

УДК 669.02/.09:658.58

ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СКИПОВЫХ ЛЕБЕДОК ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В. А. Сидоров

Донецкий национальный технический университет (г. Донецк, Украина)

Диагностирование скиповых лебедок доменных печей имеет отличительные особенности из-за работы в повторно-кратковременном режиме с изменением направления вращения. Это необходимо учитывать при разработке алгоритма диагностирования, используя комплекс методов вибрационного контроля, включающий измерение общего уровня вибрации, спектральный анализ и запись временных реализаций вибрационного сигнала. Измеренные параметры — вибростойкость и виброускорение — позволяют решить вопросы оценки технического состояния и локализации возникающих повреждений.

Ключевые слова: скиповая лебедка, доменная печь, диагностирование, вибрационный контроль, техническое состояние.

Подача шихтовых материалов на колошник доменной печи к загрузочному устройству осуществляется скипами или конвейерами (для печей объемом свыше 2500 м³). Высота подъема материалов 40 — 80 м зависит от объема доменной печи. Скиповый подъемник является одним из элементов, обеспечивающих непрерывность технологического процесса, и включает скипы, наклонный мост и скиповую лебедку. Грузоподъемность лебедок 15 — 39 т, скорость подъема 180 — 240 м/мин, время загрузки — до 70 %.

Неизменность элементов скиповых лебедок [1 — 5] показывает, что в целом используемая конструкция удовлетворяет требованиям долговечности и ремонтнопригодности. Безотказность данного механизма обеспечивается своевременным техническим обслуживанием и ремонтом. Различие в числе двигателей и редукторов, мощности и габаритов, основных и аварийного тормоза проявляется при сравнении одной из первых скиповых лебедок фирмы «Отис» и одной из последних — модели ЛС-39-1 (рис. 1). Это позволяет использовать при диагностировании данных механизмов однотипный подход, учитывая периодичность работы и разные массы поднимаемого груза.

Длительные сроки эксплуатации приводят к появлению и развитию неисправностей, устранение которых требует продолжительной остановки доменной печи. Это повреждения подшипников, разрушение которых приводит к износу и поломкам зубчатых передач, и повреждения зубчатых передач из-за несовпадения углов наклона зубьев шевронной передачи при замене шестерни (рис. 2). Наибольшая длительность ремонта связана с заменой барабана, что часто является следствием ослабления резьбовых соединений. Нарушение режима смазывания, замена и регулировка тормозов дополняют этот перечень неисправностей. Некоторые повреждения обнаруживаются при визуальном осмотре, другие остаются скрытыми до этапа критического разрушения, предшествующего отказу, и приводят к необходимости выполнения дополнительных работ при ремонте.

Контроль технического состояния с использованием методов технического диагностирования позволяет

