

**Ключевые слова:**

станок, дефекты, вибродиагностика, подшипник, шариковая пара, шестерни, износ, колебания, точность, погрешность, сборка, вибрация, состояние, ремонт, планово-предупредительный ремонт

Keywords:

tool, defects, vibration diagnostics, bearing, ball screw pair, gear, wear, vibrations, precision, accuracy, assembly, vibration, state, repair, routine maintenance

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СТАНКОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РОСКОСМОСА

Юрий САВИНОВ

В статье рассмотрены вопросы перспективного технического обслуживания станков на основе методов безразборной вибрационной диагностики. Показано, что реальный объем ремонтных работ составил не более 20% от устанавливаемых по системе планово-предупредительного ремонта.

The article deals with issues of perspective maintenance of tools based on CIP vibration diagnostics methods. It is shown that the actual volume of repair work does not exceed 20% of the installed by the routine maintenance system.

Обеспечение работоспособности и точности действующего оборудования требует значительных средств и квалифицированного персонала. Поэтому использование современных методов обслуживания и ремонта станков позволяет получить существенный экономический эффект, обеспечить необходимую точность и производительность. На *рис. 1* приведена сравнительная схема экономической эффективности при обслуживании оборудования по трем схемам (по данным фирмы SKF): работа до выхода из строя, по системе планово-предупредительного ремонта (ППР), по фактическому состоянию. Как следует из представленного материала, наиболее экономически выгодна схема обслуживания по фактическому состоянию, что позволяет получить на 30–40% больший экономический эффект, чем при работе по системе ППР. По этой причине, в развитых странах работа по системе ППР фактически запрещена, поскольку сопряжена с избыточными материальными и трудовыми затратами.

Вместе с тем, следует отметить, что при внедрении на предприятиях новых технологий ремонта станков нередко случаи, когда обслуживающий персонал всячески противится новациям. В то же

время при использовании традиционных подходов середины прошлого века [1] объем ремонтных работ весьма значителен, и для его выполнения требуется большое количество слесарей-ремонтников и специалистов по электронике. В соответствии с системой ППР станков, которая была разработана в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) в 50-х годах прошлого столетия, для определения состояния и дефектации деталей станков при капитальном ремонте требуется полная разборка станков на узлы с последующей разборкой узлов на детали для идентификации их состояния. На основе материалов ЭНИМС [1] различные отрасли машиностроения разработали свои отраслевые нормы, в которых в основе дефектации лежит все та же разборка. Так, например, для определения состояния подшипников следует их демонтировать, что в подавляющем большинстве случаев осуществляется ударным методом и приводит к появлению задиров как в самом подшипнике, так и в сопрягаемых деталях. Поэтому нередко случаи, когда при разборке работоспособного узла часть подшипников оказывается разрушена, причем разрушение происходит именно при демонтаже.

В настоящее время на передовых предприятиях — особенно в системе Роскосмоса — уже применяются как методы обслуживания станков по фактическому состоянию, так и методы идентификации деталей без их разборки на основе вибродиагностических испытаний. Это позволяет одновременно снизить стоимость ремонтных работ и повысить их качество, так как проверяется не только состояние деталей станка, но и качество сборки, наличие перекосов подшипников или шестерен, излишнее биение шпинделей, валов и т.д.

Для принятия решений по необходимости и объемам ремонтных работ применяются компьютеризированные методики и аппаратура для безразборной диагностики станков, позволяющие получить достаточное количество информации. На рис. 2 приведено сопоставление аппаратных средств диагностики токарного станка различного типа и количества определяемых ими параметров. Наиболее информативным является метод вибродиагностики, позволяющий осуществить фактически тотальный контроль параметров всех вращающихся элементов станка. Следует отметить, что все вышеприведенные методы отражены в нормативной документации, в том числе в ГОСТ 27843-88, ГОСТ 30544-97, ГОСТ Р ИСО 13373-2009.

