

**12/15/2**

**Одобрено кафедрой  
«Локомотивы и локомотивное  
хозяйство»**

# **ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**Задания на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов VI курса**

**специальности**

**181400 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭПС)**

**направления**

**657600 ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**



**Москва – 2005**

Задания на контрольную работу с методическими указаниями составлены в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Диагностические комплексы электроподвижного состава» по специальности 181400 Электрический транспорт железных дорог (ЭНС).

С о с т а в и т е л ь — канд. тех. наук, доц. Кун А.П.

Р е ц е н з е н т — канд. тех. наук, доц. Голубцов В.

## ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выполнение контрольной работы ставит своей целью помочь студентам усвоить исходные положения, сложившиеся в настоящее время в сфере применения диагностических комплексов, и приобрести навыки практических расчетов, предусмотренных рабочей программой. Контрольную работу следует выполнять в виде расчетно-пояснительной записки в соответствии с ЕСКД. Числовые данные, не имеющие обозначения, подразумеваются указанными в СИ. На обложке указать название дисциплины, факультет, курс, фамилию и инициалы, учебный шифр студента, в правом нижнем углу — адрес. Работу необходимо написать аккуратным, разборчивым почерком, без сокращения слов. Готовую работу подписать, указать дату и выслать в институт в сроки, установленные учебным планом.

Если контрольная работа не зачтена, следует выполнить требования рецензента и выслать исправленную контрольную работу для повторной проверки. Все исправления и дополнения выполнять на отдельных листах, вклеенных в соответствующие места работы. Стирать, зачеркивать и заклеивать замечания рецензента запрещается.

Контрольная работа, в которой не соблюдены указанные выше требования, а также работа, выполненная студентом не по своему варианту, не зачитывается.

### 1. Обоснование метода измерения при диагностировании узла электрооборудования ЭПС

*Задание.* Для указанной неисправности выбрать метод измерения, реализуемый серийным диагностическим комплексом, и кратко (в пределах одной страницы) описать его особенности и возможности применения. Данные для выполнения выбрать по табл. 1 и тексту методических указаний к контрольной работе. Дополнительную информацию можно найти в примерах к некоторым разделам заданий и в приложении.

Таблица 1

Предпоследняя цифра учебного шифра	Заданная неисправность
0	Межвитковое замыкание якорей и обмоток возбуждения двигателей
1	Нарушение настройки нейтрали электрических машин постоянного тока
2	Несоответствие нормы сопротивления якорной цепи и обмоток возбуждения
3	Межвитковые замыкания катушек реле, контакторов и индуктивных шунтов
4	Несоответствие нормам времени включения и отключения реле и контакторов
5	Выход из допусков переходного сопротивления контакторов
6	Выход из допусков индуктивности приемных катушек АЛСН
7	Нарушение секвенции включения аппаратов от контроллера машиниста
8	Выход из допусков пусковых сопротивлений (малых сопротивлений)
9	Выход из допусков тока включения и отключения электромагнитных реле и контакторов

### Методические указания и порядок выполнения

На основе современных серийных приборов и их алгоритмов ниже кратко изложены принципы измерения. При определении межвиткового замыкания диагностические комплексы, аналогичные серии «Доктор» реализуют следующие методы измерения.

В связи с тем, что электрическая катушка контактора или обмотка электродвигателя обладают индуктивностью, это может характеризовать их техническое состояние. По аналогии с емкостью, накапливающей в себе энергию электрического поля, индуктивность накапливает в себе энергию магнитного поля. При изменении электрического тока в цепи, содержа-

шей индуктивность, возникает явление электромагнитной индукции; индуктивность препятствует изменению тока.

При определении межвиткового замыкания измеряется падение напряжения на неизвестной катушке с индуктивностью  $L_x$ . Ток низкой частоты можно задавать с помощью генератора и набора добавочных резисторов  $R_d$  определенного сопротивления.

При выполнении условия  $R_d > 2\pi F_{\text{ген}} L_x$  получим:

$$L \approx U_x R_d / U_{\text{ген}} 2\pi F_{\text{ген}},$$

где  $U_x$  — падение напряжения на катушке  $L_x$ , которое пропорционально контролируемой индуктивности;

$U_{\text{ген}}$  — напряжение, выдаваемое генератором;

$F_{\text{ген}}$  — частота, выдаваемая генератором.

Для контроля пределов измерения индуктивности кроме переключения  $R_d$  производится переключение частоты генератора треугольного напряжения, подключаются эталонные резисторы и контролируемая индуктивность. Амплитуда меандра определяет величину индуктивности, при наличии межвиткового замыкания амплитуда резко падает, т.е. уменьшается индуктивность (в сравнении с эталонным значением).

При контроле времени включения аппарата на вентиляную катушку аппарата подают постоянное напряжение 48 В и одновременно запускают таймер микропроцессора. Программа контролирует замыкание контактов аппарата. В момент замыкания контактов таймер останавливается. Результат замера записывают на флэш-диск (DiskOnChip) встроенного компьютера прибора.

При контроле времени отключения аппарата на вентиляную катушку аппарата подают постоянное напряжение 48 В. Программа контролирует замыкание контактов аппарата. В момент замыкания контактов подачу напряжения 48 В прекращают и запускают таймер микропроцессора. Программа контролирует размыкание контактов аппарата. При размыкании контактов

таймер останавливается. Результат контроля времени отключения записывают на флэш-диск.

Для определения переходного сопротивления от генератора тока через контролируемое сопротивление проходит эталонный ток. По падению напряжения на контролируемом сопротивлении оценивают его величину. Результат замеров записывают на флэш-диск.

Для контроля смещения геометрической нейтрали используют отношение напряжений на обмотках электрических машин постоянного тока. На якорную обмотку подают переменное напряжение, а на обмотке возбуждения напряжение измеряют. За счет трансформаторной связи между якорной обмоткой и обмоткой возбуждения на обмотке возбуждения наводится ЭДС. Отношение напряжений дает коэффициент, пропорциональный состоянию геометрической нейтрали. При отклонении геометрической нейтрали от нормы коэффициент увеличивается, т.е. при возрастании показания состояние нейтрали ухудшается. Необходимо добиться того, чтобы коэффициент был равен нулю.

Результат замера записывают на жесткий флэш-диск (DiskOnChip) встроенного компьютера прибора.

$$K = (U_{\text{возб}} / U_{\text{як}}) — \text{коэффициент трансформации,}$$

где  $U_{\text{возб}}$  — напряжение обмотки возбуждения;

$U_{\text{як}}$  — напряжение якорной обмотки.

В зависимости от количества щеткодержателей щеточного аппарата электродвигатели имеют разное угловое межщеточное перемещение якоря.

Существующая методика измерения [4] позволяет: выявить нарушения угла установки нейтрали электродвигателя, неплотное прилегание щеток к коллектору, загрязнение коллектора, а также межвитковое замыкание якоря. Количество выбранных секторов соответствует количеству замеров плюс одно, которые необходимо сделать в режиме «ТЕСТЕР» и занести на бумагу.

После проведенного контроля сравнивают отклонение минимального от максимального значения коэффициента, характеризующего смещение геометрической нейтрали; разница более 20% указывает на наличие межвиткового замыкания якоря.

Изложенные методы и алгоритмы следует проанализировать в соответствии с табл. 1 и сделать выбор для заданной неисправности. Физическая сущность применяемых методов подробно рассматривают, в например [1; 2] и курсах электрических измерений. Необходимо отметить, что эти методы не являются единственными, поскольку в теории известно несколько альтернативных возможностей определения электрических параметров.

## 2. Расчет частот сигналов вибродиагностики колесно-моторного блока для определения их в спектре

*Задание.* Определить информативный набор частот вибродиагностики подшипника (с заданными конструктивными отличиями) в составе колесно-моторного блока. Результаты представить в виде сводной таблицы (табл. 2) с приведенными соответствующими расчетами.

Таблица 2

Гармоники Частота, Гц	1	2	3	4	5
$f_{вр1}$					
$f_{вр2}$					
$f_{z12}$					
$f_c$					
$f_{тк}$					
$f_n$					
$f_v$					

Условные обозначения, принятые в таблице, рассмотрены в тексте методических указаний. Исходные данные по вариантам выполнения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Последняя цифра учебного шифра	Тип диагностируемого подшипника	Диаметр тела качения $d_{тк}$	Диаметр наружного кольца $d_{нар}$	Диаметр внутреннего кольца $d_{вн}$	Число тел качения $N_{тк}$	Угол кон-такта тел и дорожек качения $\alpha$	$f_{пр}$ колесной пары, об/мин
0	Буксовый	33	320	180	18	0	220
1	Якорный моторного вагона	32	250	130	14	0	180
2	Якорный	56	360	140	12	0	200
3	Якорный моторного вагона	32	252	130	14	0	180
4	Якорный	54	362	140	12	0	220
5	Буксовый	33	322	180	18	0	180
6	Якорный моторного вагона	32	254	130	14	0	220
7	Якорный	54	364	140	12	0	180
8	Буксовый	33	324	180	18	0	200
9	Якорный моторного вагона	32	256	130	14	0	220



## Методические указания и порядок выполнения

Дефекты, возникающие при изготовлении, монтаже и эксплуатации подшипника качения в составе роторной машины, оказывают влияние на все составляющие вибрации подшипникового узла, определяемые работой подшипника.

В первую очередь эти дефекты влияют на свойства сил трения в подшипнике и возбуждаемую ими случайную высокочастотную вибрацию подшипникового узла. Наиболее эффективным методом исследования свойств этой вибрации является спектральный анализ ее огибающей.

При появлении многих видов дефектов в результате контакта дефектных участков одних поверхностей с другими поверхностями трения качения могут возникать короткие ударные импульсы, возбуждающие вибрацию подшипникового узла в широкой области частот. Анализировать свойства этой вибрации можно путем спектрального анализа как низкочастотных и среднечастотных составляющих, так и огибающей ее высокочастотных составляющих.

При значительном износе поверхностей качения из-за их неровностей возникает низкочастотная вибрация всей машины. Этот вид вибрации наиболее эффективно можно исследовать методами спектрального анализа низкочастотных и среднечастотных составляющих вибрации не только подшипникового узла, но и машины в целом.

Для диагностики подшипниковых узлов с подшипниками качения применимы два варианта. В задачах раннего обнаружения дефектов по однократным измерениям вибрации используют только результаты спектрального анализа огибающей случайной высокочастотной вибрации. Также действуют и для долгосрочного прогноза состояния подшипников качения. Второй вариант используют для наблюдения за развитием дефектов и для краткосрочного прогноза состояния подшипниковых узлов тогда, когда дефекты становятся аварийно опасными. Он основан на анализе не только спектров огибающей случайной высокочастотной вибрации подшипникового узла, но и на анализе спектров низкочастотной и среднечастотной

вибрации. Необходимо отметить, что именно при втором варианте диагностики подшипников одновременно обеспечивается и диагностика ротора машины.

Наличие особых режимов работы подшипников качения в машинах с механическими передачами, например зубчатыми, ременными, червячными и другими, приводит к тому, что правила диагностики подшипников сильно меняются. Поэтому в программах организованы специальные алгоритмы диагностики подшипников в составе механических передач, в том числе редукторов.

Поскольку на вибрацию подшипникового узла влияет не только вид и величина дефекта подшипника качения, но и режим его работы, в том числе вид нагрузки на поверхности трения, при автоматической диагностике решают одновременно две задачи, а именно, определяют особенности работы подшипника. Затем, с учетом этих особенностей, определяют вид и глубину имеющихся в подшипнике дефектов. Поэтому особенности работы подшипника указывают в программе в терминах дефектов, если они оказывают негативное влияние на его ресурс. Именно из-за этих особенностей работы подшипника, к которым в первую очередь, относится обкатывание, в том числе частичное, поверхностью внутреннего кольца неподвижной поверхности качения через тела качения, число правил, используемых при автоматической диагностике подшипника, достигает нескольких сотен. За счет увеличения числа этих правил значительно увеличивается достоверность диагноза и прогноза состояния подшипника качения.

Из режимов работы подшипника качения, влияющей на его вибрацию и ресурс, необходимо выделить следующие:

- режим статической нагрузки на подшипники (нормальный режим);

- режим обкатывания неподвижного кольца, в том числе частичного;

- режим автоколебаний ротора в подшипниках качения;

- режим с действием на подшипник внешней динамической нагрузки.

