из следующего:

- преобладающей по уровню в полосе анализа должна быть вибрация оборотной частоты;

- полоса анализа должна перекрывать возможную нестабильность поддержания оборотов;

- чем уже полоса анализа, тем круче фазовая характеристика фильтра и, соответственно, небольшие изменения оборотов ротора могут привести к существенным фазовым изменениям, внесенным чисто аппаратурным путем и никак не связанным с самим вибрационным процессом.

При этом абсолютные фазовые углы значения не имеют, важно для балансировки только взаимное фазовое положение векторов вибрации и пробных масс. Смещение начала отсчета фазы в любом направлении, никак не скажется на конечном результате, поэтому начало отсчета фазы вибрации может быть любым, удобным пользователю. Это может быть момент, определяемый импульсом с датчика оборотов; метка на любом месте статора при стробоскопическом отсчете фазовых углов и пр.

Существует два подхода к балансировке механизмов, имеющих несколько балансировочных плоскостей.

Первый подход заключается в том, что каждой балансировочной плоскостью занимаются отдельно. Сначала добиваются минимальных уровней грузами первой балансировочной плоскости, фиксируют эти грузы и больше их не трогают. Если требуемые уровни вибрации еще не достигнуты, то полученное вибрационное состояние принимается за исходное и минимизируются уровни вибрации грузами во второй плоскости. И так далее последовательно для всех плоскостей, или пока не будет достигнут требуемый результат.

Второй подход заключается в том, что последовательно производятся пуски механизма с пробными грузами в каждой плоскости, а затем за один раз рассчитывается система уравновешивающих масс сразу для всех плоскостей.

Оба пути приводят к одним и тем же остаточным уровням вибрации. Различие в том, что первый путь проще в исполнении, но приводит к установке на ротор лишней массы. Вторым путем сложнее, но позволяет установить оптимальную систему уравновешивающих

масс, т.е. минимально компенсирующих влияние друг друга на уровни вибрации в одной и той же точке контроля.

Таким образом, *одноплоскостная балансировка* может выполняться в двух случаях:

- если на механизме физически только одна балансировочная плоскость;
- если на механизме несколько плоскостей, но для балансировки принят метод последовательного обхода плоскостей.

Описание лабораторной установки

Конструкция стенда «Протон-стенд» для динамической балансировки представлена на рис. 1.4.

На трех балансировочных плоскостях модели высверлены по 16 отверстий *M4*, предназначенных для размещения балансировочных масс (винтов *M4* различного исполнения и массы).

Порядок выполнения работы

А. Автоматический режим

Как правило, балансировку можно провести в режиме автоматического ввода данных. Это возможно, когда механизм работает стабильно, и значения вибрации достаточно постоянны. В этом случае необходимо выполнить следующие действия.

А.1. Выполнить подготовительные работы.

А.1.1. Установить акселерометр. Место для установки акселерометра должно представлять собой ровную металлическую поверхность размером порядка 20×20 мм, зачищенную от краски, грязи, ржавчины и пыли. Для достоверного и полностью корректного проведения виброизмерений в частотном диапазоне работы прибора (10–1000 Гц) наилучшим вариантом крепления датчика в точке контроля является магнитный прижим, входящий в комплект поставки прибора. Он обеспечивает нормированный прижим датчика к поверхности, достоверность и повторяемость результатов измерений.

А.1.2. Установить оптоэлектрический таходатчик. На открытом участке ротора, в месте, доступном для установки таходатчика, наклеить на ротор полоску световозвратной пленки (входит в

комплект поставки) размером примерно 10×20 мм. Использование данной пленки позволяет снизить требования к подготовке поверхности ротора.

Для определенности лучше угловое положение метки на роторе совместить с началом угловой разметки ротора.

Таходатчик необходимо закрепить с помощью магнитной стойки таким образом, чтобы его ось была направлена к оси вращения ротора, а сам он был расположен в плоскости метки, нанесенной на роторе. Угол между нормалью к поверхности ротора и осью датчика может варьироваться от 0 до 45°. В условиях сильных внешних засветок путем изменения угла можно повысить помехоустойчивость датчика. Расстояние от торца датчика до вала в диапазоне 10–100 мм.

При правильной установке датчика при прохождении метки на торце усилительного блока датчика загорается красный светодиод.