Чтобы определить параметры реальных объектов, нужно составить модель, которая описывала бы поведение деталей и узлов оборудования при его работе с целью установления взаимосвязи между реальным состоянием механических элементов и характеризующими их показателями [2]. Для проведения идентификации элементов оборудования в первую очередь требуется составление математической модели с определенными параметрами, оказывающими существенное влияние на работоспособность машины [3]. Расчетная схема должна в полной мере отражать свойства диагностируемого объекта. Следует разделить существенные и несущественные факторы, выбрать приоритеты в измеряемых показателях, определить поведение оборудования в рабочем диапазоне частот, при которых наблюдаются резонансы, величины амплитуд колебаний. По существу, задача идентификации объекта является обратной задачей конструирования самого объекта, поэтому необходима полная информация о комплектующих: установленных подшипниках, зубчатых и ременных передачах, шарико-винтовых передачах. Также необходимо знать частоты вращения электро- и гидродвигателей. Практически вся эта информация содержится в руководстве по эксплуатации станка, хотя возможно и выполнение диагностики оборудования по неполным исходным данным. Так, по вибрационным характеристикам асинхронного электродвигателя определяется чис-



Рис. 1. Экономическая эффективность при обслуживании оборудования по данным фирмы SKF

ло пар полюсов ротора, вследствие того, что в спектре вибрации имеется значительная амплитуда колебаний, определяемая частотой вращения ротора. Для дефектных подшипников аналогичным образом, учитывая частоты обкатки тел качения по наружному или внутреннему кольцу, собственную частоту сепаратора и т.д., можно определить геометрические параметры установленных подшипников, а также диаметр и число их тел качения, что используется в дальнейшем для идентификации технического состояния деталей станков.

Наиболее информативным инструментом для идентификации параметров оборудования является получение его вибрационных характеристик, которые непосредственно связаны с параметрами оборудования и напрямую определяют различные показатели его точности. Известно, что амплитуды вибраций станков, наблюдаемые при его функционировании, непосредственно отражаются на точности обрабатываемой детали [4, 5]. При работе станков возникает широкий спектр колебаний, природа которых имеет как стационарный, так и нестационарный характер. В станках могут действовать вынужденные колебания и автоколебания. В свою очередь, автоколебания различаются при резании и при работе на холостых ходах, то есть при установочных перемещениях и при функционировании без резания. Поскольку динамические составляющие сил резания в большинстве случаев имеют нелинейный характер, определяемый именно процессом резания, для идентификации элементов станка более всего подходит режим его функциони-

Лазерная система Renishaw LazerXL



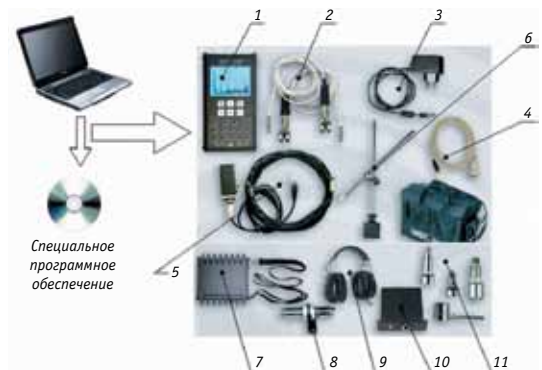
Контролируемые параметры системы Renishaw LazerXL	Количество параметров
Точность позиционирования	2
Непрямолинейность	2
Отклонение от плоскостности	2
Отклонение от перпендикулярности	2
Динамические ошибки	2
Суммарное количество параметров	10

Система Renishaw Ballbar20



Контролируемые параметры системы Renishaw Ballbar20	Количество параметров
Люфты по осям	2
Выбросы обратного хода по осям	2
Циклическая ошибка	1
Рассогласование приводов	1
Отклонение от прямолинейности, перпендикулярности	3
Суммарное количество параметров	16

Система вибродиагностики



Контролируемые параметры системы Renishaw Ballbar20	Количество параметров
Дефекты подшипников	10 × 40 = 400
Дефекты шестерен	4 × 6 = 24
Дефекты ШВП	10 × 2 = 20
Дефекты электродвигателей	8 × 3 = 24
Суммарное количество параметров	468

Рис. 2. Методы и аппаратура для диагностики станков

рования на холостом ходу, при котором вибрационные характеристики станка в целом определяются работой деталей и узлов: подшипниками, шестеренными и ременными передачами, шарико-винтовыми парами, приводными механизмами. При работе на холостом ходу станка, из-за наблюдающихся в ряде случаев незначительных вибраций, требуется высокочувствительная аппаратура, позволяющая фиксировать необходимые частотные характеристики и суммировать их для расчета средних значений, которые наиболее полно удовлетворяют требованиям соответствия состоянию реальных объектов.