Из дефектов изготовления подшипников качения, влияющих на его вибрацию, необходимо выделить следующие:

- неровности поверхности трения внутреннего кольца;
- неровности поверхности трения наружного кольца;
- неровности поверхности трения тел качения;
- разноразмерность тел качения;
- дефекты смазки.

Из дефектов монтажа подшипника в подшипниковом узле необходимо выделить следующее:

- повышенный неоднородный радиальный или осевой натяг подшипника;

- перекос неподвижного кольца подшипника;
- проскальзывание кольца в посадочном месте;

В результате износа во время эксплуатации машины в подшипнике качения могут возникнуть следующие дефекты, обнаруживаемые по вибрации:

- износ наружного кольца;
- раковины, трещины на наружном кольце;
- износ внутреннего кольца;
- раковины, трещины на внутреннем кольце;
- износ тел качения;
- сколы, трещины на телах качения;
- износ, трещины на сепараторе;
- дефекты смазки.

Из дефектов других узлов, непосредственно влияющих на работу подшипника качения и его вибрацию, без учета динамических нагрузок со стороны других машин, связанных с валом диагностируемой машины, следует выделить:

- неуравновешенность ротора;
- дефекты линии вала и соединительных муфт;

- ослабление креплений подшипниковых узлов к корпусу машины и машины к фундаментальным конструкциям.

Существуют четыре разных подхода к диагностике подшипников качения, в зависимости от наработанного ресурса и конструктивных особенностей машины [3].

Первый подход — диагностика подшипников качения в процессе эксплуатации машины, при условии отсутствия дефектов изготовления подшипника, установленного в машину без узлов ударного действия и с одной линией вала. Это самый ши-

роко распространенный случай, когда для обнаружения дефектов монтажа и эксплуатации достаточно измерить только спектр огибающей высокочастотной вибрации, и всего один раз. В этом случае идентифицируются следующие группы дефектов:

- обкатывание неподвижного кольца подшипника;
- неоднородный радиальный натяг;
- перекос неподвижного (наружного) кольца;
- износ наружного кольца;
- раковины, трещины на наружном кольце;
- износ внутреннего кольца;
- раковины, трещины на внутреннем кольце;
- износ тел качения и сепаратора;
- раковины, сколы на телах качения;
- сложные (двойные и т.п.) дефекты;
- проскальзывание кольца в посадочном месте;
- дефекты смазки (старение, недостаток, посторонние примеси и т.п.).

Первый подход включает в себя не дефекты, а режимы работы подшипника, поскольку обкатывание неподвижного кольца подшипника отражает лишь условия его работы, сокращающие ресурс. Вторая и третья группы включают в себя наиболее опасные дефекты монтажа, также значительно сокращающие ресурс подшипника. Все остальные группы включают в себя дефекты, являющиеся следствием неправильной эксплуатации или износа подшипника.

Второй подход дополняет первый и рассчитан на диагностику подшипников качения механических передач, в том числе редукторов, по спектру огибающей вибрации. Дополнительным условием для его использования является не только отсутствие дефектов изготовления, но и дефектов монтажа, поскольку последние крайне сложно отделить от дефектов собственно передачи, например, от дефектов шестерен, валов и т.д. Поэтому подобный подход применяют после того, как подтверждено отсутствие дефектов монтажа подшипников в новой машине с использованием первого подхода. Число групп дефектов подшипника качения при втором подходе снижается за счет объединения их с группами дефектов других узлов механичес-

кой передачи. Например, такие дефекты, как обкатывание и неоднородный радиальный натяг, объединяются в одни группы с боем вала и дефектом передачи соответственно. Достаточно редко встречающийся дефект – проскальзывание колец в посадочном месте, также объединяется с дефектами других узлов передачи, поскольку его крайне сложно разделить, например, с дефектом в виде сколов на зубьях шестерен или отсутствия одного или нескольких зубьев.

Третий подход – диагностика подшипников качения совместно с другими узлами машины по периодическим измерениям вибрации. Этот подход как основной используется в локомотивном депо, поскольку он дает возможность вести подробный контроль за развитием дефектов, как подшипника, так и других узлов, когда они достигают значительных величин, а пользователь не может остановить машину для проведения профилактического ремонта, и ему необходимо получить краткосрочную оценку остаточного ресурса машины. Такой подход не позволяет ограничиться измерением только спектров огибающей высокочастотной вибрации подшипниковых узлов, и требует включения в алгоритмы диагностики результатов периодических измерений спектров низкочастотной вибрации. В этом случае в список обнаруживаемых и контролируемых дефектов включаются также дефекты ротора, соединительных муфт, узлов креплений. Полный список обнаруживаемых групп дефектов в этом случае также изменяется.

Четвертый подход – выходной контроль подшипников качения после изготовления или ремонта. Для такого контроля необходим обязательный учет конструктивных особенностей устройства, обеспечивающего вращение контролируемого подшипника под разными нагрузками. Алгоритмы такого контроля должны использовать методы спектрального анализа низкочастотной и среднечастотной вибрации подшипника для обнаружения неровностей поверхностей качения, с учетом той вибрации, которая возбуждается из-за вращения деталей устройства вращения, а также методы спектрального анализа огибающей высокочастотной вибрации или шума для обнаружения сколов на поверхностях качения, скрытых трещин и усталостных повреждений металла. Такие алгоритмы и пакеты про-

грамм разрабатывает и адаптирует только под конкретное устройство вращения подшипников.

Работа подшипника качения в составе роторной машины при наличии в нем дефектов может оказывать влияние на вибрацию и модулирующие ее процессы со следующими основными частотами:

частота вращения, например подвижного внутреннего кольца относительно неподвижного наружного  $f_{\text{вп}}$ ;

частота вращения сепаратора относительно наружного кольца:

$$f_c = \frac{0,5f_{\text{вп}}(1-d_{\text{тк}})}{d_c \cos(\alpha)},$$

где  $d_{\text{тк}}$  — диаметр тела качения;  
 $d_c = 0,5(d_{\text{н}} + d_{\text{в}})$  — диаметр сепаратора;  
 $d_{\text{н}}$  — диаметр наружного кольца;  
 $d_{\text{в}}$  — диаметр внутреннего кольца;  
 $\alpha$  — угол контакта тел и дорожек качения;

частота перекатывания тел качения по наружному кольцу:

$$f_{\text{н}} = \frac{0,5f_{\text{вп}}(1-d_{\text{тк}})}{d_c \cos(\alpha)} N_{\text{тк}} = f_c N_{\text{тк}};$$

где  $N_{\text{тк}}$  — число тел качения;

частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу

$$f_{\text{в}} = \frac{0,5f_{\text{вп}}(1+d_{\text{тк}})}{d_c \cos(\alpha)} N_{\text{тк}} = (f_{\text{вп}} - f_c) N_{\text{тк}};$$

частота вращения тела качения относительно поверхности колец:

$$f_{\text{тк}} = \frac{0,5f_{\text{вп}}d_c}{d_{\text{тк}}(1-d_{\text{тк}})/d_c \cos(\alpha)}.$$

Эти выражения определяют частоты только основных гармоник спектров вибрации и огибающей ее высокочастотных составляющих при различных видах дефектов. Существует еще

большое число различных гармоник с комбинационными частотами, которые могут быть наиболее сильными гармонически составляющими в указанных спектрах. Конкретное сочетание составляющих, характеризующих разные дефекты, определяется не только видом дефекта, но и свойствами нагрузки на подшипник, в частности, наличием вращающегося вектора нагрузки, перемещением в пространстве наиболее нагруженного участка поверхностей качения. Число возможных сочетаний признаков настолько велико, что без систем автоматического распознавания состояний получить диагноз с высокой достоверностью можно лишь в небольшом числе практических случаев.

Задача диагностики несколько усложняется, если в подшипнике качения неподвижным оказывается внутреннее кольцо, а не наружное, как это бывает в абсолютном большинстве практических случаев. Тогда в перечне основных частот следует заменить частоту вращения сепаратора  $f_c$  на частоту  $f_{вр} - f_c$  и внести ряд коррективов в признаки, которые связаны с появлением в спектрах вибрации и ее огибающей составляющих с комбинационными частотами.

Еще сложнее диагностировать подшипники с вращающимися внутренним и наружным кольцами. Это связано не только с изменением частотного состава составляющих спектра вибрации подшипниковых узлов, но и со сложностью измерения высокочастотной вибрации подшипника, которая хорошо передается только по неподвижным частям подшипника и корпуса подшипникового узла. Что касается частот в выше стоящих выражениях, то в них изменяется частота вращения  $f_{вр}$  на разностную частоту  $f_{вр1} - f_{вр2}$ , где  $f_{вр1}$ ,  $f_{вр2}$  — частота вращения колец подшипника. Кроме того, изменится и частота вращения сепаратора, которая заменяется на частоту  $f_{вр2} + f_c$ .

Во многих машинах с подшипниками, имеющими два вращающихся кольца, приходится отказываться от диагностики по спектру огибающей вибрации, либо выбирать для диагностики такой режим работы, при котором одно из колец подшипника оказывается неподвижным. Но встречаются и такие случаи, когда диагностика подшипника может быть выполнена по спектру огибающей вибрации корпуса машины, если, на-

пример, эта машина является двухвальным насосом, турбиной или компрессором. В этом случае колебания вала из-за дефекта межвального подшипника приводят к модуляции пульса потока и возбуждаемой ими случайной вибрации корпуса. Однако в рассматриваемых примерах конструкций колесно-моторного блока такие схемы не приводятся.

Каждая из рассмотренных групп дефектов имеет свои отличительные особенности формирования вибровынуждающих сил и вибрации подшипникового узла или машины в целом. Так, дефекты износа поверхностей качения и сепаратора лучше всего обнаруживать по модуляции сил трения и высокочастотной вибрации неподвижных элементов и корпуса подшипникового узла, по крайней мере, до того момента, когда эти дефекты разовьются до аварийно-опасного состояния. После этого, если пользователь не выполнил замену подшипника, рекомендуется переходить на контроль развития дефекта по низкочастотной вибрации машины. В тех случаях, когда невозможно контролировать высокочастотную вибрацию подшипникового узла, приходится обнаруживать и вести контроль появления и развития дефектов только по низкочастотной вибрации машины, пропуская при этом начальную фазу развития дефекта, и, следовательно, значительно сокращая длительность прогноза состояния подшипника.

Дефекты монтажа подшипников качения, если отсутствуют дефекты изготовления подшипников, также лучше всего обнаруживать по модуляции сил трения и высокочастотной вибрации подшипникового узла. Если же перед установкой нового подшипника нет уверенности в отсутствии дефектов собственно подшипника или посадочных мест, можно рекомендовать выполнять после установки полный контроль вибрации машины (выходной контроль). В последнем случае приходится проводить весь комплекс работ по вибрационной диагностике машины с измерением всех требуемых параметров вибрации и ее огибающей. Дефекты изготовления подшипников обнаруживаются при спектральном анализе вибрации подшипникового узла и огибающей ее высокочастотных составляющих во время выходного контроля новых подшипников, но при этом должны использоваться специальные алгоритмы кон-



троля и диагностики, адаптированные к конкретному устройству, обеспечивающему вращение подшипников, с целью исключить его влияние на результат выходного контроля. Большинство дефектов других узлов роторных машин, влияющих на ресурс диагностируемых подшипников качения, обнаруживаются методами совместной диагностики. Дефекты ротора, соединительных муфт, зубчатых передач и узлов крепления могут обнаруживаться и в рамках диагностики собственно подшипника качения. Для этого необходимо, кроме спектра огибающей высокочастотной вибрации подшипникового узла, измерять и спектр его низкочастотной вибрации.