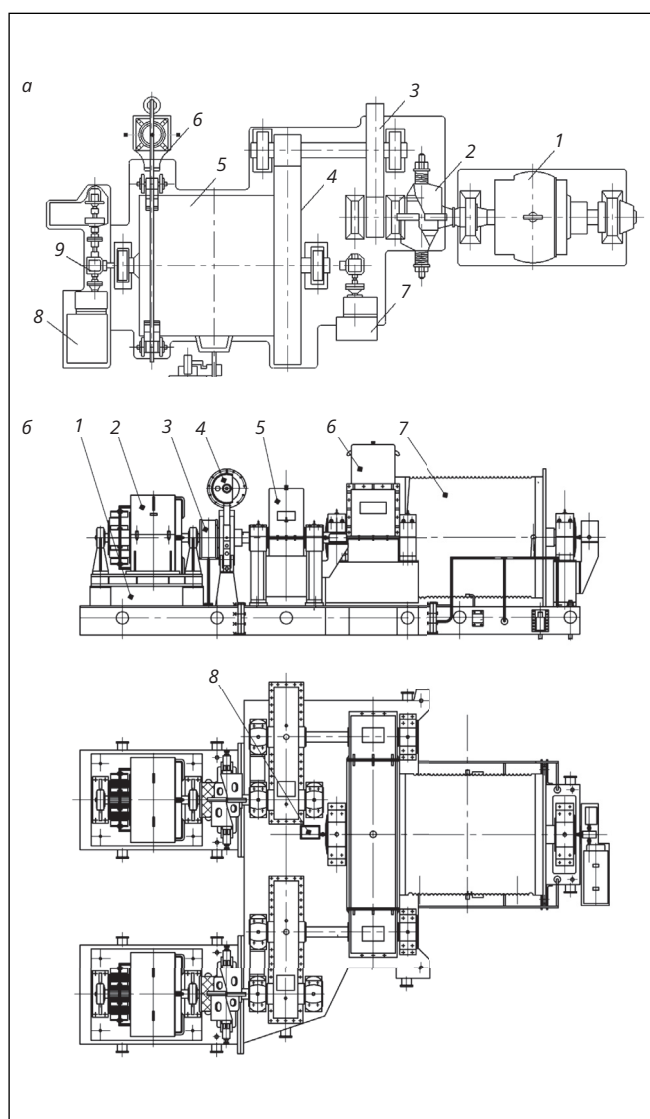


Рис. 1. Сравнение схем расположения элементов скиповых лебедок фирмы «Отис» (а: 1 — электродвигатель; 2 — рабочий тормоз; 3 — быстроходный и 4 — тихоходный редукторы; 5 — барабан; 6 — аварийный тормоз; 7 — 9 — выключатели; 7 — аварийный, 8 — рабочий, 9 — центробежный) и модели ЛС-39-1 (б: 1 — станина; 2 — электродвигатель; 3 — зубчатая муфта; 4 — тормоз; 5 — быстроходный и 6 — тихоходный редукторы; 7 — барабан; 8 — командоаппарат)

