

С.А. ГАВРИЛОВ, к.т.н., директор ПСП "Полтава-Автокомплект", Комсомольск;
Н.Н. ИШИН, к.т.н., доц., зам. директора НТЦ "Карьерная техника" Объединённого института машиностроения НАН Беларуси, Минск;
А.М. ГОМАН, к.т.н., доц., начальник отдела Объединённого института машиностроения НАН Беларуси;
А.С. СКОРОХОДОВ, к.т.н., вед. научный сотрудник Объединённого института машиностроения НАН Беларуси

ВИБРОМОНИТОРИНГ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ПРИРАБОТКИ

Изложены принципы и особенности вибродиагностики редукторов мотор-колес самосвалов БЕЛАЗ на стадии обкатки. Разработаны основные положения методики оценки качества изготовления и вибромониторинга редукторов. Приведены результаты отработки методики разбраковки в условиях их цеховой обкатки и рекомендации по оценке качества изготовления. В качестве интегрального критерия оценки сборки редукторов мотор-колес могут служить величина среднеквадратичных значений виброускорений в частотном диапазоне 3-100Гц и амплитуда вибраций на оборотной частоте торсионного вала.

Ключевые слова: зубчатая передача, приработка, вибромониторинг, контроль качества.

Введение. Актуальность задачи. В настоящее время одной из наиболее актуальных задач на производстве ОАО "БЕЛАЗ" является задача комплексного контроля качества изготовления, сборки и работоспособности наиболее ответственных приводных механизмов карьерных самосвалов и, прежде всего, лимитирующих их надежность и ресурс долговечности редукторов мотор-колес (РМК). В данной работе предложено оценивать качество изготовления и сборки РМК по данным анализа вибрационных характеристик при их обкатке в цеховых условиях. Предложенная методика также может быть использована в хозяйствах, эксплуатирующих самосвалы, при проведении ремонта.

Анализ проблемы. Основной целью вибродиагностики при производстве зубчатых приводных механизмов является контроль качества изготовления выпускаемой продукции. При этом может проводиться: разбраковка и ранжирование качества изделий; оценка стабильности технологического процесса их изготовления и сборки; выявление причин отказов и несоответствия служебных характеристик техническим требованиям и стандартам; оценка влияния на нормативно-технические характеристики вносимых конкретных изменений в конструкцию исследуемого объекта или технологический процесс изготовления его деталей и их сборки и др.

В качестве примера приведем результаты вибромониторинга процесса приработки зубчатой пары $z_1=z_2=40$, $m=3$, изготовленная по типовому технологическому процессу Минского завода автоматических линий [1]. Испытания образцов выбранных колес проводилась в испытательных коробках на стенде СИ-2 с замкнутым силовым контуром. Пьезоэлектрический датчик при измерениях устанавливается на подшипниковой опоре полукорпуса испытательной коробки.

Анализ спектров виброускорений показал, что происходит заметное перераспределение энергии между первыми кратными зубцовой частоте составляющими спектра в течение 45 часов от начала испытаний. Далее наблюдается ста-

билизация спектра и преобладающей становится одна из составляющих (в зависимости от режима работы). При работе стенда с частотой вращения вала двигателя $n=1000$ мин⁻¹ (зубцовые частоты $f_{z1}=1000 \times 40/60=666,66$ Гц, $f_{z2}=1333,33$ Гц, $f_{z3}=2000$ Гц, $f_{z4}=2666,66$ Гц) для нагрузки $T=20$ Н·м это третья кратная зубцовой частота, для 80 Н·м и 160 Н·м – вторая зубцовая (рисунок 1). Наблюдается также снижение общего уровня виброускорений (L_{lin}) после первых 18 часов работы при нагрузке 20Н·м (рисунок 2). Величины спектральных составляющих на зубцовых частотах и общие уровни виброускорений приведены также в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни виброускорений g при $n=1000$ мин⁻¹