Экран монитора позволяет визуализировать огибающую спектра продиагностированного колесно-моторного блока. Алгоритм программы диагностического комплекса серии «Вектор» по этому спектру позволяет определять такие сильные дефекты как износ наружного и внутреннего кольца моторно-якорного подшипника. Например, акселерометр (виброакустический датчик) устанавливался на подшипниковый щит тягового двигателя, что не помешало диагностической программе по автоспектру (прямому спектру) идентифицировать еще один дефект, относящийся к редуктору, — дефект шестерни. Это еще раз показывает, что дефекты зубчатого зацепления определяют при диагностике собственно подшипников, входящих в конструкцию. Поэтому при создании конфигурации диагностируемых узлов, имеющих в своем составе зубчатые передачи, необходимо диагностировать подшипник как подшипник качения редуктора. Это с успехом применяется в локомотивных депо при диагностике колесно-моторных блоков грузовых электровозов.

Основными узлами редуктора, испытывающими динамические нагрузки и подверженными износу, являются зубчатые зацепления, подшипники и соединительные муфты, связывающие редуктор с другими машинами. В случае грузового электровоза соединительные муфты отсутствуют. Дефекты зубчатых зацеплений приводят к появлению вынуждающих сил различной природы. Это могут быть и кинематические причины из-за отклонений формы зубьев от расчетной в зоне механического контакта, и ударные воздействия, определяемые из-

менением зазоров в зоне зубчатого зацепления, и параметрические силы из-за изменения жесткости зубьев в зоне зацепления, и, наконец, силы трения между контактирующими поверхностями. Природа появления вынуждающих сил в подшипниках может быть той же, что и в зубчатых зацеплениях.

Практически все основные виды дефектов зубчатых зацеплений, влияющие на их ресурс, приводят к изменению колебательных сил, действующих в зацеплении динамических нагрузок на шестерни и их подшипники. Это означает, что такие дефекты могут быть обнаружены по вибрации зубчатого зацепления.

В список дефектов зубчатых зацеплений, возникающих при монтаже и эксплуатации входят:

- бой зубчатого колеса;
- износ зубьев шестерни или зубчатых колес;
- трещины и сколы на зубьях, отсутствие отдельных зубьев;
- смещение точек контакта зубьев;
- дефекты смазки трущихся поверхностей.

Второй и третий дефекты, как правило, совпадают по виду влияния на вибрацию, а различия определяются лишь глубиной этого влияния. Именно поэтому эти два вида дефектов часто объединяются в одну группу.

Поскольку в состав редуктора входит, по крайней мере, одна зубчатая пара, первые три дефекта могут возникать на любом из зубчатых колес и возбуждать вибрацию на разных частотах. Частоты возбуждаемой вибрации зависят и от того, неподвижна ли ось вращения шестерни относительно корпуса редуктора, или она перемещается в пространстве, как это имеет место в сателлитах планетарного редуктора.

Дефекты зацепления обнаруживаются по росту зубцовых составляющих с кратностью  $k = 1, 2, 3, \dots$  в спектре вибрации. Дополнительным признаком является появление зубцовых составляющих в спектре огибающей высокочастотной вибрации подшипника, которые, однако, появляются не во всех случаях, когда имеет место дефект зацепления. Основное отличие диагностических признаков дефекта зацепления от дефектов зубьев шестерен заключается в отсутствии в первом случае заметного роста вибрации на гармониках частоты вращения шестерни и за-

метных боковых гармоник у зубцовых составляющих вибрации. Это явно просматривается на спектре.

Частоты вращения осей колесно-моторного блока грузового электровоза определяют по формуле

$$f_{\text{вр1}} = f_{\text{вр2}} \frac{Z_{21}}{Z_1} = f_{\text{вр1}} \cdot 3,826,$$

где  $f_{\text{вр1}}, f_{\text{вр2}}$  — частоты вращения первой и второй осей зубчатой передачи соответственно;

$Z_1$  — число зубьев на шестерне первой оси 23;

$Z_{21}$  — число зубьев на зубчатом колесе второй оси 88.

Для моторного вагона — 3,17.

Для определения частот вынуждающих сил и вибрации шестерни необходимо определить еще зубцовые частоты. Зубчатая передача колесно-моторного блока электровоза ВЛ10 одноступенчатая:

$$f_{1,2} = f_{\text{вр1}} Z_1 = f_{\text{вр2}} Z_{21},$$

где  $f_1$  — зубцовая частота передачи.

К диагностическим признакам дефектов щеточно-коллекторного узла, используемых в диагностических программах, также относится рост вибрации на соответствующих гармониках. Но этот признак можно считать лишь первичным, поскольку после его обнаружения выполняется весь комплекс дополнительных измерений, необходимый пользователю для идентификации дефекта системы возбуждения совместно с щеточно-коллекторным узлом. Дополнительными признаками дефектов щеточно-коллекторного узла являются:

появление боковых составляющих у гармоник вибрации якоря с частотами  $\pm kf_{\text{вр}}$ , причем преимущественно с четными гармониками  $k$ ;

появление искрообразования в зоне коллектора;

преимущественный рост вибрации щеточно-коллекторного узла, например, его кулисы;

преимущественный рост ряда гармоник, пропорциональных числу пластин коллектора, если число пластин больше числа зубцов якоря, частоты составляющих вибрации (табл. 4).

Таблица 4

Вид дефекта	Частоты составляющих вибрации	Примечания
Неуравновешенность якоря	$f_{вр}$ , нет роста $kf_{вр}$ , $k > 1$	
Бой вала (муфты)	$kf_{вр}$ , $k > 1$	Радиальное направление
Дефекты узлов крепления	УНЧ, ( $f < 0,5 f_{вр}$ )	Есть другие дефекты
Дефекты обмоток якоря	$kf_{вр}$ , $kf_z \pm k_1 f_{вр}$	Тангенциальное направление для $kf_{вр}$
Дефекты системы возбуждения	$kf_{вр}$ , нет $kf_z \pm k_1 f_{вр}$	
Дефекты щеточно-коллекторного узла	$kf_k$	
Пульсация напряжения питания	$kf_{п}$	Тангенциальное направление
Не идентифицированный дефект	Рост других гармонических составляющих	

В таблице приняты следующие обозначения:

$f_{вр}$  — частота вращения якоря;

$f_z$  — зубцовая частота;

$f_k$  — коллекторная частота;

$f_{п}$  — частота пульсаций напряжения питания;

УНЧ — составляющие вибрации на частотах менее  $1/2 f_{вр}$ ;

$k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $k_1 = 1, 2, 3, \dots$

Все эти дополнительные признаки пользователь должен учитывать самостоятельно, в зависимости от конкретных условий работы машины постоянного тока.

Особенно трудным является выбор точек контроля вибрации. Минимальные требования предъявляются к выбору точек контроля вибрации на корпусе подшипникового узла при массовой диагностике подшипников по однократным измерениям спектра огибающей вибрации. Подшипниковый щит у тягового двигателя, например ТЛ-2К1, имеет крышку с резьбовым крепежом. Поскольку между корпусом подшипникового щита, в который запрессовано наружное кольцо, и крышкой

есть дополнительная контактная поверхность, то непосредственного контакта крышки с подшипниковым кольцом может и не быть. Так как при диагностике под электровозом крышка закрыта кожухом зубчатой передачи, то точки контроля выбираются непосредственно на подшипниковом щите в местах наибольшей вибрации, а именно в непосредственной близости резьбового крепления подшипникового щита к остову.

Способ крепления датчика к корпусу подшипникового узла должен обеспечивать возможность измерения высокочастотной (до 25 кГц) вибрации. Датчик может крепиться на магните. Для более качественного измерения вибрации на частотах, выше резонанса датчика на магните, место установки датчика должно смазываться консистентной смазкой, осуществляющей более качественный контакт поверхностей и снижающей добротность резонанса датчика на магните.

Контактная поверхность на подшипниковом узле должна быть достаточно ровной и очищенной от краски, загрязнения, не иметь повреждений. Площадь контакта должна быть не менее 75% поверхности датчика. Число контактных поверхностей от точки крепления датчика до неподвижного кольца подшипника должно быть минимальным.

Если для диагностики подшипников качения требуется не однократное измерение спектра огибающей вибрации, а периодическое измерение двух видов спектров (вибрации и ее огибающей), как это делается в депо, то к местам установки датчиков виброускорения и к выбору полосы пропускания фильтра для формирования огибающей, добавляется еще и требование к направлению измерения вибрации. Это направление должно проходить через ось вращения ротора и не должно сильно отклоняться от плоскости (более  $30^\circ$ ), перпендикулярной оси вращения. На тяговый двигатель датчик лучше всего ставить в нижней части подшипникового узла, отклоняясь от вертикального направления также не более чем на  $30^\circ$ . Современные датчики виброускорения, которые используют при диагностике для измерения спектра вибрации в локомотивных депо, лишены недостатка воспринимать колебания в одном из направлений (горизонтальном, вертикальном или осевом). Они воспри-

нимают колебания во всех направлениях, что облегчает решение вопроса о месте его установки на диагностируемый объект. Так, например, корпус буксы имеет выпуклую поверхность, а магнит крепления датчика — плоскую (рис. 1). Это, разумеется, будет препятствием для плотного контакта во время диагностики. Но в конструктивную особенность буксового узла входит наличие крепежа крышки буксы. Они имеют достаточно ровную и гладкую поверхность для крепления вибродатчика во время диагностики, хотя и расположены в осевом направлении к исходящей от буксового узла вибрации.

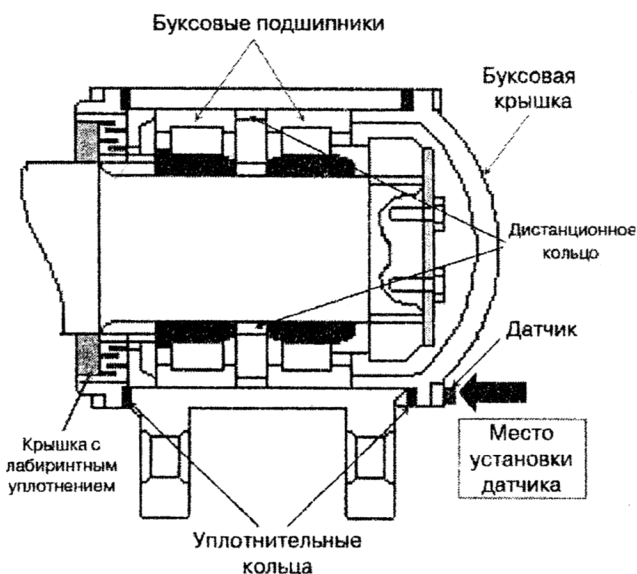


Рис. 1. Букса грузового электровоза с установленным датчиком

Динамические силы, возникающие в механических передачах при наличии дефектов, передаются на корпус в основном через подшипники ведущего и ведомого валов. Поэтому подшипники являются теми узлами механических передач, вибрация которых изменяется при дефектах шестерен и собственно подшипников. Естественно, что точки контроля вибрации механической передачи выбираются на корпусе подшипниковых узлов, по одной на каждом узле. Весьма важным является выбор на-

правления измерения для диагностики по спектру вибрации механической передачи. Лучше всего его выбирать радиальным к осям вращения валов и в плоскости, проходящей через эти оси. Дополнительной рекомендацией может считаться выбор для крепления датчика той части подшипникового узла, которая ближе к точке максимальной нагрузки на поверхности трения подшипника. Следует отметить, что в механических передачах обычно одни и те же точки контроля вибрации используются как для мониторинга, так и для глубокой диагностики.

При мониторинге желательно измерять не только радиальную вибрацию подшипников, но и осевую. Поэтому для минимизации числа точек контроля вибрации можно изменить направление измерения вибрации, выбрав его под углом порядка  $30^\circ - 45^\circ$  к оси вращения вала. Но такое решение не является идеальным, хотя и минимальным образом снижает достоверность диагноза. Оптимальным при диагностике и мониторинге механической передачи является использование радиального направления вибрации при диагностике и дополнительное измерение осевой вибрации каждого из валов передачи при мониторинге механической передачи совместно с машинами, соединяемыми посредством этой передачи. Не менее важным является выполнение требований к выбору точек контроля для диагностики собственно подшипников. В первую очередь это требования к минимальному числу контактных поверхностей между поверхностями трения и точкой контроля. Таким образом, оператор самостоятельно выбирает как число точек контроля, так и места крепления датчиков виброускорения, а также направления измерений. Выбор диагностических параметров осуществлен разработчиками пакета программ. В программе, кроме режимов автоматической диагностики, предусмотрены и неавтоматические режимы анализа данных измерений. Все диагностические признаки выбираются для совместной диагностики подшипников и других узлов механической передачи по вибрации подшипникового узла.