А.1.3. Произвести угловую разметку ротора. Угловая разметка ротора должна быть выполнена при соблюдении одного обязательного условия: *направление угловой разметки должно быть противоположным направлению вращения ротора* (рис. 2.6). Где расположить начало разметки – значения не имеет.



Рис. 2.6. Разметка балансировочной плоскости

Как конкретно нанести разметку на ротор, тоже всегда может решить сам оператор, в зависимости от объекта балансировки: это может быть фактическая угловая разметка в градусах от 0 до 360, это может быть просто последовательная нумерация лопастей

(например, на вентиляторе), или отверстий на соединительной муфте ротора и т.д.

А.1.4. Подготовить балансировочные грузы. На некоторых механизмах (мощные электродвигатели, насосы, турбоагрегаты и т.д.) имеются специальные балансировочные плоскости, конструктивно оборудованные для решения задач динамической балансировки. Как правило, такие механизмы поступают к потребителям с уже установленными грузами от заводской балансировки и имеют комплект грузов для подбалансировки механизма в процессе эксплуатации. Тогда надо пользоваться этими грузами.

В большинстве же случаев необходимые грузы можно изготавливать самостоятельно в зависимости от конструкции балансировочной плоскости.

А.2. Убедиться в работоспособности прибора «Протон-баланс» по соответствию показаний паспортным данным на прибор, включив его в режим «КОНТРОЛЬ».

А.3. Настроить таходатчик. При этом зеленый светодиод на корпусе усилителя таходатчика должен гореть (наличие питания), а красный светодиод, при правильной установке метки и датчика, должен мигать или гореть постоянно. Убедиться по показаниям индикатора прибора в том, что обороты ротора соответствуют ожидаемым. Для этого используйте режим «ВИБР.АНАЛИЗ» или пункт измерений в режиме «БАЛАНСИРОВКА».

Если прибор показывает нулевые обороты, или его показания существенно отличаются от ожидаемых, красный светодиод не горит или горит хаотично, необходимо проверить установку таходатчика (варьировать расстояние фотоприемной головки от ротора).

А.4. Перевести прибор в режим «БАЛАНСИРОВКА». Установить желаемое количество точек контроля и плоскостей.

Перейти в пункт «НАЧ.ИЗМЕРЕНИЕ» и выполнить автоматический съем данных в соответствующей точке (клавиша «↵»).

А.5. Выполнить измерения амплитуд и фаз векторов вибрации по всем выбранным для контроля точкам механизма.

Надежным показателем того, что механизм может быть отбалансирован, является повторяемость результатов измерений при нескольких пусках механизма. Обычно отличия по амплитуде

не превышают 5–10 % от измеренного первоначально значения, отличия по фазе лежат в пределах нескольких градусов.

Если от пуска к пуску хотя бы один из параметров (амплитуда или фаза) существенно меняется, продолжать балансировку бесполезно. Необходимо остановить механизм и устранить причину нестабильности. Обычно это бывает связано с повышенными люфтами в подшипниковых узлах ротора, разболтанностью крепления механизма или дефектами фундамента.

А.6. Остановить механизм.

А.7. Установить в плоскости балансировки пробный груз. Угол $\varphi_{пр}$ установки пробного груза произволен, его масса $M_{пр}$ ориентировочно может быть определена из соотношения (2.2).

Расчет пробного груза можно производится согласно режима «РАСЧЕТЫ» → «ПРОБНЫЙ ГРУЗ».

А.8. Включить механизм, убедиться в том, что он вышел на рабочие обороты и режим его работы стабилизировался.

А.9. Выполнить измерения амплитуды и фазы вектора вибрации с установленным пробным грузом по пункту «ПРОБНЫЙ ГРУЗ».

При проведении измерений с пробным грузом важно, чтобы от внесения пробного груза изменилась относительно исходного состояния фаза вектора вибрации и не менее чем на 20–30 градусов, либо заметно изменился (уменьшился или увеличился) уровень вибрации. Если этого не произошло, значит механизм «не чувствует» пробного груза, т.е. либо он установлен не в том месте, либо мала его масса. Обычно в таких случаях следует один-два раза переместить груз на 90 градусов, не меняя его величины и повторить измерения. Если это не дает желаемого результата, можно повторить эти же операции с грузом, увеличенным по массе примерно на 50 %. В любом случае, до тех пор, пока машина не «почувствует» пробный груз, двигаться дальше и делать балансировочный расчет бесполезно.