Время наработ ки, час	T=20Нм				Время наработ ки, час	T=80Нм				Время наработ ки, час	T=160Нм			
	Зубцовые частоты			L_{lin}		Зубцовые частоты			L_{lin}		Зубцовые частоты			L_{lin}
	1	2	3			1	2	3			1	2	3	
0	0,142	0,104	0,103	0,7074	0	0,400	0,217	0,269	1,058	0	1,108	0,708	0,277	2,089
4			0,101	0,3694	4		0,410		1,012	4		0,971		1,925
18			0,080	0,3434	18		0,377		0,8477	18		0,910		1,899
28			0,115	0,3644	28		0,333		0,9601	28		0,814		2,001
45	0,050	0,055	0,128	0,3615	45	0,161	0,314	0,238	0,8723	45	0,660	0,982	0,338	1,852
55			0,110	0,3693	55		0,384		0,8355	55		0,869		1,820
75			0,135	0,2717	75		0,412		0,6541	75		0,856		1,670
95	0,023	0,052	0,097	0,3068	95	0,038	0,412	0,220	0,6854	95	0,159	1,041	0,357	1,518
115	0,037	0,051	0,117	0,2931	115	0,225	0,362	0,211	0,7306	115	0,699	0,881	0,150	1,682
135	0,020	0,036	0,205	0,3551	135	0,090	0,342	0,213	0,6645	135	0,260	0,860	0,296	1,456
155	0,015	0,055	0,128	0,3455	155	0,058	0,320	0,180	0,6526	155	0,148	1,025	0,444	1,433

Постановка задачи. Проводимая в качестве технологической операции обкатка ответственных приводных механизмов производства БЕЛАЗ даже по действующим относительно упрощенным методикам представляет большие возможности для ранжирования качества их изготовления и сборки и получения первичной информации при организации в перспективе мониторинга расходования ресурсов работоспособности лимитирующих технических систем, особенно РМК. Эффективность этих операций будет существенно выше, если их дополнить в течение всего периода обкатки периодическим контролем вибрационных спектров, регистрируемых с помощью специализированных диагностических комплексов.

Практически все регистрируемые на корпусных деталях механизмов составляющие вибрационных спектров генерируются динамическими возмущениями при сопряжениях деталей и их элементов и несут информацию о погрешностях их изготовления, а также свойствах и параметрах образуемых ими динамических систем. Большая часть частот анализируемых вибрационных спектров, имеющих повышенные амплитуды, являются вынужденными либо возбужденными ими собственными. Абсолютные значения вынужденных частот в различных соотношениях и пропорциях кратны главной оборотной частоте приводного двигателя, частотам пересопряжений зубьев сопрягаемых зубчатых колес, сопряжений элементов подшипников, шлицевых соединений, дисбалансов вращающихся масс и частотам других источников динамических возмущений [2].

Вместе с тем, необходимо отметить высокую сложность диагностирования РМК вибрационными методами. Вследствие конструктивных особенностей РМК пьезоэлектрические датчики приходится размещать на неподвижном корпусе редуктора, отстоящем на относительно большом расстоянии от диагностируемых элементов РМК, что, естественно, ослабляет и искажает вибрационные сигналы, генерируемые этими элементами.