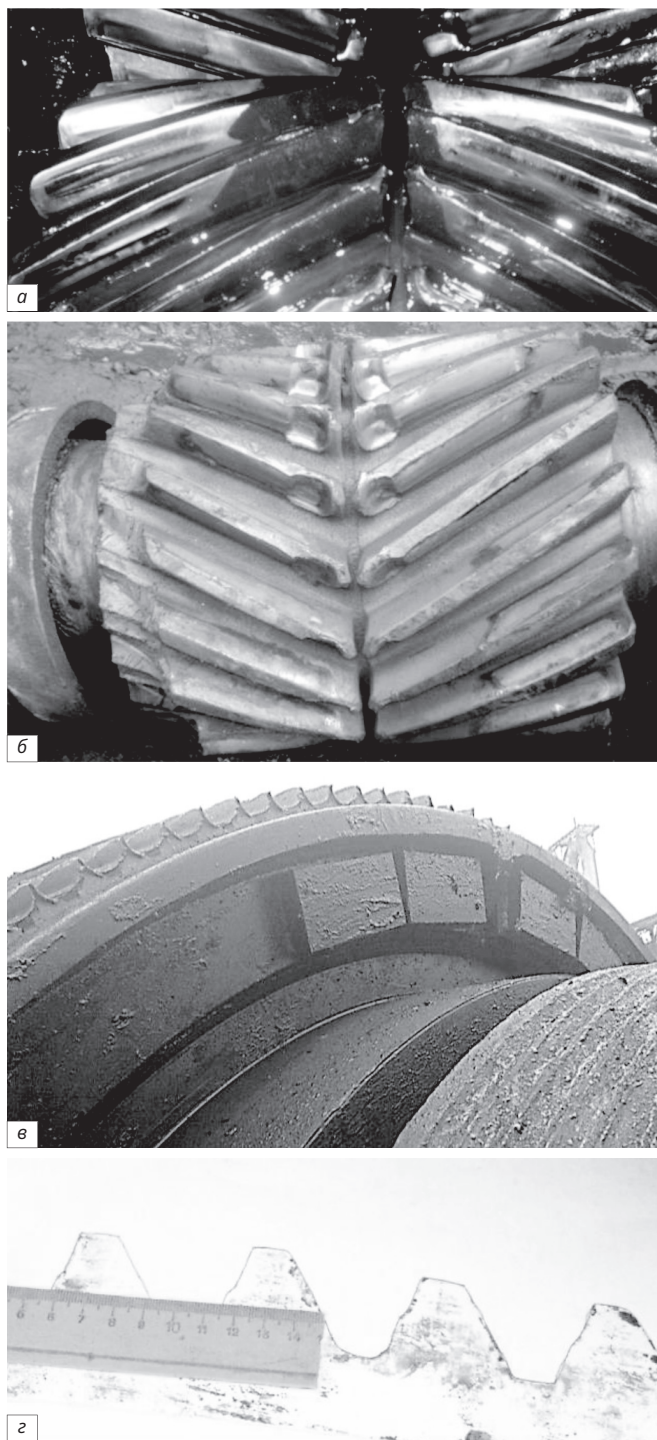


Рис. 2. Повреждения зубчатых передач скиповой лебедки: а — смещение пятна контакта; б — разрушение зубьев; в — промежуточный вал; г — износ венца барабана

определить характер повреждения и сократить время ремонта за счет более раннего проведения подготовительных работ. Наиболее информативны измерения параметров вибрации [6 – 10], используемые при оценке технического состояния механизмов роторного типа энергетического оборудования, работающего в длительном режиме. Известны попытки использовать данный подход для построения стационарной системы вибромониторинга скиповой лебедки [11]. В работе [12] для идентификации причин вибрации и

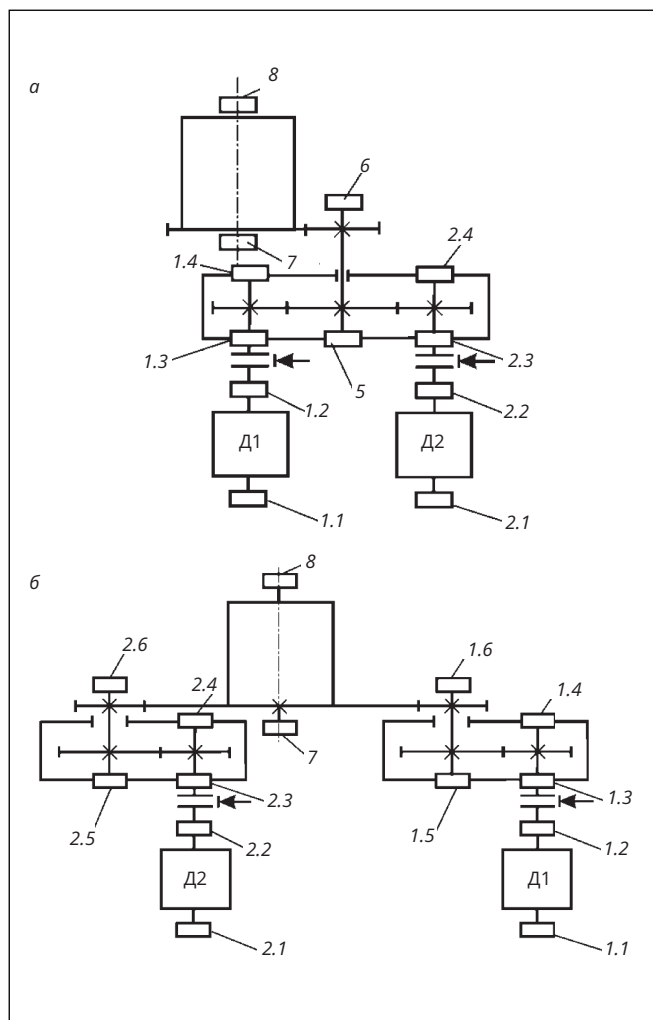


Рис. 3. Расположение точек измерения (см. табл. 1 – 3) вибрации для скиповой лебедки: с одним (а) и с двумя (б) промежуточными валами

повышения точности диагностирования роторных машин, работающих с переменной скоростью вращения, предложен метод многократного дискретного измерения вибрационных параметров. Диагностирование механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме при изменении направления вращения и разной нагрузке, имеет отличительные особенности, которые следует учитывать при построении алгоритма диагностирования и правил распознавания дефектов, что и составляет основную цель данной статьи.