Интервал между диагностическими измерениями устанавливается исходя из имеющейся информации об интенсивности развития дефектов. Рекомендуемый интервал составляет один — три месяца, но он может быть откорректирован как в меньшую, так и

в большую сторону с учетом периодичности проведения профилактического обслуживания машин.

Если в диагностируемом узле обнаружены изменения состояния, соответствующие появлению одного среднего дефекта, рекомендуемый интервал сокращается в два раза. Изменения, соответствующие появлению двух средних или одного сильного дефекта, приводят к автоматическому снижению рекомендуемого интервала между измерениями еще в три раза. В более сложных случаях предлагается либо заменить (отремонтировать) узел, либо, если вероятность аварийного выхода узла из строя не слишком велика, программа сокращает исходный интервал между измерениями в десять раз.

Основной рекомендацией по выбору режима работы машины при диагностике подшипников качения является обеспечение одной и той же скорости ее вращения во время каждого из периодических измерений вибрации. Для диагностики используют только те группы измерений, которые укладываются по частоте в диапазоне 10% от среднего значения. Во время выполнения диагностических измерений необходимо обеспечивать стабильность частоты вращения машины. Так, частота вращения не должна изменяться более чем на 1%.

Более детально данный материал рассматривается в [3], а также в технологических процессах локомотивных депо, где систематически проводится вибродиагностика узлов колесно-моторных блоков по рекомендациям разработчиков поставляемого диагностического оборудования и ЦВНТ.

### 3. Анализ элемента структуры диагностического комплекса для селекции диагностического сигнала

*Задание.* Рассчитать частотную полосу  $\Delta\omega$  и пороговое значение  $A$  прохождения гармонического сигнала амплитуды  $X_1$  частотой  $\omega$ . Построить дискретный спектр, ограниченный частотной полосой пропускания элемента структуры диагностического комплекса, например фильтра с пороговым устройством, (рис. 2). Данные параметры могут использоваться при диагностировании единичного дефекта, например наружного кольца подшипника качения, рассмотренного в предыдущем задании. Примером также может служить дискретный спектр  $k$ -й гармоники информативной частоты, соответствующий бою вала.



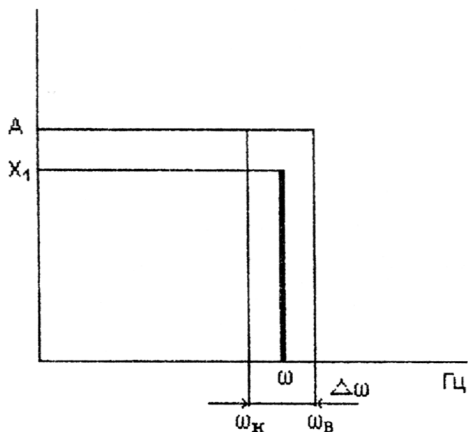


Рис.2. Контроль прохождения  $k$ -й гармоники с учетом назначенных пороговых значений

### Методические указания и порядок выполнения

Математический аппарат, называемый спектральным анализом, служит для исследования периодических процессов и выявления в них отдельных компонент, имеющих характерные частоты. Поэтому для успешного применения спектральных методов в диагностике роторных машин и было введено основное определение на свойства диагностируемых машин. Роторная машина — это машина, обладающая строгой периодичностью вращения, по крайней мере, за время порядка 5–10 периодов полного оборота контролируемого вращающегося узла. Именно при таком ограничении могут эффективно использоваться алгоритмы и пакеты программ для диагностики узлов машин такого типа. Колебательные силы, действующие за это время, и возбуждаемую ими вибрацию можно разделить на три основные составляющие — периодические, случайные стационарные и случайные нестационарные.

Основной вид анализа первых двух групп составляющих — спектральный. Этот вид анализа считается необходимым и достаточным для использования алгоритмов и программного обе-

спечения. Для случайных нестационарных сигналов существует достаточно много дополняющих друг друга видов анализа.

Диагностическая информация об особенностях простейших периодических сигналов, используемая в алгоритмах может содержаться в таких его параметрах, как период, амплитуда и форма. В спектре сигнала это будут соответственно такие параметры, как частота основной гармоники, уровень (амплитуда) основной гармоники и соотношение уровней (амплитуд) основной и кратных гармоник. Реальный сигнал вибрации далек от моделей и даже в задачах мониторинга, обычно представляется в виде суммы составляющих с разными периодами, а также случайных составляющих.

На рис. 3 приведены временные зависимости сигнала вибрации, содержащего периодические составляющие, а также узкополосные спектры.

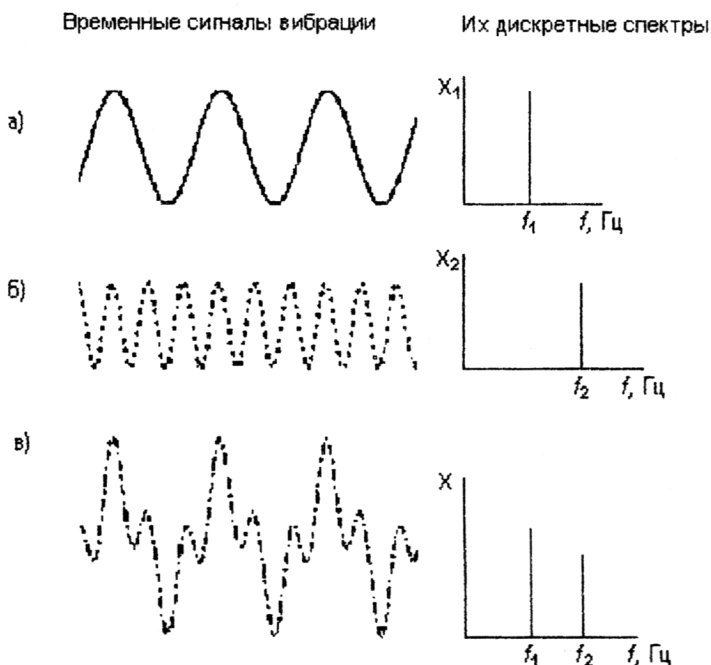


Рис. 3. Временные зависимости и узкополосные спектры

Случайный виброакустический сигнал, вид которого представлен на рис. 4, может принимать любое значение в определенном диапазоне, поэтому его нельзя характеризовать амплитудой, частотой и фазой.

Случайный сигнал можно характеризовать пиковым значением, среднеквадратическим значением, средним значением и значением пик-пик (значением от пика до пика). Реальный сигнал акустического шума или вибрации представляет собой совокупность гармонических случайных составляющих. Как видно из рис. 4, трудно получить диагностическую информацию из временного сигнала. Поэтому временной сигнал наиболее часто используется для выявления дефектов, ко-

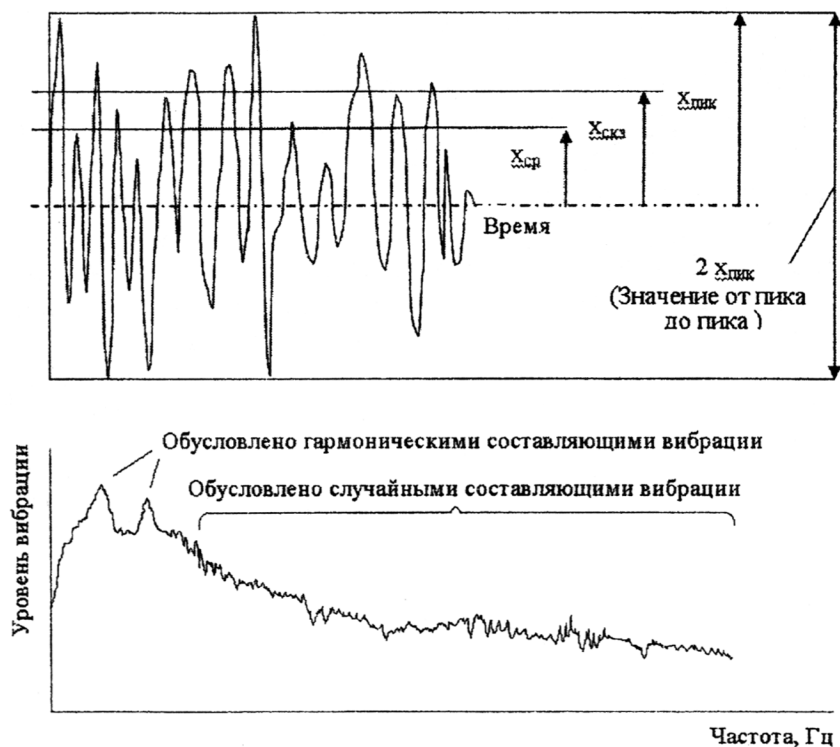


Рис. 4. Реальный сигнал акустического шума и вибрации

торые приводят к кратковременному изменению энергии, т.е. появлению ударных импульсов.

Для обнаружения дефектов, не приводящих к кратковременному изменению энергии сигнала, часто используют спектральное представление сигнала, т.е. разложение его на простые составляющие (тональные). Так, для простейшего гармонического колебания спектр имеет вид (см. рис. 2). Граничные значения для такого сигнала можно назначить по амплитуде  $A$  и частотной полосе  $\Delta\omega$ , например, с такими допусками:

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \omega_{\text{в}} - \omega_{\text{н}}; \\ \omega_{\text{в}} &= \omega + 2\% = \omega + 0,02\omega; \\ \omega_{\text{н}} &= \omega - 2\% = \omega - 0,02\omega; \\ A &= X_k + 10\% = X_k + 0,1X_k.\end{aligned}$$

Процентные соотношения допусков должны быть обоснованы и могут иметь различные значения. Выход за предельные значения, которые будем считать пороговыми значениями, дает возможность контролировать прохождение  $k$ -й гармоники,  $k = 0, 1, 2, \dots$  более сложного сигнала. Результаты подобных расчетов позволяют получать рекомендации для проектирования элементов — структуры диагностического комплекса для селекции (выделения) диагностического сигнала.

Если сигнал представляет собой комбинацию двух простейших гармонических составляющих с разными частотами и амплитудами, как представлено на рис. 3, то его спектр имеет вид, ясно показывающий наличие именно двух гармонических составляющих, у которых легко определяются их частоты и амплитуды.

Спектральное представление периодических сигналов, а именно таким является множество сигналов акустического шума и вибрации в установившихся режимах работы машин и оборудования, можно получить, используя разложение в ряд Фурье.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t), \quad (1)$$

где  $\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$  — среднее значение сигнала  $x(t)$ , как правило, равно нулю;

$T$  — период;

$a_k$  и  $b_k$  — коэффициенты ряда Фурье, связанные с временной функцией сигнала  $x(t)$  следующими выражениями:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos k\omega t dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin k\omega t dt, \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $x(t)$  — амплитудное значение временного сигнала.

Для амплитуды  $k$ -й гармоники имеем

$$X_k = \sqrt{(a_k^2 + b_k^2)};$$

для начальной фазы  $k$ -й гармоники

$$\varphi_k = \arctg \left( \frac{b_k}{a_k} \right).$$

Для случайных стационарных сигналов также можно использовать спектральное преобразование. Только в этом случае используется не разложение в ряд Фурье, как для периодических сигналов, а интегральное преобразование Фурье:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} dt,$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt,$$

где  $X(\omega)$  — спектральная плотность, характеризующая распределение энергии по частоте.

Виброакустический сигнал представляет собой совокупность многих составляющих акустического шума или вибрации, связанные с техническим состоянием машины или оборудования. Реальный сигнал шума или вибрации содержит, как правило, кроме гармонических составляющих и случайные составляющие.

Диагностическая информация в таких сигналах, кроме рассмотренных параметров каждой группы гармоник, содержится еще в соотношении амплитуд и частот каждой группы гармоник, а также в соотношении амплитуд гармонических составляющих и среднеквадратических величин случайных составляющих. Вибрацию любого объекта можно характеризовать:

$x$  — вибросмещением,  
 $x' = dx/dt$  — виброскоростью

или

$x'' = d^2x/dt^2$  — виброускорением.