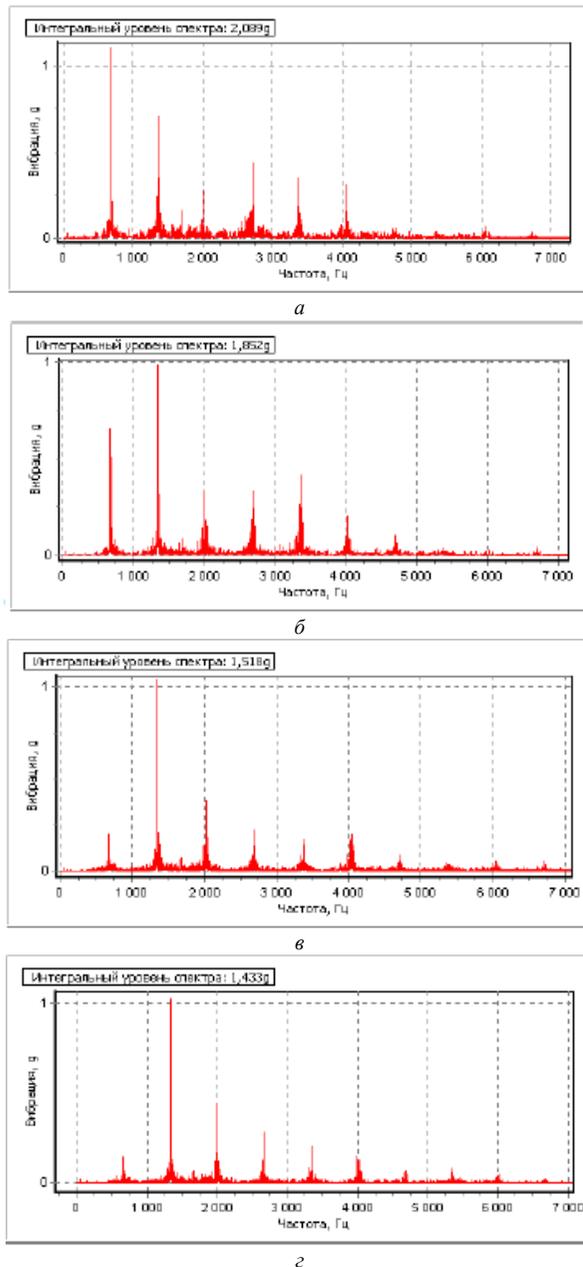


Рисунок 1 – Спектры виброускорений зубчатой пары в зависимости от времени наработки ($n=1000\text{мин}^{-1}$, $T=160\text{Н}\cdot\text{м}$):
 а – 0 час; б – 45 час; в – 95 час; г – 155 час

Решение названных задач требует разработки специальных методик и технологий распознавания и, при возможности, устранения причин повышенной виброакустической активности, которые следует рассматривать как составную часть технологического процесса производства ответственных механизмов.

Основные положения методик вибродиагностики, как правило, включают в себя следующие этапы:

- расчет основных частот вынужденных колебаний, характерных для конструкций механизмов;
- замер общего уровня и периодическая запись спектров вибраций;
- идентификация характерных частотных составляющих спектра с элементами конструкции;
- создание обобщенного амплитудно-частотного спектра для каждой контрольной точки;
- задание предельно допустимых значений параметров вибраций для идентифицированной характерной составляющей спектра и группы случайных составляющих в выбранной полосе частот для каждой точки измерения;
- ранжирование качества изготовления приводных механизмов, проводимое при их обкатке путем контроля общего

уровня вибраций и амплитудных спектров в контрольных точках и сравнения амплитуд их составляющих с предельно допустимыми, в том числе по критерию "годен – не годен";

- в случае выбраковки изделия производится дополнительный анализ его амплитудно-частотного спектра, идентифицируются и при возможности устраняются дефекты изделия, обусловившие зарегистрированные превышения контролируемых параметров спектра.

Материалы исследований. Было предложено технологическую операцию обкатки планетарных редукторов мотор-колес 130-тонного самосвала БЕЛАЗ, после их сборки (рисунок 3,б), дополнить контролем вибрационных характеристик. Кинематическая схема самосвала БЕЛАЗ приведена на рисунке 3,а.

Вибрации, генерируемые РМК при его обкатке на испытательном стенде, имеют сложный состав, частично отражающий поведение отдельных узлов и элементов при воздействии динамических нагрузок, возникающих в обычных условиях эксплуатации. Очевидно, что для рассматриваемой выборки механизмов, работающих в одинаковых условиях и с одинаковыми нагрузками, характеристики возмущающих воздействий и параметры ослабления сигналов должны быть близкими по величинам. Поэтому на основании сравнительного анализа вибраций обкатываемых редукторов можно получить объективные оценки состояния элементов РМК. Более того, поскольку механические элементы, имеющие дефекты, вызывают специфические изменения в частотном спектре, можно путем спектрального анализа вибрационного сигнала обнаружить те или иные конкретные дефекты.

Следует отметить, что детали и элементы редуктора мотор-колеса самосвала БЕЛАЗ имеют относительно невысокие частоты вращения рабочего и промежуточных валов.