А.10. Выполнить балансировочный расчет по результатам измерений в исходном состоянии и с пробным грузом (пункты «РЕЗУЛЬТАТЫ → РАСЧЕТ ГРУЗОВ»).

А.11. Измерить амплитуду и фазу вектора вибрации с расчетным уравновешивающим грузом. Остановить механизм, снять с ротора пробный груз установить расчетный уравновешивающий груз.

Включить механизм, дождаться выхода на рабочие обороты и стабилизации режима, измерить получившиеся амплитуду и фазу вектора вибрации в точке контроля;

А.12. Закончить балансировку, если достигнутый в ее результате уровень вибрации удовлетворительный. Если уровень вибрации понизился, но еще недостаточно, то необходим просто повторить балансировочный расчет.

Для этого необходимо записать на бумаге результаты, полученные в пункт «РАСЧЕТ ГРУЗОВ», и вручную ввести их в качестве данных с пробным грузом. Повторите расчет по пунктам «РЕЗУЛЬТАТЫ → РАСЧЕТ ГРУЗОВ». Расчет покажет, насколько надо изменить величину и переместить груз, стоящий в настоящее время на роторе, для того, чтобы еще понизить вибрации ротора. Как правило, одной-двух описанных итераций оказывается достаточно, чтобы добиться необходимого результата по сбалансированности ротора;

А.13. После завершения балансировки проконтролировать уровни и фазы вибрации на остальных контрольных точках механизма (если они были), которые не учитывались при проведении балансировки, с целью убедиться в том, что на них не произошло неприемлемого увеличения вибрации.

Если это произошло, то необходимо выполнить балансировку с учетом и этих точек.

Примечание. Удобно величину пробного груза принимать равной 100 %, тогда уравнивающий груз будет выражен в процентах от пробного груза. Фазу установки пробного груза можно принять за 0, тогда место установки уравнивающего груза будет определяться от места установки пробного груза против направления вращения.

А.14. Остановить механизм, снять с него датчики и кабели и обеспечить надежное закрепление балансировочного груза на роторе.

Б. Ручной режим

При нестабильных показаниях вибрации возможен ручной режим работы. Последовательность действий при этом.

Б.1. Выполнить подготовительные работы (см. п. А.1).

Б.2. Включить прибор в режим «КОНТРОЛЬ» (см. п. А.2).

Б.3. Настроить таходатчик (см. п. А.3).

Б.4. Перевести прибор в режим «БАЛАНСИРОВКА»:

– установить требуемое количество точек контроля и плоскостей;

– перейти в пункт «НАЧАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ» и выполнить автоматический съем данных соответствующей точке.

Б.5. По всем выбранным для контроля точкам механизма выполнить измерения амплитуд и фаз векторов вибрации, зафиксировать результаты вместе с показаниями оборотов, на которых проводились измерения. Выбрать точки с наибольшими уровнями вибрации, все последующие измерения и балансировку можно выполнять по результатам измерений в этих точках.

Б.6. Остановить механизм, дождаться полной остановки ротора (не применяя для торможения каких-либо подручных средств).

Б.7. Запустить механизм, убедиться, что он вышел на те же рабочие обороты ($\pm 5-10$ об./мин) и повторить измерения амплитуды и фазы в выбранных для балансировки точках контроля.

Повторить операции два-три раза, чтобы убедиться в воспроизводимости и повторяемости результатов измерения при независимых запусках ротора из произвольных угловых положений.

Полученные по нескольким пускам результаты измерения амплитуды и фазы усреднить. Это и будет исходным состоянием вектора вибрации (A, α) с неизвестным дисбалансом ротора, который и необходимо минимизировать в результате балансировки.

Б.8. Остановить механизм.

Б.9. Установить в плоскости балансировки пробный груз ($M_{пр}, \varphi_{пр}$).

Б.10. Включить механизм, убедиться в том, что он вышел на рабочие обороты и режим его работы стабилизировался.

Б.11. Выполнить измерения амплитуды и фазы вектора вибрации с установленным пробным грузом. Теперь эти и, при необходимости, последующие измерения можно выполнять по одному пуску механизма. Полученные результаты (B, β) характеризуют вектор вибрации, получаемый при добавлении к исходному, неизвестному дисбалансу, определенно известного дисбаланса от пробного груза.

Полученных данных достаточно для балансирующего расчета, т.е. определения необходимых величины и места установки ($M_{ур}, \varphi_{ур}$) уравнивающего груза, минимизирующего исходный дисбаланс ротора.