Для гармонического колебания:

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi_0) = d \sin(\omega t + \varphi_0); \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x'(t) &= x_0 \omega \sin(\omega t + \varphi_0) = x_0 \omega \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi/2) = \\ &= v \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi/2); \end{aligned} \quad (3)$$

$$x''(t) = -x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi) = a \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi), \quad (4)$$

где  $s = x_0$  (5),  $v = x_0 \omega$  (6),  $a = x_0 \omega^2$  (7), соответственно, амплитуды виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

На рис. 5 приведены фазовые соотношения вибросмещения, виброскорости и виброускорения без учета пропорциональных соотношений амплитуд.

Виброскорость механических колебаний может быть определена путем деления их виброускорения на  $2\pi f$ , а вибросмещение — делением виброускорения на  $4\pi^2 f^2$ :

$$v = \frac{a}{2\pi f} = \int a dt;$$

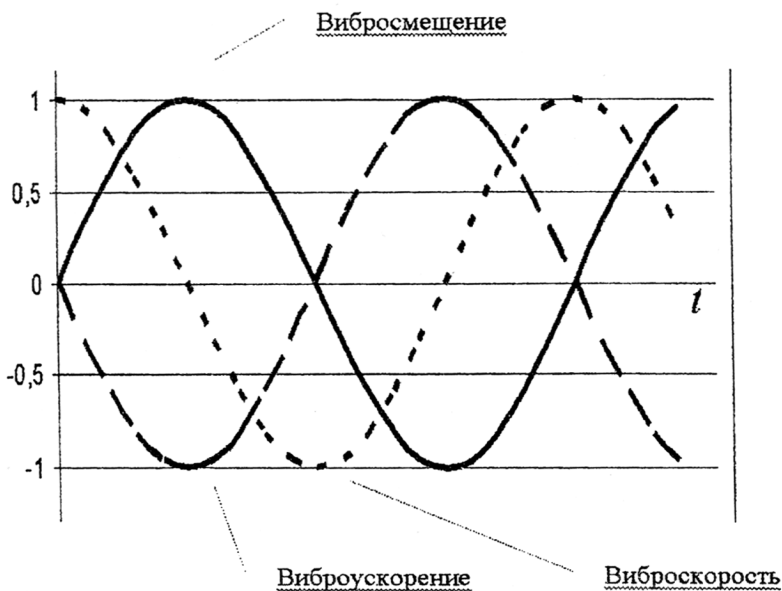


Рис. 5. Фазовые соотношения производных виброперемещений

$$s = \frac{a}{4\pi^2 f^2} = \int v dt.$$

Современные виброизмерительные приборы автоматически осуществляют эти операции электронными или цифровыми интеграторами.

Очевидно, что виброускорение целесообразно измерять на высоких частотах, так как его амплитуда пропорциональна квадрату круговой частоты  $\omega^2$ , как следует из выражения (7); виброскорость — если измерительный прибор имеет ограниченный динамический диапазон, виброперемещение — для измерения низкочастотных механических колебаний.

При измерении вибрации рекомендуется пользоваться датчиками виброускорения. Если пользователь предпочитает по каким-либо причинам проводить мониторинг вибрации по виброскорости или по вибросмещению, он может воспользоваться правилами перевода исправленного спектра виброускорения в спектр виб-

роскорости или вибросмещения. В то же время для диагностики роторных машин используются только спектры виброускорения, так как именно в них для большинства типов узлов роторных машин оказываются сопоставимыми величины составляющих вибрации на низких, средних и высоких частотах, что значительно облегчает их анализ. Объясняется это тем, что разрушающее действие на узлы машин оказывают в основном силы, а по второму закону Ньютона сила, действующая на массу, вызывает ускорение, а не ее движение или перемещение. Скорость, а тем более смещение, очень сильно зависят от того, как долго действовала сила в одном направлении и чем больше частота действующей силы, тем меньше скорость и смещение, вызванное этой силой. Таким образом, сравнивать силы, действующие с разными частотами, желательно по спектрам виброускорений. Для того чтобы не потерять диагностическую информацию при анализе периодических сигналов, необходимо использовать технические средства для узкополосного спектрального сигнала с большим разрешением по частоте, что легко осуществляется с помощью цифровых методов Фурье анализа сигналов. Типичное число полос частотного разрешения в анализаторе спектра составляет 400, 800, 1 600, 3 200 и т. д. Но есть естественный предел, который определяется физическим временем накопления данных, обратно пропорциональным ширине одной полосы спектра, и стабильностью частоты вращения диагностируемой машины. Типовое время накопления данных для измерения одного спектра обычно близко к десяти периодам вращения диагностируемого узла, и за это время стабильность частоты вращения не должна быть хуже одного процента. Дальнейшее накопление обычно проводится путем усреднения спектров. Оптимальное число спектральных составляющих в этом случае близко к 800 – 1 600, что и является естественным ограничением числа полос спектрального анализа. Лишь в специальных случаях требуется его увеличение, причем большинство приборов для спектрального анализа сигналов для этой цели имеет специальный режим работы «Лупа» («Zoom»), в котором спектральный анализ с очень малой шириной полосы спектра, но не всего сигнала, а его части, в полосе частот, выбираемой оператором. В задачах мониторинга могут использоваться и



другие виды спектрального анализа сигналов с меньшим числом частотных полос, ширина которых линейно связана со значением средней частоты. Типичный пример — третьоктавный спектральный анализ, при котором ширина полосы приблизительно составляет 23% от величины центральной (среднегеометрической) частоты.

Исторически такой «широкополосный» спектральный анализ, появился еще до широкого использования алгоритма быстрого преобразования Фурье, на котором основана цифровая техника и узкополосный спектральный анализ. Причина, по которой такой вид анализа может использоваться в задачах мониторинга и в настоящее время заключается в том, что этот вид анализа слабо чувствителен к изменениям режима работы, сопровождающимся изменением частоты вращения. За те несколько дней (месяцев), которые проходят между периодическими измерениями вибрации, частота вращения, а с ней и спектральные составляющие вибрации, могут изменить свою частоту на несколько процентов, что усложняет процесс сравнения узкополосных спектров вибрации.

В последние годы развитие цифровых методов спектрального анализа сигналов изменило подход и к построению третьоктавных спектров вибрации, которые стали синтезироваться из узкополосных спектров, путем энергетического суммирования составляющих узкополосного спектра, которые попадают в одну третьоктавную полосу частот. Следует отметить, однако, что использование третьоктавных спектров вибрации для мониторинга состояния машин и оборудования не является оптимальным и, как правило, происходит из-за давно устаревших стандартов по контролю вибрации машин в ряде областей промышленности. На практике куда более эффективным является не объединение в одну величину составляющих сигнала в интересующей пользователя полосе частот, а использование для этой полосы частот единого порогового значения. Результатом этого является минимизация потерь диагностической информации при изменении скорости вращения диагностируемой машины. В задачах диагностики, как правило,

следует использовать результаты идентификации каждой гармонической составляющей, обнаруживаемой в результате узкополосного анализа сигналов, используя либо внешнюю информацию о частоте вращения машины, либо определяя ее автоматически по обнаруженным в спектре гармоническим составляющим сигнала вибрации (шума).

В узкополосном спектре такого сигнала, кроме основного ряда гармоник вибрации у каждой из них появляются еще и боковые составляющие, отличающиеся на частоту, кратную частоте модулирующего сигнала. В этом случае диагностическая информация может содержаться и в таких параметрах, как частота, глубина и форма модуляций. Глубина модуляции определяется соотношением амплитуд основной и первых боковых гармоник, форма — соотношением амплитуд первых боковых гармоник со вторыми, третьими и последующими боковыми гармониками.

Есть еще одно свойство физических процессов, проявляющееся при их спектральном анализе, которое достаточно часто дает важную диагностическую информацию. Это свойство также характеризует нелинейное взаимодействие двух периодических процессов, но проявляется оно не в виде модуляции одного процесса другим, а в виде нелинейного преобразования величины суммарного процесса, т.е. нелинейного преобразования биений двух или группы гармонических процессов, приводящего к появлению новых периодических сигналов с периодом, являющимся субгармоникой всех взаимодействующих процессов. На практике подобный сигнал вибрации достаточно часто встречается в механических передачах, когда и ведущий вал и ведомый имеют дефектные узлы, например, зубчатые колеса и шестерни, контактирующие друг с другом.

При выполнении задания на основе, изложенного здесь материала, а также более полно в [3; 5; 6], можно воспользоваться примером решения, приведенным в конце данной брошюры. Студентам необходимо задаться значениями синусоиды в соответствии с вариантом по предпоследней цифре шифра, указанной в табл. 5.

Таблица 5

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\omega$ , Гц	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900
$X_k$ , мВ	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190

#### 4. Контроль параметров тяговых двигателей и вспомогательных электрических машин

*Задание 4.1.* Для измеренного диагностическим комплексом коэффициента, характеризующего положение геометрической нейтрали  $K_{гн}$ , определить требуемый поворот траверсы двигателя постоянного тока при настройке нейтрали. Для упрощения в контрольной работе допускается пользоваться формулой  $K_{гн} = \sin(\varphi)/a$ , отражающей значения нейтрали при повороте якоря тягового двигателя между двумя щетками. Значения величины  $a$  по каждому варианту учебного шифра студента для заданного угла приведены в табл. 6.1. Требуется построить график, аналогичный рис. 6 (формат А4), на котором приводятся результаты трех экспериментов по настройке геометрической нейтрали в цеховых условиях. По заданному значению  $K_{гн}$  для каждого варианта определяется необходимый угол поворота траверсы.

*Задание 4.2.* Построить график, позволяющий выявлять наличие межвиткового замыкания якоря электродвигателя (тягового) НБ-418К. Определить значение минимального отклонения от максимального, которое не должно превышать 20%. Допускается пользоваться упрощенной формулой для расчета координат графика  $y = b \cos(\varphi)$ . Данные для расчета находятся в табл. 6.2. Сделать вывод о наличии или отсутствии межвиткового замыкания. При расчетах, также можно воспользоваться упрощенной эмпирической формулой в виде  $y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g$ . Коэффициенты при степенях аргумента приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.1

Вариант по последней цифре шифра	Абсциссы для построения графика										Заданные значения $K_{\text{пл}}$ для определения требуемого угла поворота	
	Заданные значения угла в градусах											
	0	5	10	15	10	10	5	5	0	0		
	Заданные значения $a$ для соответствующей абсциссы графика											
	$a 0$	$a 5$	$a 10$	$a 15$	$a 10$	$a 10$	$a 5$	$a 0$	$a 0$		направление отсчета	значение
0	0,258819	0,34	0,36	0,258819	0,35	0,35	0,37	0,258819	0,37	0,258819	По часовой стрелке	0,1
1	0,258819	0,32	0,33	0,258819	0,34	0,34	0,35	0,258819	0,35	0,258819	То же	0,2
2	0,258819	0,33	0,35	0,258819	0,32	0,32	0,38	0,258819	0,38	0,258819	"_"	0,3
3	0,258819	0,36	0,37	0,258819	0,33	0,33	0,33	0,258819	0,33	0,258819	"_"	0,4
4	0,258819	0,31	0,35	0,258819	0,34	0,34	0,3	0,258819	0,3	0,258819	"_"	0,5
5	0,258819	0,37	0,38	0,258819	0,38	0,38	0,36	0,258819	0,36	0,258819	Против часовой стрелки	0,5
6	0,258819	0,35	0,37	0,258819	0,36	0,36	0,34	0,258819	0,34	0,258819	То же	0,4
7	0,258819	0,33	0,36	0,258819	0,4	0,4	0,36	0,258819	0,36	0,258819	"_"	0,3
8	0,258819	0,32	0,35	0,258819	0,37	0,37	0,34	0,258819	0,34	0,258819	"_"	0,2
9	0,258819	0,33	0,36	0,258819	0,39	0,39	0,32	0,258819	0,32	0,258819	"_"	0,1