При работе планетарных передач первого и второго ряда, из-за наличия погрешностей изготовления и сборки зубчатых колес, а так же механических дефектов на обоймах подшипников и дефектов на самих телах качения, возникают специфические вибрационные процессы. Причиной возникновения колебаний

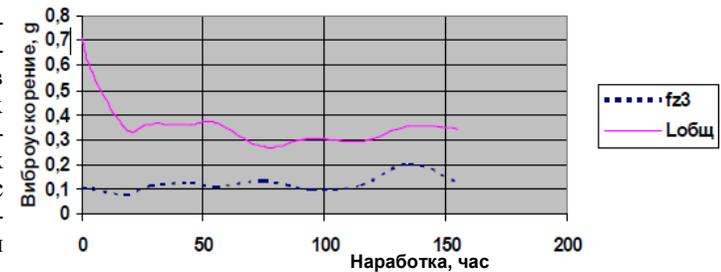


Рисунок 2 – Зависимость уровней виброускорений зубчатой пары от времени наработки при $n=1000\text{мин}^{-1}$ и $T=20\text{Н}\cdot\text{м}$

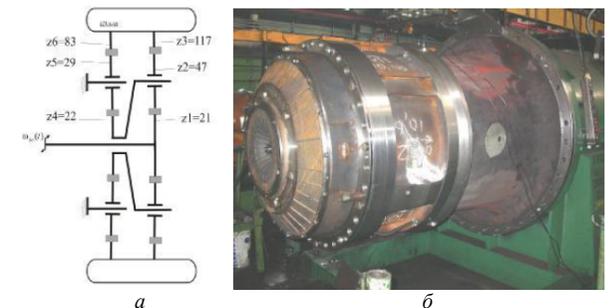


Рисунок 3 – Редуктор мотор-колеса карьерного самосвала БЕЛАЗ:

а – кинематическая схема; б – обкатка РМК на испытательном стенде

является ударное (импульсное) возбуждение. Время действия возбуждающего усилия очень мало и составляет чаще всего доли или единицы миллисекунд. Поскольку возбуждающее усилие носит кратковременный характер, то спектр частот возникающих свободных колебаний довольно широк: нижняя граница регистрируемых частот может быть ограничена, согласно расчету вынужденных частот элементов РМК, значением в 1 герц; верхняя граница регистрируемых сигналов должна быть не менее 2 килогерц.

Вторым диагностическим параметром вибраций, вызываемых дефектами, является частота повторения ударов от дефектов вращающихся элементов РМК. Наличие стационарного дефекта предполагает следование ударов через повторяющиеся промежутки времени. Длительность этих интервалов времени зависит от соотношения геометрических параметров зубчатых колес и элементов подшипников качения. Для достоверного диагностирования любого стационарного дефекта необходимо подряд зарегистрировать несколько импульсов одной природы, не менее 2-3. Это предполагает проведение непрерывной регистрации вибросигналов в течение достаточно длительного времени, за которое, теоретически, дефект должен несколько раз проявить себя. За это время контролируемый вал должен совершить несколько оборотов. Для диагностики тихоходных подшипников это требование очень жестко формулирует некоторые необходимые параметры приборов регистрации вибрации. Для подшипников с высокой частотой вращения эта проблема не стоит, т. к. при частоте вращения 50 герц (3000 оборотов в минуту) регистрация процессов в течение 10 оборотов занимает 0,2 секунды. При частоте же вращения вала в 1 герц (60 оборотов в минуту) это время составит уже 10 секунд.

При отработке методики разбраковки РМК в условиях их стендовой обкатки использовался анализатор спектра "Кварц", в значительной степени удовлетворяющий названным выше требованиям.