Колебания валов в узлах станков являются основными источниками вибраций, возникающих при работе машин, причем их частотные составляющие и величины амплитуд вибраций определяются как дефектами отдельных элементов, установленных на валах, так и погрешностями сборки и эксплуатации. Особенностью вибраций вращающихся узлов является то, что наибольшие амплитуды наблюдаются в радиальном направлении, причем вибрационный сигнал способен хорошо передаваться по корпусным деталям. Поэтому при установке датчика на корпусе узла можно получить информацию о вибрационном состоянии

каждого подшипника и шестерни, всех деталей шарико-винтовых пар и ременных передач. При этом следует учитывать, что вибрационный сигнал сильно затухает при передаче его через сопряжение между деталями, особенно корпусными. Также наблюдается значительное затухание вибрационного сигнала на кожухах, поскольку они имеют очень низкие собственные частоты колебаний, передача средне- и высокочастотных сигналов затруднена, поэтому установка акселерометров на кожухах не производится. В любом случае, выбирая место для установки на корпусе диагностируемого узла, следует избегать установки акселерометра на тонкостенные детали.

При работе оборудования в подшипниках генерируются вибрации в широком частотном диапазоне. Причинами этого являются конструктивные особенности подшипников, состоящих из нескольких элементов, совершающих сложное кинематическое движение с различными угловыми скоростями, что приводит к возникновению вибраций как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне. Возникновению вибраций способствуют неточности деталей подшипников, появляющиеся при их изготовлении. К ним относятся разностенность наружного и внутреннего кольца, некруглость и шероховатость тел качения и дорожек качения колец, погрешности, вызванные дефектами сборки узлов, в том числе перекосом наружных и внутренних колец, дисбалансом вращающихся валов.

Другие погрешности возникают при эксплуатации: износ беговых дорожек колец, образование на них задиrow, износ тел качения и сепаратора, некруглость тел вращения, образование трещин в сепараторах.

Вибрация, создаваемая подшипником качения, характеризуется следующими основными частотами, связанными с элементами подшипников [3].

Частота вращения сепаратора относительно наружного кольца:

$$f_c = 1/2 f_{\text{вп}} \{1 - d_{\text{тк}}/d_c \cos(a)\},$$

где $f_{\text{вп}}$ — частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного; $d_{\text{тк}}$ — диаметр тела качения; $d_c = 1/2 (d_n + d_b)$ — диаметр сепаратора; d_n — диаметр наружного кольца; d_b — диаметр внутреннего кольца; a — угол контакта тел и дорожек качения.

Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу:

$$f_n = 1/2 f_{\text{вп}} \{1 - d_{\text{тк}}/d_c \cos(a)\} z = f_c z,$$

где z — число тел качения.

Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу:

$$f_b = 1/2 f_{\text{вп}} \{1 + d_{\text{тк}}/d_c \cos(a)\} z = (f_{\text{вп}} - f_c) z.$$

Частота вращения тел качения относительно поверхности колец:

$$f_{\text{тк}} = 1/2 f_{\text{вп}} d_c/d_{\text{тк}} \{1 - d_{\text{тк}}^2/d_c^2 \cos^2(a)\},$$

где $f_{\text{вп}}$ — частота вращения вала, f_b — частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу, f_n — частота перекатывания тел качения по наружному кольцу, $f_{\text{тк}}$ — частота вращения тел качения, f_c — частота вращения сепаратора, ВЧ — высокочастотная область спектра вибрации, $k_1 = 1, 2, 3, 4, \dots$, $k_2 = 1, 2, 3, 4, \dots$, $k_3 = 1, 2, 3, 4, \dots$

Особенное положение в работе шпиндельных узлов занимают подшипники скольжения, при работе которых могут возникать автоколебания. Как показывает практический опыт, для шпиндельных узлов на подшипниках скольжения автоколебания возникают на частоте, равной половине частоты вращения вала.

Значительные амплитуды вибраций наблюдаются на частотах, связанных с неуравновешенностью валов. Причинами могут быть как погрешности, связанные с изготовлением и сборкой валов, так и дефекты, возникшие при эксплуатации. Вышеприведенные дефекты проявляются на частоте вращения вала, а также на частотах, кратных этой частоте. При соединении валов муфтами, имеющими дефекты изготовления, дефекты будут проявлять себя возникновением колебаний на частоте вращения вала, а при соединении муфтами, не имеющими дефектов изготовления, но установленными с перекосами, возникнут колебания с удвоенной частотой относительно частоты вращения вала.