Анализ конструкции и выбор точек контроля параметров вибрации. Скиповые лебедки на металлургических заводах в основном представлены двумя конструкциями — с одним и двумя промежуточными валами. Наличие выносных опор и три направления измерения параметров вибрации (вертикальное, горизонтальное, осевое) определяют расположение точек контроля (рис. 3) и обозначение, соответствующее принятым заводским правилам. В целом расположение контрольных точек соответствует рекомендациям стандарта ISO 10816-1–97 [13].

Особенностью работы скиповой лебедки является реверсирование приводных двигателей, при котором

Таблица 1. Виброскорости (СКЗ, мм/с) для скиповой лебедки С-15-180 (аварийное состояние)

Точки измерения	Подъем правого скипа, направление			Подъем левого скипа, направления		
	вертикальное	горизонтальное	осевое	вертикальное	горизонтальное	осевое
1.1	1,8	1,3	4,5	0,9	1,4	3,0
1.2	1,4	4,7	1,5	0,9	2,2	1,4
1.3	2,7	2,8	3,4	10,0	2,9	3,6
1.4	9,2	6,1	9,2	4,0	7,2	6,1
2.1	1,8	1,3	2,5	0,7	1,8	1,4
2.2	2,1	4,2	1,4	1,3	2,2	1,4
2.3	1,8	4,6	4,2	1,6	4,1	4,5
2.4	5,1	3,3	5,1	4,6	3,2	5,2
5	6,9	5,6	16,1	1,0	4,9	5,9
6	3,5	7,7	9,8	0,6	5,5	4,2
7	4,6	2,2	3,4	2,7	3,0	1,5
8	1,4	1,6	1,4	0,7	1,8	0,6

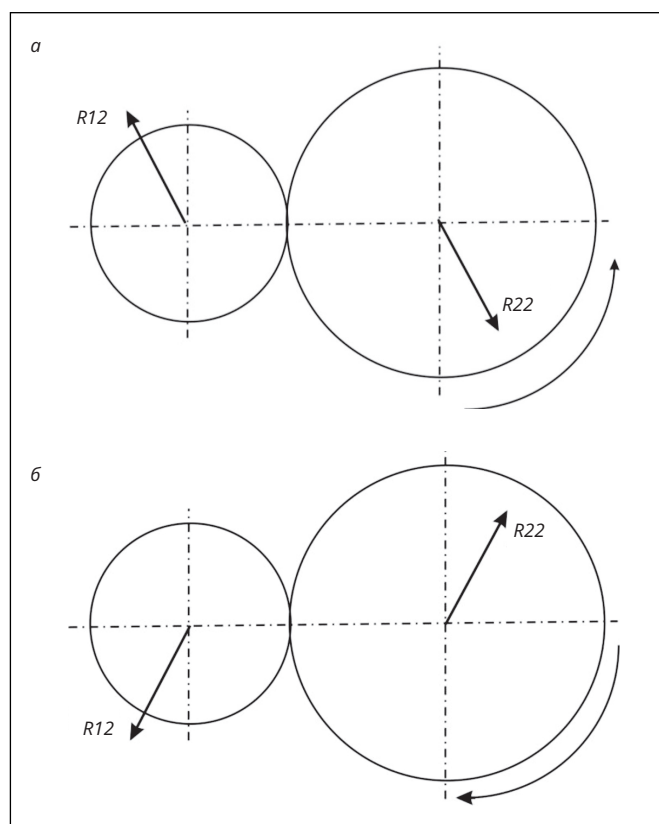


Рис. 4. Изменение направления действующих сил при реверсировании зубчатой передачи

изменяются направления действующих сил в зубчатых передачах (рис. 4). Это приводит к изменению общего уровня вибрации в вертикальном и горизонтальном направлениях и требует проведения двух последовательных циклов измерения параметров общего уровня вибрации (при подъеме левого и правого скипов). Одновременно появляется возможность использования горизонтального направления при спектральном анализе. Дополнительно могут использоваться контурные диаграммы вибрации, позволяющие оценить

качество затяжки резьбовых соединений и состояние фундамента. Оценка одновременности срабатывания тормозов и их состояния реализуется при расположении датчиков на рычагах или тормозных колодках.