Результаты исследований. Обкатка редуктора мотор-колеса проводится на обкатном стенде (рисунок 4) на следующих режимах (здесь n – число оборотов вала двигателя):

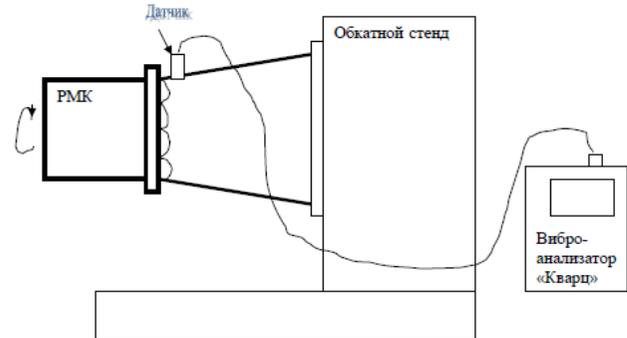


Рисунок 4 – Схема контроля вибраций при обкатке РМК на стенде

1. $n=800\text{мин}^{-1}$; продолжительность 20 минут;
2. $n=1500\text{мин}^{-1}$; продолжительность 25 минут.

Запись вибраций при обкатке РМК производится при установке пьезоэлектрического датчика на корпус редуктора. В ходе проведения

предварительных работ были записаны вибрации на четырех РМК (№291, №292, №297 и №336). Фиксирование измерительной информации велось периодически (через 4-5 мин) на протяжении всего времени обкатки (45-50 мин) [3].

Необходимо отметить высокую идентичность спектров, полученных при обкатке РМК, т.е. для каждого редуктора на режимах обкатки спектры практически

повторяются, что говорит о высокой стабильности возникающих при работе РМК колебательных процессов. Эта стабильность подтверждает возможность создания нужной производству методики оценки технического состояния РМК. Из приложенных к спектрам таблиц, отражающих изменения в течение периода обкатки регистрируемых среднеквадратичных значений (СКЗ) виброускорений, виброскорости, виброперемещений, можно отметить логически вполне объяснимое некоторое их снижение вследствие приработки сопрягаемых поверхностей.

Анализ полученных при обкатке РМК спектров показывает, что качество обкатки и срок объективно рациональной ее длительности можно определить по установлению устойчивой в течение обкатки (1/2–2/3 часа на 2-х режимах) тенденции к минимальному снижению СКЗ (на 5-10%) по крайней мере одной из групп регистрируемых параметров: виброускорений, виброскорости или виброперемещений, а также приемлемости или обнаруживаемости (на слух) различий уровней создаваемых шумов. При выполнении этого условия, которое было выдержано при обкатке обоих редукторов (№291 и №292), качество редуктора может быть признано удовлетворительным и длительность обкатки достаточной.

Качество изготовления и сборки редуктора можно признать также приемлемым или допустимым, если для достижения выявления тенденции снижения СКЗ параметров вибрационных спектров окажется достаточным простое увеличения длительности обкатки еще на 30-40 минут, т.е. введения индивидуальной длительности и проведения дополнительных записей и анализа вибрационных спектров и шумовых характеристик. Индивидуальное увеличение длительности обкатки экономически также целесообразно, т.к. это позволит в ряде случаев отказаться от значительно более трудоемкой переборки редукторов.

Качественное несоответствие перечисленным критериям и после проведения индивидуальной для конкретного редуктора длительности обкатки проверяется дополнительным анализом регистрируемых вибрационных спектров на характерных частотах, прежде всего зубцовых и кратных им. В ходе выполнения настоящей работы такой случай имел место при обкатке редуктора РМК № 297. При обкатке названного редуктора он был забракован контролером первично по шумовым характеристикам в зоне первой планетарной ступени на слух. Одновременно нами были выявлены в зарегистрированных вибрационных спектрах значительные превышения (до полутора раз) СКЗ виброускорений и виброскорости. Редуктор был подвергнут переборке.

Поскольку измерения с помощью низкочастотного датчика велись только на РМК №297 и №336 сравнение и анализ записанных вибрационных спектров проводилось для этих редукторов.