Колебания в зубчатых передачах часто являются причиной возникновения вибраций в узлах металлообрабатывающего оборудования, приводящих к увеличению деформаций как в самих шестернях, так и в валах, на которых они установлены. Причинами возмущения вибраций в зубчатых передачах являются силы, обусловленные входением в зацепление шестерен с отклонением от расчетной точки, связанным как с погрешностями изготовления самих шестерен, так и с упругими деформациями системы «вал — шестерня» [6].

Подробно возможности методики рассмотрены в [4, 5].

Время для проведения диагностики одного станка в цеху составляет 2–3 ч. Предварительно перед испытаниями создается управляющая программа, в которую вводятся параметры подшипников, шестерен, шарико-винтовых пар, устанавливается частотный диапазон для измерения вибрационных характеристик и показатели, характеризующие динамику работы узлов и дета-

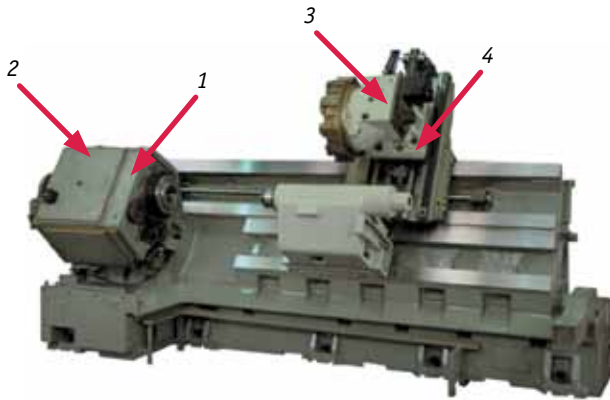


Рис. 3. Схема установки датчиков при выполнении вибродиагностики токарного станка

лей станка, выбираются опорные точки для установки акселерометра, показанные на рис. 3. При выполнении работы используется всего один акселерометр, поочередно устанавливаемый в выбранные точки. Затем выполняются измерения и в те-

ние одного часа проводится расшифровка данных. Весь процесс диагностики с выдачей экспертного заключения занимает до четырех часов.

Рассмотрим конкретный пример диагностики четырех станков модели Masturn 550 на одном из предприятий Уральского региона. Процесс прошел в течение семи часов. По результатам вибродиагностических испытаний (без разборки станка) было оценено техническое состояние деталей каждого подшипника, шестерни или ременной передачи, шарико-винтовых пар, электромагнитной системы электродвигателя и т.д. На графике экспериментальные данные, то есть измеренный спектр вибраций, приведены в виде линий синего цвета, а расчетные данные, характеризующие отдельные дефекты деталей, показаны в виде линий красного цвета. При сопоставлении экспериментальных данных, характеризующих частоты, на которых наблюдаются дефекты, с расчетными данными, определенными для бездефектных деталей, идентифицируются виды дефектов. Величина дефектов определяется отношением значений амплитуд сигналов на частотах, характеризующих дефекты, к среднеквадратичному значению экспериментально полученного сигнала. Так, из представленных результатов из рис. 4 следует, что в ременной передаче имеются следующие дефекты: биение шкива диаметром 306 мм с дефектами на частотах $f_{вр} = 16,6$ Гц, $2f_{вр} = 33,3$ Гц.

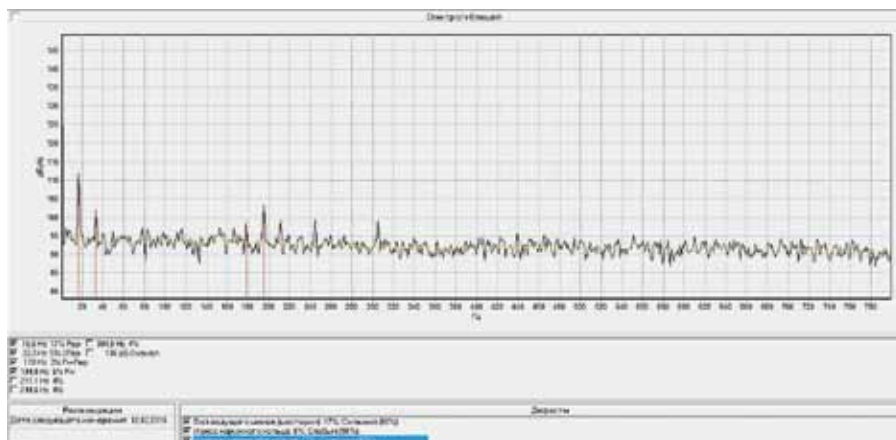


Рис. 4. График спектра вибрационного сигнала, характеризующего ременный привод станка