Выбор режимов измерения вибрации проводится с учетом кинематических характеристик элементов и ограниченного циклом работы (около 30 с) времени проведения измерений. Частотные диапазоны для диагностирования скиповой лебедки С-15-180 включают частоты:

вращения промежуточных валов и вала барабана (0,4 – 2,8 Гц);

вращения быстроходного вала и зубчатых передач (10,3 – 341 Гц);

подшипников качения (10 – 5000 Гц).

Рекомендуемые параметры измерений общего уровня вибраций:

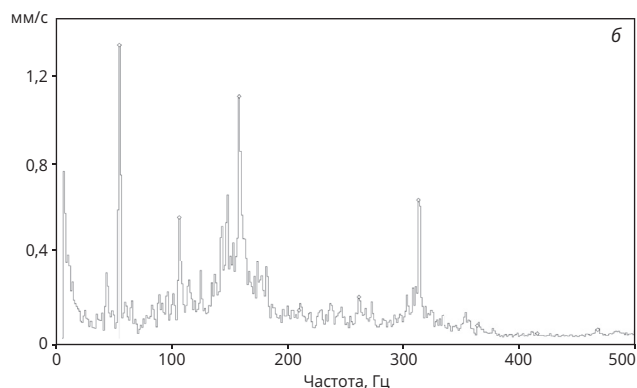
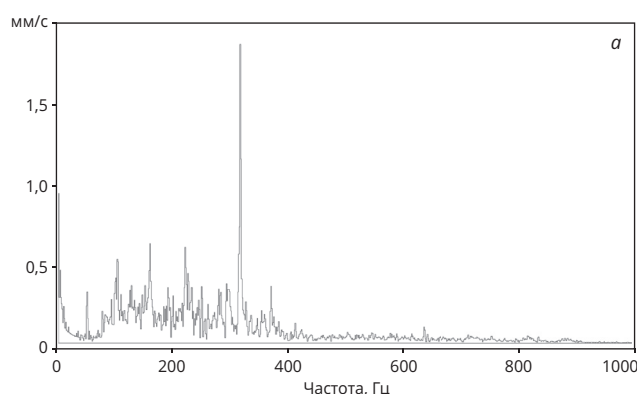
виброскорость — среднеквадратичное значение (СКЗ) в частотном диапазоне 10 – 1000 Гц, дополнительно может быть использован диапазон 2 – 200 Гц;

виброускорение — среднеквадратичное и пиковое (ПИК) значения в частотном диапазоне 10 – 5000 Гц.

Общий уровень вибрации измеряют виброметрами с непрерывным интегрированием при подъеме правого и левого скипов (табл. 1). Загруженность коксом или агломератом не оказывает значительного влияния на результаты измерения параметров вибрации. Установлено, что оценка технического состояния скиповых лебедок проводится относительно следующих значений: до 4,5 мм/с — функционирование без ограничения сроков; 4,5 – 7,1 мм/с — функционирование в ограниченном периоде; свыше 7,1 мм/с — возможны повреждения машины. Следовательно, результаты, приведенные в табл. 1, соответствуют аварийному состоянию и требуют проведения ремонтов в ближайшее время. Разница в значениях виброскорости по контрольным точкам при работе правого и левого скипов в данном случае — результат ослабления затяжки резьбовых соединений, износа посадочных мест подшипников. Для скиповой лебедки,

Таблица 2. Виброскорости (СКЗ, мм/с) для скиповой лебедки С-15-180 (удовлетворительное состояние)