Общий уровень вибраций при обкатке на 800мин^{-1} в низкочастотном спектре РМК №336 (таблица 3) составил

Таблица 2 – Параметры вибраций РМК №297

$n, \text{мин}^{-1}$	№замера	1	2	3	4	5
800	Время замера	15.17	15.21	15.28	15.31	15.37
	СКЗ виброускорений, м/с ²	1,636	1,510	1,636	1,815	1,681
	СКЗ виброскорости, мм/с	0,527	0,566	0,717	0,683	0,673
	СКЗ виброперемещений, мкм	8,290	7,026	10,921	7,716	9,008
1500	Время замера	15.40	15.43	15.49	15.51	15.54
	СКЗ виброускорений, м/с ²	3,574	3,899	3,750	3,487	3,667
	СКЗ виброскорости, мм/с	1,105	1,203	1,229	1,208	1,274
	СКЗ виброперемещений, мкм	13,104	16,165	13,092	14,261	11,902

Таблица 3 – Параметры вибраций РМК №336

$n, \text{мин}^{-1}$	№замера	1	2	3	4	5
800	Время замера	14.37	14.42	14.48	14.49	14.55
	СКЗ виброускорений, м/с^2	0,998	1,101	0,895	1,014	0,951
	СКЗ виброскорости, мм/с	0,447	0,466	0,409	0,438	0,432
	СКЗ виброперемещений, мкм	6,290	6,860	6,120	6,560	6,110
1500	Время замера	15.08	15.09	15.18	15.25	15.30
	СКЗ виброускорений, м/с^2	2,474	2,399	2,249	2,272	2,221
	СКЗ виброскорости, мм/с	1,549	1,327	1,219	1,231	1,203
	СКЗ виброперемещений, мкм	8,444	8,265	8,192	8,199	6,902

на режиме 1500мин^{-1} СКЗ вибраций на РМК №336 составил в среднем $2,3\text{м/с}^2$, на РМК №297 (таблица 2) – в среднем $4,8\text{м/с}^2$. Т.е. общий уровень вибраций на частоте до 100Гц на "хорошем" и "плохом" РМК

имеет разницу по величине в два раза. Этот факт уже может служить первым этапом разбраковки РМК.

На спектрах "плохого" РМК №297 на режиме 800 мин^{-1} (рисунок 5,а)

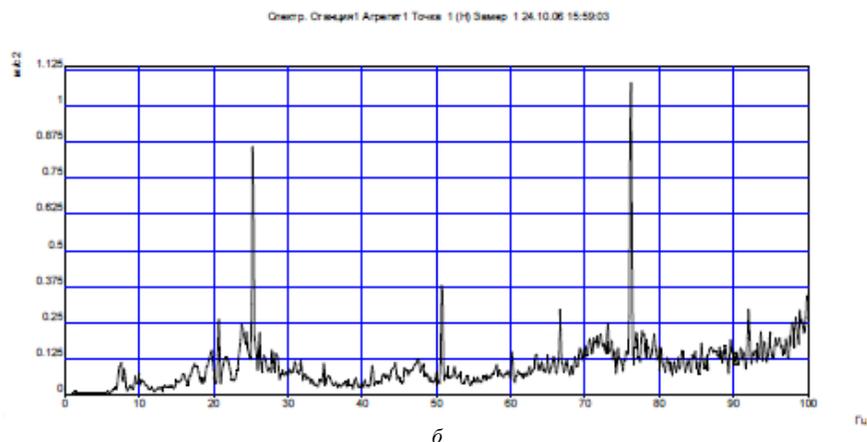
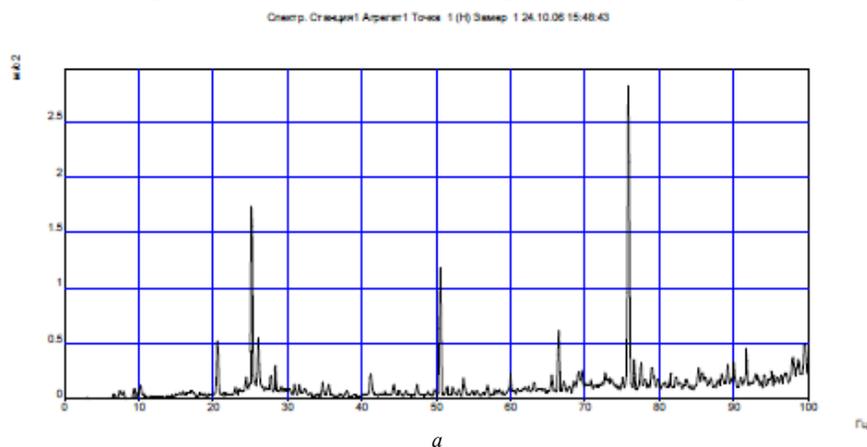