Таблица 6.2

По- следняя цифра учеб- ного шифра	Угол между шетками, градусы											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	Значение величины $b$ для соответствующего угла между шетками											
$b_5$	$b_{10}$	$b_{15}$	$b_{20}$	$b_{25}$	$b_{30}$	$b_{35}$	$b_{40}$	$b_{45}$	$b_{50}$	$b_{55}$	$b_{60}$	
0	0,061	0,0647	0,07346	0,0694	0,0636	0,062	0,0757	0,0821	0,0933	0,1129	0,1114	0,122
1	0,061	0,0647	0,07346	0,0694	0,0636	0,062	0,0757	0,0821	0,0933	0,1155	0,1114	0,118
2	0,05796	0,0595	0,0624	0,06823	0,0636	0,0604	0,0737	0,0783	0,0933	0,1066	0,1062	0,116
3	0,061	0,0647	0,07346	0,0694	0,0636	0,062	0,0757	0,0821	0,0933	0,1181	0,1114	0,12
4	0,062	0,0647	0,0708	0,0694	0,0636	0,0622	0,0760	0,0821	0,0933	0,1097	0,1114	0,124
5	0,0564	0,0647	0,07346	0,0694	0,0618	0,0589	0,0719	0,0795	0,0933	0,1150	0,1114	0,114
6	0,063	0,0653	0,0718	0,0694	0,0646	0,0632	0,0772	0,0827	0,0933	0,1119	0,1114	0,126
7	0,0593	0,0647	0,07346	0,0694	0,0636	0,062	0,0757	0,0821	0,0954	0,1197	0,1114	0,1182
8	0,0649	0,0658	0,0726	0,0694	0,0667	0,0652	0,0796	0,0851	0,0957	0,1121	0,1165	0,13
9	0,061	0,068	0,076	0,068	0,0636	0,062	0,0757	0,0840	0,1	0,1213	0,1174	0,1208

Таблица 6.3

Вариант по последней цифре учебного шифра	Коэффициенты многочлена								
	a	b	c	d	e	f	g		
0	$4E - 06x^6$	$-0,0001x^2$	$0,0020x^4$	$-0,0141x^3$	$0,0450x^2$	$-0,0558x$	0,0855		
1	$2E - 06x^6$	$-8E - 05x^5$	$0,0011x^4$	$-0,0075x^3$	$0,0237x^2$	$-0,0297x$	0,0747		
2	$4E - 06x^6$	$-0,0002x^2$	$0,0025x^4$	$-0,0165x^3$	$0,0503x^2$	$-0,0557x$	0,0814		
3	$4E - 06x^6$	$-0,0002x^2$	$0,0025x^4$	$-0,0166x^3$	$0,0505x^2$	$-0,0557x$	0,0812		
4	$3E - 06x^6$	$-0,0001x^2$	$0,0017x^4$	$-0,0115x^3$	$0,0347x^2$	$-0,0384x$	0,0746		
5	$3E - 06x^6$	$-0,0001x^2$	$0,0016x^4$	$-0,0110x^3$	$0,0359x^2$	$-0,0477x$	0,0829		
6	$4E - 06x^6$	$-0,0001x^2$	$0,0022x^4$	$-0,0145x^3$	$0,0435x^2$	$-0,0458x$	0,0754		
7	$3E - 06x^6$	$-0,0001x^2$	$0,0016x^4$	$-0,0105x^3$	$0,0317x^2$	$-0,0326x$	0,0713		
8	$4E - 06x^6$	$-0,0002x^2$	$0,0026x^4$	$-0,0178x^3$	$0,0556x^2$	$-0,0665x$	0,0872		
9	$2E - 06x^6$	$-8E - 05x^5$	$0,0011x^4$	$-0,0077x^3$	$0,0235x^2$	$-0,0270x$	0,0713		

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

Как уже отмечалось, при определении смещения геометрической нейтрали электрических машин постоянного тока на якорную обмотку подается напряжение. За счет трансформаторной связи между якорной обмоткой и обмоткой возбуждения на ней также наводится ЭДС. На обмотке возбуждения измеряется напряжение и находится отношение этих напряжений, дающее коэффициент, пропорциональный состоянию геометрической нейтрали. При отклонении геометрической нейтрали от нормы коэффициент увеличивается. Иными словами, если этот коэффициент возрастает, то настройка нейтрали ухудшается, и необходимо добиться того, чтобы коэффициент был равен нулю. Результат замера записывают на жесткий флэш-диск (DiskOnChip) встроенного компьютера диагностического комплекса. Далее строят соответствующий график:

$$K = (U_{\text{возб}} / U_{\text{як}}) - \text{коэффициент трансформации,}$$

где  $U_{\text{возб}}$  — напряжение обмотки возбуждения;  
 $U_{\text{як}}$  — напряжение якорной обмотки.

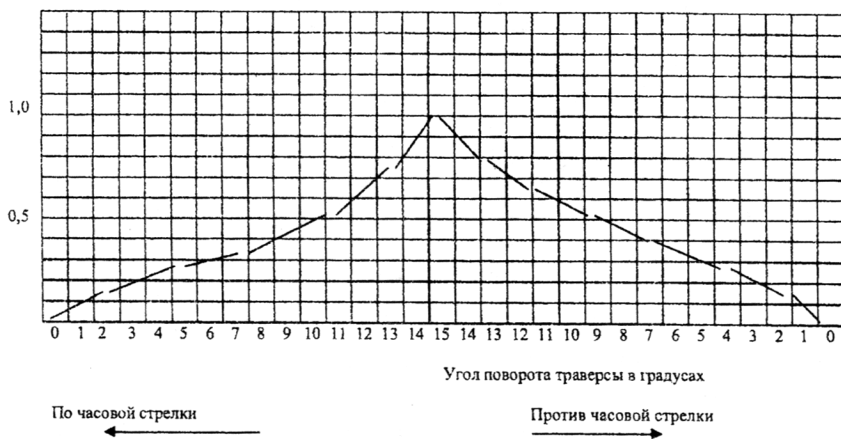


Рис. 6. Пример зависимости коэффициента, характеризующего геометрическую нейтраль  $K_{\text{тн}}$  электродвигателя постоянного тока П11-М от поворота траверсы

В процессе измерений с помощью такого режима как «НЕЙТРАЛЬ», диагностический комплекс серии «Доктор» позволяет выявить нарушения угла установки нейтрали электродвигателя, неплотное прилегание щеток к коллектору, загрязнение коллектора, а также, с помощью определенной методики измерения, межвитковое замыкание якоря. В зависимости от количества щеткодержателей щеточного аппарата электродвигатели имеют разное угловое межщеточное перемещение якоря, то есть поворот якоря относительно двух ближайших щеток щеточного аппарата. Угловое межщеточное перемещение у двигателей с разным количеством щеток будет различным (2 щетки —  $180^\circ$ ; 4 щетки —  $90^\circ$ ; 6 щеток —  $60^\circ$ ) угол  $\varphi$  — межщеточный угол.

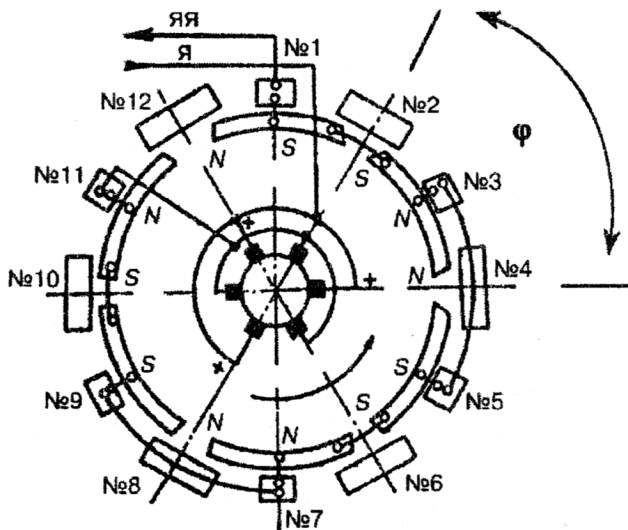


Рис.7. Межщеточный угол  $\varphi$

Для определения межвиткового замыкания якоря необходимо межщеточный угол разделить на сектора по  $5^\circ$ – $10^\circ$ , чтобы получилось 6–12 секторов (можно сосчитать количество ламелей якоря между двумя ближайшими щетками, разделить это число на 6–12 секторов, для определения соответствующего углового поворота якоря). Количество секторов соответствует количеству замеров плюс одно, которые необходимо сделать в



режиме «ТЕСТЕР» и занести на бумагу. Замеры производятся в такой последовательности:

выполнить контроль нейтрали тягового электродвигателя в режиме «ТЕСТЕР»;

записать результаты;

повернуть якорь электродвигателя на угол  $5^\circ - 10^\circ$  относительно любой щетки;

выполнить повторный контроль нейтрали и сделать запись результатов;

повернуть еще раз в ту же сторону якорь электродвигателя на угол  $5^\circ - 10^\circ$  относительно той же щетки и провести контроль нейтрали с записью результатов;

далее повторить необходимое количество раз действия, описанные выше.

После проведенного контроля надо сравнить максимальное и минимальное значения нейтрали, и если их разница составляет более 20%, то это указывает на наличие межвиткового замыкания якоря.

На рис. 8 приведен график, показывающий наличие межвиткового замыкания якоря электродвигателя НБ-418К. Разница



Рис. 8. График значений нейтрали тягового электродвигателя НБ-418К при повороте якоря на угол  $60^\circ$  между двумя щетками

между максимальным и минимальным значениями в этом случае составляет 21%.

Оба графика по этому разделу выполняются на одном листе формата А4. При выполнении задания рекомендуется пользоваться расчетами в среде MathCad или электронными таблицами.

### 5. Анализ разброса измеренных параметров электрического оборудования для выбора допусков

*Задание 5.1.* Диагностическим комплексом определено время включения  $t_v$  (отключения  $t_o$ ) или же измерена индуктивность катушек  $L$  электромагнитных и электропневматических контакторов электровозов или электропоездов. Выйдет ли из допуска (см. приложение) заданный параметр табл. 7, если в процессе эксплуатации изменился один из влияющих факторов (условия или техническое состояние в соответствии с табл. 8). В контрольной работе допускается считать неизменными все прочие факторы, влияющие на параметр технического состояния, и воспользоваться приведенными упрощенными эмпирическими формулами.

*Задание 5.2.* Ознакомившись с методами контроля параметров электрического оборудования, письменно (в пределах одной страницы) изложить суть анализа разброса измерений при назначении допусков.

Т а б л и ц а 7

$P_{вп}$ – параметр, характеризующий усилие нажатия возвратной пружины подвижного контакта на плече 0,26
$P_{пн}$ – параметр, характеризующий усилие нажатия притирающей пружины на плече 0,03 (приведен для примера и в контрольной работе не используется)
$P_{рк}$ – параметр, характеризующий раствор контактов
$P_{кв}$ – параметр, характеризующий короткозамкнутые витки включающей катушки
$P_{дк}$ – параметр, характеризующий короткозамкнутые витки дугогасительной катушки
$P_d$ – параметр, характеризующий давление воздуха в магистрали
$P_{пс}$ – параметр, характеризующий переходное сопротивление контактов (приведен для примера и в контрольной работе не используется)

Таблица 8

Вариант по предпоследней цифре учебного шифра	Тип индивидуального контактора	Изменяющийся влияющий фактор	Исходное значение для расчета по варианту	Упрощенная эмпирическая формула
1	2	3	4	5
1	ПК-41	Раствор контактов	$t_o = 0,12$	$\Pi_{рк} = 2027,8 t^{5,2647}$
	Контактор типа ПК-162А (вагона метрополитена)	Давление воздуха в магистрали	$t_b = 105$ мс	$\Pi_d = 3,5 \cdot 10^5 \text{EXP}(0,002 \cdot 0,105)$
2	ПК-21	Раствор контактов	$t_o = 0,115$	$\Pi_{рк} = 0,0733^{12,022}$
	Контактор типа ПК-162А (вагона метрополитена)	Давление воздуха в магистрали	$t_b = 0,108$ мс	$\Pi_d = 10,5 \cdot 10^3 t^{-1,6857}$
3	ПК-19	Раствор контактов	$t_o = 0,117$	$\Pi_{рк} = (2E + 03) t^{5,1978}$ (экспоненциальная форма записи)
	Контактор типа ПК-162А (вагона метрополитена)	Давление воздуха в магистрали	$t_b = 95$ мс	$\Pi_d = 3,9 \cdot 10^6 t^2 - 0,1263t + 586,8$
4	МК-310Б	Усилие нажатия возвратной пружины на подвижного контакта на плече 0,26	$t_b = 0,4$	$\Pi_{вл} = 10,139 \ln(t) + 30,178$
	Контактор типа ПК-162А (вагона метрополитена)	Давление воздуха в магистрали	$t_o = 100$ мс	$\Pi_d = (1,98E+05)t^{0,017}$ (экспоненциальная форма записи)
5	МК-310Б	Усилие нажатия возвратной пружины подвижного контакта на плече 0,26	$t_b = 0,43$	$\Pi_{вл} = -1,292t^2 + 61,25t - 5,447$
	Контактор типа ПК-162А (вагона метрополитена)	Давление воздуха в магистрали	$t_o = 90$ мс	$\Pi_d = 23,7 \cdot \text{EXP}(102t)$