Точки измерения	Подъем правого скипа, направление			Подъем левого скипа, направления		
	вертикальное	горизонтальное	осевое	вертикальное	горизонтальное	осевое
1.1	0,5	0,9	2,5	0,4	0,8	1,7
1.2	1,1	1,1	3,0	0,5	1,0	1,5
1.3	1,2	1,6	1,0	1,4	1,2	1,1
1.4	1,0	1,4	1,3	0,5	2,1	0,8
2.1	0,3	1,0	1,3	0,6	0,6	0,9
2.2	0,6	0,8	3,4	0,6	1,0	1,5
2.3	1,7	3,3	1,7	1,5	2,1	2,2
2.4	2,5	1,1	1,5	1,9	1,3	1,1
5	0,9	1,6	2,4	0,8	2,9	2,8
6	0,5	2,6	1,4	0,6	1,4	1,9
7	0,4	1,0	0,9	0,7	0,7	1,5
8	0,8	0,7	0,6	0,3	0,8	0,06

**Рис. 5.** Спектрограммы виброскорости подшипниковых узлов скиповой лебедки: а — преобладание зубцовой частоты быстроходной передачи; б — появление гармоник зубцовой частоты тихоходной передачи

находящейся в удовлетворительном состоянии, характерны данные, приведенные в табл. 2.

Значения виброускорения в частотном диапазоне 10 – 5000 Гц позволяют локализовать неисправные подшипники и оценить качество проведенного ремонта (табл. 3). При этом необходимо учитывать начавшийся процесс приработки, погрешности монтажа и неустраненные повреждения.

Таблица 3. Значения виброускорения, м/с^2 , в частотном диапазоне 10 – 5000 Гц для контрольных точек для скиповой лебедки С-22,5-210 до/после ремонта

Точки измерения	СКЗ	ПИК
1.1	0,7/1,8	3,0/6,3
	0,5/1,3	2,1/4,4
1.2	1,3/1,3	8,7/6,2
	1,1/1,5	6,9/5,2
1.3	0,7/1,3	3,2/4,3
	0,7/0,9	3,9/2,9
1.4	1,2/2,3	7,4/8,0
	0,8/1,8	3,1/5,1
1.5	1,5/1,9	5,5/6,2
	0,8/1,0	3,8/3,5
1.6	0,7/0,6	3,3/2,6
	0,5/1,1	2,6/3,1
2.1	6,2/1,3	25,1/4,9
	5,8/5,9	23,4/16,2
2.2	2,9/8,4	15,3/26,4
	3,2/1,6	12,8/6,1
2.3	1,5/1,4	7,3/5,4
	4,5/6,0	35,5/24,0
2.4	4,2/10,1	16,2/35,4
	9,7/4,1	55,1/13,3
2.5	1,6/1,1	5,9/4,3
	3,3/4,9	12,7/16,0
2.6	1,0/2,9	5,3/11,6
	5,0/0,6	21,2/1,5
7	0,4/0,5	1,9/1,7
	0,7/0,87	3,3/3,0
8	0,5/0,4	2,2/2,6
	0,3/0,7	2,0/28

В целом для оценки состояния подшипников качения скиповой лебедки можно ориентироваться на следующие граничные значения виброускорения:

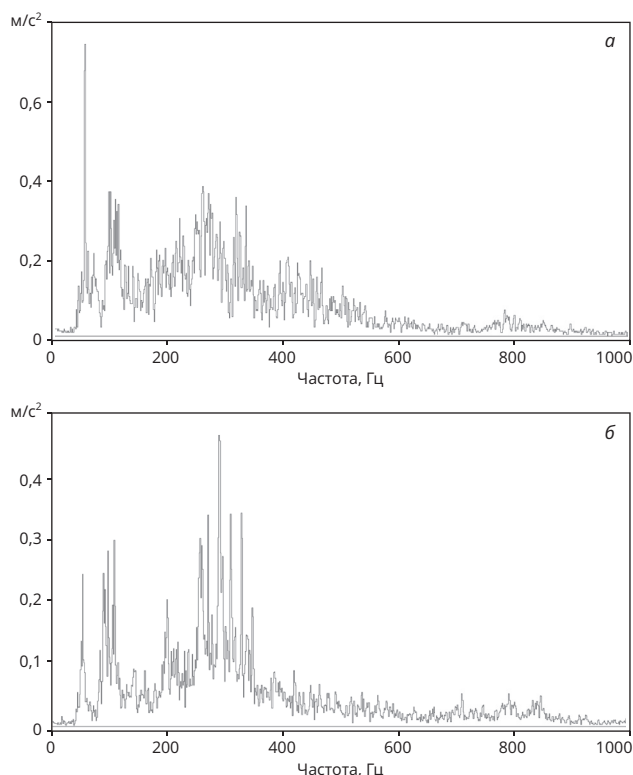


Рис. 6. Спектрограммы виброускорения в т. 5 (см. рис. 3) без (а) и при (б) реверсировании зубчатой передачи

- 1) хорошее состояние — ПИК не превышает $10,0 \text{ м/с}^2$;
- 2) удовлетворительное состояние — СКЗ не превышает $10,0 \text{ м/с}^2$;
- 3) плохое состояние — СКЗ превышает $10,0 \text{ м/с}^2$.

Спектральный анализ проводится после измерений вибрационного сигнала в горизонтальном направлении с линейным усреднением 3–4 при стабилизации частоты вращения двигателей. Учитывается наличие и количество гармоник зубчатого зацепления (рис. 5). Спектры виброускорения позволяют определить различия в работе подшипников при реверсе механизма (рис. 6).

Анализ временной реализации вибрационного сигнала проводится после записи в режиме осциллографирования без усреднения всего цикла работы скиповой лебедки. Временная реализация вибрационного сигнала виброскорости соответствует режиму скоростного нагружения механизма (рис. 7, а). По параметрам виброускорения (рис. 7, б) определяют увеличение динамических сил.

Постановка диагноза содержит данные о техническом состоянии, перечень возможных повреждений и рекомендации о сроках и объемах предполагаемого ремонта. Заключительной стадией диагностирования является визуальный осмотр, подтверждающий поставленный диагноз и однозначно визуализирующий обнаруженные повреждения. В процессе проведения ремонта необходимо подтвердить устранение причины ухудшения технического состояния.

Особенностью диагностирования скиповой лебедки с применением одно- и двухканальных виброанализаторов (сборщиков данных) является длительное

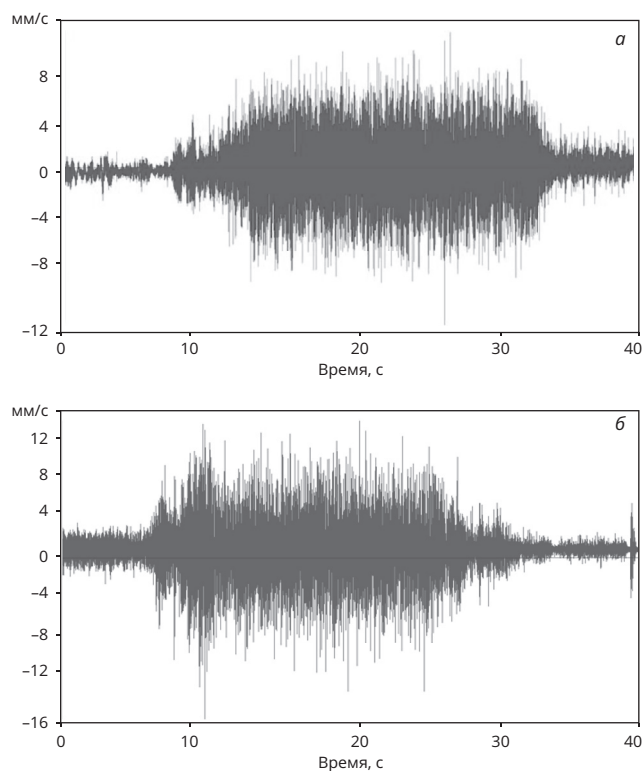


Рис. 7. Временной сигнал виброскорости (а) и виброускорения (б)

проведение измерений из-за технологических пауз при ожидании следующей подачи. Фактически вибрационная картина механизма формируется из отдельных фрагментов реализаций процесса загрузки с разными параметрами. Наиболее рациональным решением является применение многоканальных виброизмерительных систем с одновременной записью сигналов виброускорения. Синхронизация полученных данных позволяет получить дополнительную информацию о состоянии и провести измерения в одинаковых условиях конкретных реализаций.