Рисунок 5 – Амплитудно-частотный спектр РМК №297 (низкочастотный датчик):
а – в начале обкатки; б – в конце обкатки

наибольшие амплитуды в спектре имеют частоты, кратные оборотной: 14Гц – оборотная, 28Гц – 2-ая оборотная (имеет определяющую в спектре амплитуду); 42 и 56Гц – соответственно 3 и 4-ая оборотные частоты.

На режиме 1500мин^{-1} (рисунок 5,б) преобладающими частотами опять же являются частоты, кратные оборотной (т.е. оборотная – 25Гц , вторая – 50Гц и третья – 75Гц), но наиболее значимой по мощности уже является 3-я оборотная. Этот результат хорошо согласуется с известными методическими положениями о том, что в случае наличия погрешностей изготовления и монтажа зубчатых колес (что имело место на первой ступени РМК №297) на первый план по мощности в спектре выходят частоты, кратные оборотной.

На спектрах РМК №336 (режим 800 мин^{-1} , рисунок 6,а) частоты, кратные оборотной (14Гц), проявляются незначительно: амплитуда составляющей спектра на частоте 28Гц в 2 раза ниже, чем на оборотной частоте, 3-я оборотная вообще отсутствует.

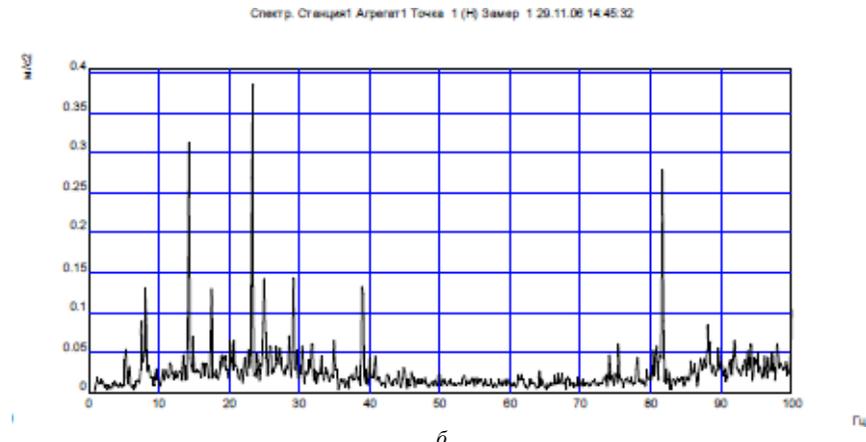
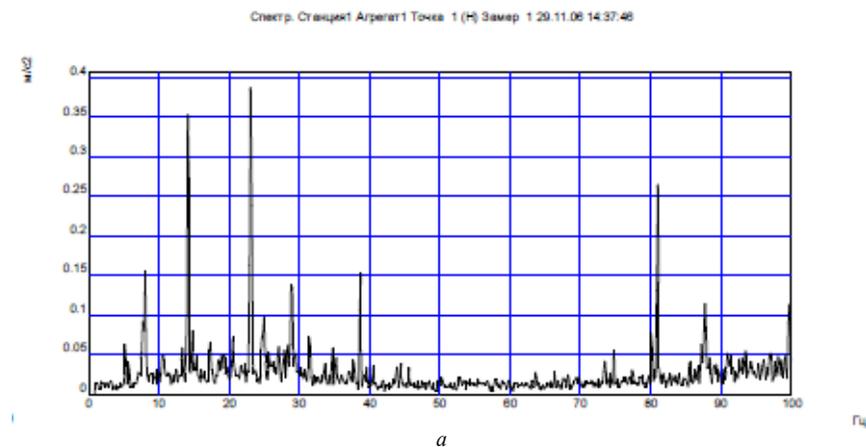


Рисунок 5 – Амплитудно-частотный спектр РМК №336 (низкочастотный датчик):
а – в начале обкатки; б – в конце обкатки

При обкатке на режиме 1500мин^{-1} (рисунок 6,б) на спектре "главенствует" только 1-ая оборотная частота, равная 25Гц, другие частоты практически отсутствуют. Этот факт, при его дальнейшем подтверждении, т.е. при присутствии на спектре только оборотной частоты определенной амплитуды и практическом отсутствии остальных, может быть рекомендован в качестве второго критерия сравнительной оценки качества обкатываемых РМК.