Окончание табл. 8

1	2	3	4	5
6	МК-310Б	Усилие нажатия возвратной пружины подвижного контакта на плече 0,26	$t_a = 0,42$	$\Pi_{вп} = 10,139 \ln(t) + 27,9515$
	Контактор типа ПК-162А (вагона метрополитена)	Давление воздуха в магистрале	$t_o = 60 \text{ мс}$	$\Pi_{д} = 10^8 t^2 + 0,256t + 1,377$
7	ПК-41	Давление воздуха в магистрале	$t_o = 0,1$	$\Pi_{д} = 16538 t^{-1,026}$
	МК-310Б	Короткозамкнутые витки дугогасительной катушки	$L = 0,2 \text{ мГн}$	$\Pi_{дк} = 894L^2 - 0,8948L + 4,4953$
8	ПК-19	Давление воздуха в магистрале	$t_a = 0,062$	$\Pi_{д} = 2800 t^{-2,6017}$
	МК-310Б	Короткозамкнутые витки дугогасительной катушки	$L = 0,1 \text{ мГн}$	$\Pi_{дк} = 0,2218L^2 - 1,714L + 4,698$
9	ПК-19	Давление воздуха в магистрале	$t_o = 0,06$	$\Pi_{д} = 795497 \cdot \text{EXP}(-9,922 \cdot t)$
	МК-310Б	Короткозамкнутые витки включающей катушки	$L = 500 \text{ мГн}$	$\Pi_{кв} = 5,3e^{-0,08L}$
0	ПК-21	Давление воздуха в магистрале	$t_o = 0,095$	$\Pi_{д} = 2321,1t^2 - 337,17t + 3,3 \cdot 10^5$
	МК-310Б	Короткозамкнутые витки дугогасительной катушки	$L = 0,5 \text{ мГн}$	$\Pi_{дк} = 4,9e^{-706L}$

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

Время срабатывания однотипных индивидуальных контакторов не одинаково. При испытании необходимого количества контакторов для наглядного изображения разброса значений времени включения или выключения удобно воспользоваться точечным графиком (рис.9). Это позволяет получить представление о диапазонах выбора целесообразных порогов. Более точные и обоснованные значения могут быть получены по результатам расчета на ПЭВМ таких статистических характеристик, как: среднее значение; стандартное отклонение; медиана; мода; дисперсия; эксцесс; асимметрия; интервал; минимум; максимум; счет; наибольший; наименьший.

Формулы, полученные на основе опытных данных, позволяют рассматривать значение параметра какого-либо узла с точки зрения оценки: норма/не норма для дальнейшей эксплуатации оборудования.

Для анализа разброса измеренных значений параметров электрического оборудования имеет смысл воспользоваться возможностями диагностического комплекса при определении статистических характеристик.

Проверку времени срабатывания необходимо провести диагностическим комплексом в соответствии с примером. Регистрируют и фиксируют время включения заданного количества контакторов. Строят точечный график (рис. 9) разброса полученных значений и назначают пороговые величины. Заносят все данные в персональный компьютер и рассчитывают статистические характеристики:

среднее значение;	интервал;
стандартное отклонение;	минимум;
медиана;	максимум;
мода;	счет;
дисперсия;	наибольший;
эксцесс;	наименьший.
асимметрия;	

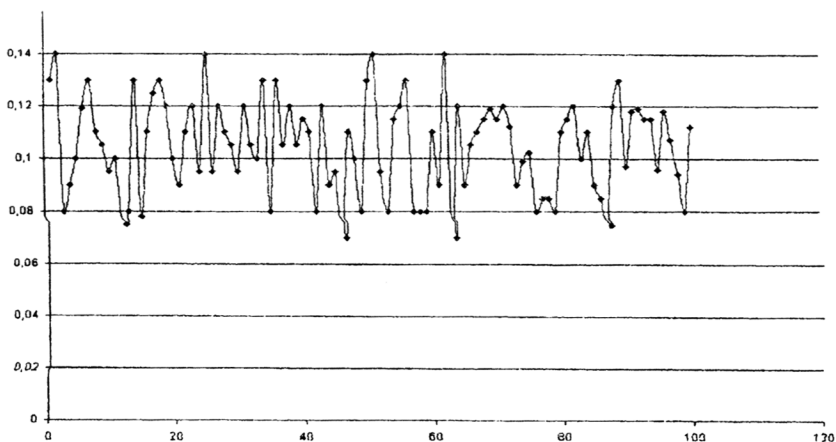


Рис. 9. Точечный график

## ПРИМЕРЫ К НЕКОТОРЫМ РАЗДЕЛАМ ЗАДАНИЙ

### Пример к разделу 2

В качестве примера рассмотрим результаты диагностирования электровоза ВЛ10 и сделаем анализ частот спектров, на которых идентифицируются дефекты для точки измерения: «противоколлекторный» (якорный подшипник). Программа Dream for Windows имеет алгоритмы для автоматического расчета, однако можно рассчитать частоты проявления дефектов подшипника с помощью обычного калькулятора.

Июнь 19, 2004 10:04

Станция: ВЛ10.

Машина: КМБ-1.

Точка измерения: КОЛЛЕКТОРНЫЙ (подшипник качения «редуктора»)

Список частот дефектов, рассчитанных с помощью алгоритма программы Dream for Windows

Т а б л и ц а 9

Частота, Гц	Г а р м о н и к и				
	1	2	3	4	5
$f_{вр1}$	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00
$f_{вр2}$	11,478	22,956	34,43	45,91	57,39
$f_{z12}$	264	264	264	264	264
$f_c$	4,963	8,9	13,35	17,81	22,26
$f_{тк}$	24,339	48,68	73,01	97,35	121,7
$f_n$	59,556	106,8	160,2	213,6	267,12
$f_b$	78,18	168,61	252,96	337,2	421,56

Исходные данные (адаптировано к формам распечаток диагностического комплекса):

Подшипник якорный тягового двигателя ТЛ-2К1:

по книге «ВЛ10» — 8042428 М;

по программе АО «ВАСТ» — SU42428.

Геометрические параметры якорного подшипника:

$D_{вн}$  — 140,00 мм;

$D_{нар}$  — 360,00 мм;

Угол —  $0^\circ$ ;

$D_{тк}$  — 56,00 мм;

$N_{тк}$  (число тел качения) — 12;

$f_{вр}$  колесной пары — 180 об/мин.

Расчет основных частот спектра вибрации и ее огибающей, используемые для обнаружения и идентификации дефектов зубчатой передачи и подшипников качения на электровозе ВЛ10. Основные составляющие вибрации, возбуждаемые при работе зубчатой передачи, укладываются, как правило, в три гармонических ряда с частотами, кратными частоте вращения ведущего вала  $kf_2 = kf_1 \cdot z_1 / z_2$  и зубцовой частоте  $kf_z$ , равной:

$$f_z = f_1 z_1 = f_2 z_2,$$

где  $z_1 = 88$  — число зубьев зубчатого колеса;

$z_2 = 23$  — число зубьев шестерни.

$f_{вр1} = f_{вр} / 60 = 180 / 60 = 3,00$  Гц (для буксового подшипника);

$$f_{вр2} = f_{вр1} \cdot 3,826 = 3,00 \cdot 3,826 = 11,478 \text{ Гц (для якорного подшипника).}$$

Частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного:

$$f_{вр} = 11,478 \text{ Гц.}$$

Частота вращения сепаратора относительно наружного кольца:

$$f_c = 0,5 f_{вр} (1 - (d_{тк} / d_c \cos(\alpha))),$$

где  $d_{тк}$  — диаметр тел качения;  
 $d_c \approx 0,5 (d_n + d_b) = 0,5 (360 + 140) = 250 \text{ мм}$  — диаметр сепаратора;  
 $d_n$  — диаметр наружного кольца;  
 $d_b$  — диаметр внутреннего кольца;  
 $\alpha$  — угол контакта тел и дорожек качения.

$$f_c = 0,5 \cdot 11,478 (1 - 56/250 \cos 0) = 4,963 \text{ Гц}$$

Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу:

$$f_n = 0,5 f_{вр} (1 - d_{тк} / d_c \cos(\alpha)) N_{тк} = f_c N_{тк} = 4,963 \cdot 12 = 59,556 \text{ Гц,}$$

где  $N_{тк}$  — число тел качения.

Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу:

$$f_b = 0,5 f_{вр} (1 + (d_{тк} / d_c \cos(\alpha))) N_{тк} = (f_{вр} - f_c) N_{тк};$$

$$f_b = (11,478 - 4,963) 12 = 78,18 \text{ Гц.}$$

Частота вращения тела качения относительно поверхности колец:

$$f_{тк} = 0,5 f_{вр} d_c / d_{тк} (1 - d_{тк}^2 / d_c^2 \cos^2(\alpha));$$

$$f_{тк} = 0,5 \cdot 11,478 \cdot 250/56 (1 - 56^2/250^2 \cos^2 0) = 24,339 \text{ Гц.}$$

Зубцовая частота зубчатого зацепления:

$$f_{z12} = f_{вр1} Z_1 = f_{вр2} Z_{21} = 180/60 \cdot 88 = 180/60 \cdot 3,826 \cdot 23 = 264 \text{ Гц.}$$



Теперь, если на этих частотах в спектрах вибрации появятся гармонические составляющие, компьютерная программа точно идентифицирует эти дефекты. Зная методы расчета информативных частот, можно даже при отсутствии персонального компьютера самостоятельно проанализировать измеренные спектры и определить вид дефекта, а по величине модуляции гармонических составляющих — степень его развития.

### Пример к разделу 3

Для простейшего гармонического колебания с частотой  $\omega = 900$  Гц и амплитудой  $x_1 = 90$  мВ в соответствии с заданными расчетными формулами:

$$A = X_1 + 10\% = 90 + 0,1 \cdot 90 = 90 + 9 = 99 \text{ мВ};$$

$$\omega_{\text{в}} = \omega + 0,02 \omega = 900 + 18 = 918 \text{ Гц};$$

$$\omega_{\text{н}} = \omega - 0,02 \omega = 900 - 18 = 882 \text{ Гц};$$

$$\Delta\omega = 918 - 882 = 36 \text{ мВ}.$$

### Пример к разделу 4

#### 4.1.1. Исходные данные

Вариант	Абсциссы для построения графика							Заданные значения $K_{\text{гн}}$ для определения требуемого угла поворота	
	Заданные значения угла в градусах								
	0	5	10	15	10	5	0	Направление отсчета	Значение
Заданные значения $a$ для соответствующей абсциссы графика									
	$a_0$	$a_5$	$a_{10}$	$a_{15}$	$a_{10}$	$a_5$	$a_0$		
Последняя цифра шифра	0,2588	0,35	0,37	0,2588	0,36	0,38	0,2588	По часовой стрелке	0,1

4.1.2. Для каждого значения угла находим его синус, например:  $\sin 5^\circ = 0,087$ .

4.1.3. Определение координат графика:

абсцисса равна  $5^\circ$ ;

ордината  $\sin(\varphi)/a = 0,087/0,35 = 0,25$ .

4.1.4. Построение графика (см. рис. 6: по горизонтали – угол, по вертикали –  $K_{гн}$ ).

4.1.5. По заданному значению  $K_{гн}$  определяют требуемый угол поворота траверсы.