Скорость развития повреждений механической части скиповых лебедок обычно составляет несколько месяцев. В развитом состоянии повреждения уверенно обнаруживаются органолептическими методами. Раннее обнаружение повреждений требует высокой квалификации специалиста по вибрационной диагностике. Поэтому установка стационарных систем вибрационного контроля может быть оправданной при реализации функций защиты от внештатного режима работы. А периодический вибрационный контроль (раз в три–четыре месяца) с использованием многоканальных систем и комплексного подхода к оценке технического состояния обеспечит ремонтные службы своевременной информацией о техническом состоянии механической части скиповой лебедки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грузинов В. К. Механическое оборудование доменных цехов. — М.: Машгиз, 1949. — 612 с.
2. Леонидов Н. К. Сооружение и оборудование доменных цехов. — М.: Metallurgizdat, 1955. — 400 с.

3. **Щиренко Н. С.** Механическое оборудование доменных цехов : учебн. пособие. — М. : Metallurgizdat, 1962. — 524 с.
4. **Левин М. З., Седуш В. Я.** Механическое оборудование доменных цехов. — Киев — Донецк : Вища школа, 1978. — 176 с.
5. **Целиков А. И., Полухин П. И., Гребеник В. М.** и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 1. Машины и агрегаты доменных цехов. — М. : Металлургия, 1987. — 440 с.
6. **Голуб Е. С., Мадорский Е. З., Розенберг Г. Ш.** Диагностика судовых технических средств : справочник. — М. : Транспорт, 1993. — 150 с.
7. **Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. — 169 с.
8. **Петрухин В. В., Петрухин С. В.** Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации : учеб. пособие. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. — 168 с.
9. **Гольдин А. С.** Вибрация роторных машин. — 2-е изд. испр. — М. : Машиностроение, 2000. — 344 с.
10. Вибродиагностика / под ред. Г. Ш. Розенберга. — СПб : ПЭИПК, 2003. — 284 с.
11. **Панов А. Н., Чистяков Д. В., Коробейников С. М., Гузей К. Е.** Вибромониторинг привода скиповой лебедки доменной печи с помощью стационарных систем // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 1 (26). С. 34 — 37.
12. **Белобров В. М.** Идентификация причин вибрации роторных машин при переменной скорости вращения // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 2 (32). С. 69 — 75.
13. **ISO 10816-1-97.** Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. Введ. 01.07.99. — Минск : ИПК изд-во стандартов, 1998. — 18 с.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Журнал «Сталь» публикует статьи о новых технологиях и оборудовании, а также о совершенствовании уже применяемых в черной металлургии, о передовом опыте улучшения качества и повышения конкурентоспособности продукции, путях достижения рентабельности производства, уменьшении вредного воздействия на окружающую среду и о других важных для отрасли вопросах.

В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи объемом не более 12 страниц должен быть дополнен **кратким рефератом** (3 — 5 предложений) и **ключевыми словами на русском и английском языках**, указанием УДК, а также списком подписей к рисункам. Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1—2003; на труднодоступные источники просьба не ссылаться. Рисунки (рекомендуемая норма — до 5) должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями, без масштабной сетки (за исключением номограмм).

К статье должен быть приложен список авторов с указанием ФИО полностью, места работы каждого, телефона и электронного адреса.

Число авторов от 1 — 2 организаций не должно превышать 5 человек. Если статья представлена от большего числа организаций, то допускается в среднем по два человека от каждой организации.

Все материалы статьи редакция просит представлять в электронном виде (текст — в программе Word (Times New Roman, размер шрифта 12, междустрочный интервал 1,5)), рисунки — отдельным файлом в форматах TIFF или JPEG, диаграммы — в формате EXCEL).