При проведении измерений с пробным грузом убедиться, что механизм «чувствует» пробный груз (см. п. А.9).

Б.12. Заполните таблицу измерений (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Результаты балансировки

Исходные измерения		Пробный груз		Пробные измерения		Результаты	
Виброскорость V , мм/с	Фаза F , град	Масса P , г	Угол установки ϕ , град	Виброскорость V , мм/с	Фаза F , град	Масса груза M , г	Угол установки ϕ , град
A	α	$M_{пр}$	$\phi_{пр}$	B	β	$M_{ур}$	$\phi_{ур}$

Б.13. По табличным данным выбрать нужное количество точек и плоскостей в пункте «ПАРАМЕТРЫ». Внести вручную данные по пунктам «НАЧ.ИЗМЕРЕНИЕ» и «ПРОБНЫЙ ПУСК» (переход в режим ручного ввода с помощью кнопки «0»).

По результатам измерений в исходном состоянии и с пробным грузом выполните балансировочный расчет (пункты «РЕЗУЛЬТАТЫ → РАСЧЕТ ГРУЗОВ»). Остановить механизм, снять с ротора пробный груз и установить расчетный уравнивающий груз. Включить механизм, дождаться выхода на рабочие обороты и стабилизации режима, измерить получившиеся амплитуду и фазу вектора вибрации в точке контроля.

Б.14. Если достигнутый в результате балансировки уровень вибрации удовлетворительный, на этом балансировка заканчивается.

Если уровень вибрации понизился, но еще недостаточно, то необходимо просто повторить балансировочный расчет, но вводя в качестве данных с пробным грузом результаты, полученные при предыдущем расчете. Результаты в исходном состоянии вводятся те же самые, что и при первоначальном расчете. Расчет покажет, насколько надо изменить величину и переместить груз, стоящий сейчас на роторе, для того, чтобы еще понизить вибрации ротора. Как правило, одной-двух описанных итераций оказывается достаточно, для достижения необходимого результата.

Б.15. После завершения балансировки необходимо проконтролировать уровни и фазы вибрации, получившиеся при этом на остальных контрольных точках механизма (если они были), кото-

рые учитывались при проведении балансировки по точкам с максимальными уровнями вибрации, с целью убедиться в том, что на них не произошло увеличения уровней до неприемлемых величин. Если это произошло, то необходимо выполнить балансировку с учетом и этих точек. На этом балансировка закончена.

Отметим, что если есть уверенность в механизме, то проводить несколько пусков для проверки воспроизводимости результатов перед началом балансировки не обязательно.

После завершения балансировки остановить механизм, снять с него датчики и кабели и обеспечить надежное закрепление балансировочного груза на роторе.

Меры безопасности

При работе с приборами необходимо соблюдать те же меры безопасности, что и при выполнении лабораторной работы № 1 данного лабораторного практикума.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- ответы на контрольные вопросы;
- описание учебного стенда и приборов для проведения балансировки;
- порядок проведения балансировки с использованием прибора «Протон-баланс»;
- таблицы результатов измерений;
- анализ произведенных работ по снижению уровня вибрации;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Как дисбаланс влияет на вибрацию ротора? Перечислите основные причины появления дисбаланса.
2. Статическая и динамическая неуравновешенность.
3. Способы балансировки роторов.

4. Особенности динамической балансировки гибких и жестких роторов.
5. Приборы, используемые для контроля параметров вибрации.
6. Подготовка ротора и станка перед балансировкой.
7. Расчет массы и места установки балансировочных грузов.
8. Правила техники безопасности при обслуживании балансировочного станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
2. Гольдин, А. С. Устранение вибраций турбоагрегатов на тепловых электростанциях / А. С. Гольдин. – М.: Энергия, 1980. – 96 с.
3. Рунов, Б. Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов / Б. Т. Рунов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с.
4. МУ 34-70-162-87. Методические указания по балансировке многоопорных валопроводов турбоагрегатов на электростанциях. – Союзтехэнерго, 1988.

Учебное издание

**ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА И РЕМОНТА
ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

*Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-43 01 04
«Тепловые электрические станции»*

В 2 частях

Часть 2

Составители:

КАЧАН Светлана Аркадьевна
ГЕРАСИМОВА Алина Георгиевна

Технический редактор *Д. А. Исаев*
Компьютерная верстка *Д. А. Исаева*

Подписано в печать 13.12.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,82. Тираж 100. Заказ 712.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.