4.2.1. Исходные данные

Вариант	Угол между щетками, градусы											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	Значение величины $b$ для соответствующего угла между щетками											
	$b_5$	$b_{10}$	$b_{15}$	$b_{20}$	$b_{25}$	$b_{30}$	$b_{35}$	$b_{40}$	$b_{45}$	$b_{50}$	$b_{55}$	$b_{60}$
Последняя цифра учебного шифра	0,059	0,067	0,0675	0,075	0,065	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12

4.2.2. Для каждого значения угла находим его косинус, например  $\cos 10^\circ = 0,98$ .

4.2.3. Определение координат графика:

абсцисса равна 10;

ордината  $b \cos 10^\circ = 0,067 \cdot 0,98 = 0,065$ .

4.2.4. Построение графика (см. рис. 8).

4.2.5. По графику определяем максимальное и минимальное значения ординат, а также необходимое соотношение.

4.2.6. Делаем вывод о наличии или отсутствии межвиткового замыкания.

Если значение превышает 20%, имеется межвитковое замыкание.

Если значение менее 20%, межвиткового замыкания нет.

Далее более подробно описывается пример практических измерений и построения соответствующего графика при определении смещения геометрической нейтральной.

Специально предусмотренный персонал снимает показания с электродвигателя постоянного тока в электромашинном цехе. Ввиду того, что диагностический комплекс сразу выдает конечный рассчитанный коэффициент, для пояснения данной задачи можно воспользоваться обычными вольтметрами. Устанавливаем траверсу по возможности точно на соответствующей метке двигателя, выставляя геометрическую нейтраль. На обмотку якоря подаем переменное напряжение 36 В, а с обмотки возбуждения снимаем показания при повороте траверсы относительно заводской метки по часовой стрелке и против – на угол, указанный в табл.10:

Таблица 10

№ п/п	По часовой стрелке	№ п/п	Против часовой стрелки
1	замер $-3^0 = 4,4$ В	9	замер $-3^0 = 4,6$ В
2	замер $-4,5^0 = 7,6$ В	10	замер $-4,5^0 = 7,5$ В
3	замер $-8^0 = 12,6$ В	11	замер $-8^0 = 12,8$ В
4	замер $-10^0 = 18,3$ В	12	замер $-10^0 = 18,4$ В
5	замер $-11^0 = 22,2$ В	13	замер $-11^0 = 22,3$ В
6	замер $-13^0 = 27,2$ В	14	замер $-13^0 = 27,1$ В
7	замер $-14^0 = 33,2$ В	15	замер $-14^0 = 33,4$ В
8	замер $-15^0 = 36,0$ В	16	замер $-15^0 = 35,9$ В

Из этих данных получим коэффициент трансформации по формуле

$$K = K_{\text{возб}} / U_{\text{як}}$$

Таблица 11

№ п/п	По часовой стрелке	№ п/п	Против часовой стрелки
1	$K = 0,44 \times 10/36 = 0,1188$	9	$K = 0,46 \times 10/36 = 0,1242$
2	$K = 0,76 \times 10/36 = 0,2052$	10	$K = 0,75 \times 10/36 = 0,2025$
3	$K = 1,26 \times 10/36 = 0,3402$	11	$K = 1,28 \times 10/36 = 0,3456$
4	$K = 1,83 \times 10/36 = 0,4941$	12	$K = 1,84 \times 10/36 = 0,4968$
5	$K = 2,22 \times 10/36 = 0,5994$	13	$K = 2,23 \times 10/36 = 0,6021$
6	$K = 2,72 \times 10/36 = 0,7344$	14	$K = 2,71 \times 10/36 = 0,7317$
7	$K = 3,32 \times 10/36 = 0,8964$	15	$K = 3,34 \times 10/36 = 0,9018$
8	$K = 3,60 \times 10/36 = 0,972$	16	$K = 3,591 \times 10/36 = 0,969$

Полученная зависимость коэффициента, характеризующего геометрическую нейтраль электродвигателя постоянного тока от угла поворота, построена на рис. 6.

## Пример к разделу 5

### 5.1. Исходные данные для одного из вариантов по табл. 8

Тип индивидуального контактора	Изменяющийся влияющий фактор	Исходное значение для расчета по варианту	Упрощенная эмпирическая формула
ПК-41	Раствор контактов	$t_0 = 0,12$	$P_{pk} = 1,072t^2 - 0,1417t + 0,003971$

Результат расчета:  $P_{pk} = 1,072 \cdot 0,12^2 + 0,1417 \cdot 0,12 - 0,003971 = 28,4698 > 0,024 \dots 0,027$ , т.е. значение выходит за допускаемые нормы, следовательно (см. приложение, табл. 12 и 13), при таких условиях дальнейшая эксплуатация не возможна. При прочих условиях, связанных с ухудшением технического состояния каких-либо узлов электропневматического контактора, его необходимо снять, заменить и провести профилактику.

5.2. В процессе эксплуатации электровозов серии ЧС-2К возникла необходимость регулировки времени срабатывания электропневматических контакторов. Сначала при составлении программы микропроцессорной системы управления локомотивом (МСУЛ) для контакторов ПК-21 и ПК-19 было заложено время на включение и отключение, равное 0,06 с, но при автоматическом наборе и сбросе позиций на электровозах ЧС-2К это не позволяло собрать и разобрать электрическую схему, в связи с чем происходил сбой в работе. По причине отсутствия эмпирических данных была проведена серия опытов, показавшая требуемое фактическое значение исследуемых параметров.

Например, в результате проверки электропневматических контакторов ПК-21 в количестве 100 штук было зафиксировано время включения. Построен точечный график (рис.9) разброса, на основании которого могут быть определены пороговые значения.

Далее данные заносятся в персональный компьютер, и рассчитываются результаты, которые позволяют давать статистическую оценку параметров:

Среднее	0,105045.
Стандарт	0,001789.
Медиана	0,108.
Мода	0,08.
Дисперсия	0,00032.
Эксцесс	-0,86801.
Асимметрия	-0,05344.
Интервал	0,07.
Минимум	0,07.
Максимум	0,14.
Счет	100.
Наибольший	0,14.
Наименьший	0,07.

Гистограмма — один из инструментов пакета анализа. Попадание в указанные интервалы значений используются для вычисления выборочных и интегральных частот. При этом генерируются числа попаданий для заданного диапазона ячеек.

Вводится в поле диапазон ячеек и необязательный набор граничных значений, определяющих отрезки (карманы)

Карман	Частота	Интегральный, %
0,07	2	2,00
0,077	2	4,00
0,084	13	17,00
0,091	10	27,00
0,098	9	36,00
0,105	14	50,00
0,112	13	63,00
0,119	12	75,00
0,126	12	87,00
0,133	9	96,00
Еще	4	100
0,105	14	14,00
0,084	13	27,00
0,112	13	40,00
0,119	12	52,00
0,126	12	64,00

0,091	10	4,00
0,098	9	83,00
0,133	9	92,00
Еще	4	96,00
0,07	2	98,00
0,077	2	100

Строим гистограмму, показывающую частоту попадания результатов замеров в указанные интервалы значений (**в контрольной работе строить гистограмму не нужно**). Проанализировав все замечания, пришли к выводу, что требуется внести изменения в программу МСУЛ, изменить время срабатывания электропневматических контакторов на 0,2 с.

На основании всех проведенных замеров и расчетов делается вывод о том, что требуется повысить контроль за изготовлением и наладкой всех индивидуальных контакторов: электропневматических и электромагнитных.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

У контакторов в процессе эксплуатации изнашиваются рабочие поверхности контактов, детали подвижной системы, нарушается изоляция стоек и катушек, прогорают стенки дугогасительных камер, обрываются жилы гибких шунтов и проводов, слабнут или ломаются пружины, нарушается работа привода и регулировка основных параметров контакторов. Современные диагностические комплексы, благодаря новым технологиям, позволяют проводить контроль некоторых параметров, по которым можно судить о техническом состоянии рассматриваемого электрического оборудования. В процессе накопления экспериментального материала происходит уточнение допускаемых разбросов параметров.

Т а б л и ц а 12

Параметр	Значение параметра для контакторов						
	ПК-14 ПК-86	ПК-96 ПК-101	ПК-305, ПК-306А, ПК-306С	ПК-306Т, ПК-306Ф	ПК-350	ПКУ-1 ПКУ-2	1SVAD4, 1SVAD5
Раствор контактов, мм	24-27	Не менее 23	24-27	21-24	21-24	25,5-29	15-17
Конечное нажатие, Н(кгс)	23 (2,3)	Не менее 15 (1,5)	42-45 (4,2-4,5)	42-45 (4,2-4,5)	38-40 (3,8-4)	125-185 (12,5-18,5)	59 (5,6)
Провал контактов, мм	10-12	13-15	4-5,5	9-12	9-12	2,5-4	2-4

Т а б л и ц а 13

Параметр	Значение параметра для контакторов						
	КМВ всех типов	МК-310 МК-15-01	6SM	ТКПМ	КМ-10А-1	КТПВ	КМ-2311, КМ-2313
Раствор контактов, мм	21-24	$\frac{30-34}{28-34}$	18-21	8	6-8	11-15	4-4,5
Провал контактов, мм	6-12	7-9	-	4,0	5-7	2,4-3	2-3
Контактное нажатие, Н(кгс)	10-12 (1-1,2)	18-27 (1,8-2,7)	29 (2,9)	2,5 (0,25)	11-13 (1,1-1,3)	8-10 (0,8-1)	2-3 (0,2-0,3)

Допускаемые значения параметра усилия нажатия возвратной пружины подвижного контакта на плече 0,26 для электромагнитных контакторов МК – 310Б;  $P_{вп} = 16 \dots 20$ .

Допускаемые значения параметра короткозамкнутых витков для электромагнитных контакторов МК – 310Б;  $P_{кв} < 5$ .

Допускаемые значения параметра давления для электропневматических контакторов: ПК – 41, ПК – 21, ПК – 19, ПК–162А;  $P_d = 0,35 \dots 0,50$ .

Другие данные на контакторы ПК – 19 и ПК – 21; ПК – 41.

Время включения, с:

Min.....	0, 07
Max.....	0, 11
Номинальное.....	0,08
Итого.....	0,08± заданный %

Время отключения, с:

Min.....	0, 09
Max.....	0, 17
Номинальное.....	0,12
Итого.....	0,12± заданный %

При назначении и расчете допусков для диагностирования узлов электрооборудования были использованы серии экспериментов, представляющие следующие зависимости:

зависимость переходного сопротивления контактов электропневматического контактора ПК–41 от усилия нажатия притирающей пружины;

зависимость времени включения электропневматического контактора ПК–19 от раствора контактов;

зависимость времени отключения электропневматического контактора ПК–41 от усилия нажатия притирающей пружины;

зависимость времени включения электропневматического контактора ПК–41 от усилия нажатия притирающей пружины;

зависимость времени отключения электропневматического контактора ПК–21 от давления воздуха в магистрали;



зависимость времени включения электропневматического контактора ПК-41 от давления воздуха в магистрали;

зависимость коэффициента нейтрали электродвигателя постоянного тока П-11М от угла поворота траверсы;

зависимость времени включения электромагнитного контактора МК-310Б от усилия нажатия возвратной пружины;

зависимость времени включения электромагнитного контактора МК-310Б от усилия нажатия притирающей пружины;

зависимость индуктивности включающей катушки электромагнитного контактора МК-310Б от количества замкнутых витков;

зависимость индуктивности дугогасительной катушки электромагнитного контактора МК-310Б от количества замкнутых витков.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Измерения в электронике: Справочник / Под ред. В.А. Кузнецова. — М.: Энергоатомиздат, 1987.

2. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин. — М.: Энергоатомиздат, 1987.

3. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — СПб., 2000.

4. Руководство по эксплуатации «Доктор — 30 м». ЦВНТ 017.00.00 РЭ (последнее издание).

5. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. — М.: Машиностроение, 1987.

6. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник в 2-х книгах / Под ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1978.

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Задания на контрольную работу  
с методическими указаниями

Редактор *В.И. Чучева*  
Компьютерная верстка *Ю.А. Варламова*

---

Тип. зак.  
Подписано в печать 08.06.06  
Усл. печ. л. 3,75

Изд. зак.  
Гарнитура Times

Тираж 500 экз.  
Офсет  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2