На анализируемых спектрах также четко выделяются повышенные составляющие вибраций на зубцовых 1-го ряда и кратных им гармониках: при частоте вращения входного торсиона 800мин^{-1} – зубцовая частота 1-го ряда 256Гц и ее гармоники 1018Гц (4-я) и 1762Гц (7-я); при частоте вращения торсиона 1500мин^{-1} – зубцовая частота 1-го ряда (475Гц) и ее 2-я – 4-я гармоники (962; 1437; 1893Гц).

После переборки 1-го планетарного ряда и замены коронного колеса редуктор был обкатан и сдан.

Выводы. Отработка методики разбраковки РМК в условиях их цеховой обкатки показала высокую эффективность вибрационной диагностики для ранжирования качества изготовления РМК. Установлено, что в качестве интегрального критерия оценки сборки РМК могут служить величина СКЗ виброускорений в частотном диапазоне 3-100Гц и амплитуда вибраций на оборотной частоте торсионного вала.

Рекомендовано оценивать качество изготовления обкатываемых РМК самосвалов 75131 как:

- удовлетворительное – при регистрации допустимых уровней амплитуд на характерных частотах и регистрируемому минимальному снижению СКЗ по крайней паре одного из контролируемых параметров (виброускорений, вибро-скорости, виброперемещений) в течение обкатки (на 5% и более);
- допустимое – при выявлении тенденции снижения амплитуд вибраций в течение предусмотренного срока обкатки с дополнительным его увеличением на 30-45мин;
- неудовлетворительное – при превышении отдельных амплитуд регистрируемых спектров на характерных частотах, прежде всего оборотных, зубцовых и кратных им, более чем на 20% по сравнению с опорными и отсутствии тенденции к их снижению и уменьшению СКЗ в течение двойного от предусмотренного срока обкатки.

Список литературы: 1. Комплексный контроль и повышение качества зубчатых приводных механизмов для машиностроения: методические рекомендации / О.В. Берестнев, В.Е. Антонюк, Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.Н. Панов, А.С. Скороходов, Я.О. Берестнев, В.Н. Русецкий, В.С. Александрова, Е.П. Петина. – Минск: БелГИСС, 2009. – 115с. 2. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – Издательство стандартов, 2010. – 25с. 3. Разработать алгоритмы работы, программное обеспечение и электронный блок вибромониторинга мотор-колес: отчет о НИР (промежуточный) / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, рук. темы Н.Н. Ишин. – Мн., 2008. – 68с.

Bibliography (transliterated): 1. Kompleksnyj kontrol' i povyshenie kachestva zubchatyh privodnyh mehanizmov dlja mashinostroeniija : metodicheskie rekomendacii / O.V. Berestnev, V.E. Antonjuk, N.N. Ishin, A.M. Goman, A.N. Panov, A.S. Skorohodov, Ja.O. Berestnev, V.N. Ruseckij, V.S. Aleksandrova, E.P. Petina. – Minsk : BelGISS, 2009. – 115p. 2. GOST R ISO 13373-2-2009. Kontrol' sostojanija i diagnostika mashin. Vibracionnyj kontrol' sostojanija mashin. Chast' 2. Obrabotka, analiz i predstavlenie rezul'tatov izmerenij vibracii. Izdatel'stvo standartov, 2010, 25p. 3. Razrabotat' algoritmy raboty, programmnoe obespechenie i jelektronnyj blok vib-romonitoringa motor-koles: otchet o NIR (promezhutochnyj) / Obedinennyj institut mashinostroeniija NAN Belarusi, ruk. temy N.N.Ishin. – Minsk, 2008g. – 68p.

Поступила (received) 27.04.2015