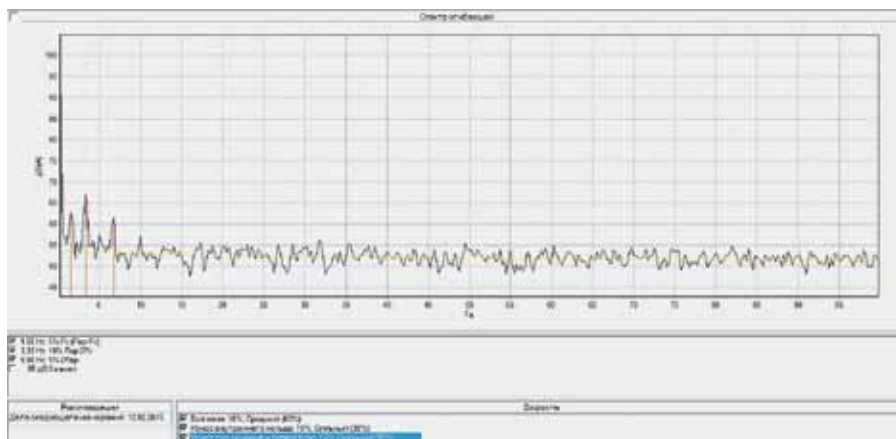


Рис. 5. Спектр огибающей вибрационного сигнала, определенный для подшипника SKF 3062, установленного в опоре привода подачи по оси Z

На рис. 5 представлен спектр огибающей вибрационного сигнала, определенный для подшипника SKF 3062, установленного в опоре привода подачи по оси Z.

Из полученных данных следует, что подшипник SKF 3062 имеет следующие дефекты:

1. Износ сепаратора, характеризующийся дефектами на следующих частотах: $f_c(f_{вр} - f_c) = 1,55$ Гц, $2f_c \times f_{вр} = 3,33$ Гц;

2. Износ беговой дорожки внутреннего кольца, характеризующийся дефектами на следующих частотах: $2f_{вр} = 6,68$ Гц, $2f_c \times f_{вр} = 3,33$ Гц.

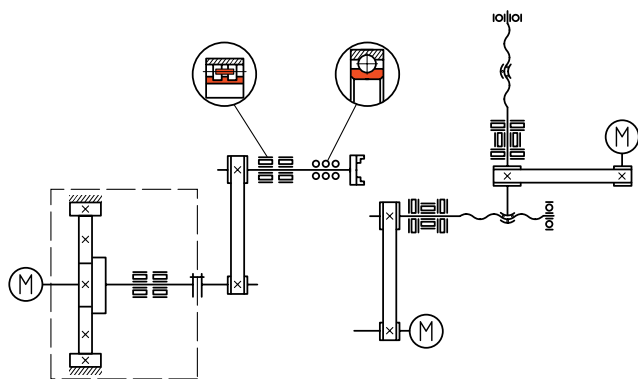


Рис. 6. Схема состояния деталей обрабатывающего центра модели Masturn 550 № 1

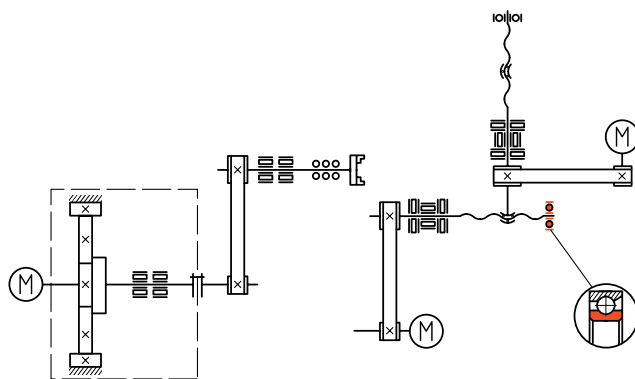


Рис. 7. Схема состояния деталей обрабатывающего центра модели Masturn 550 № 2

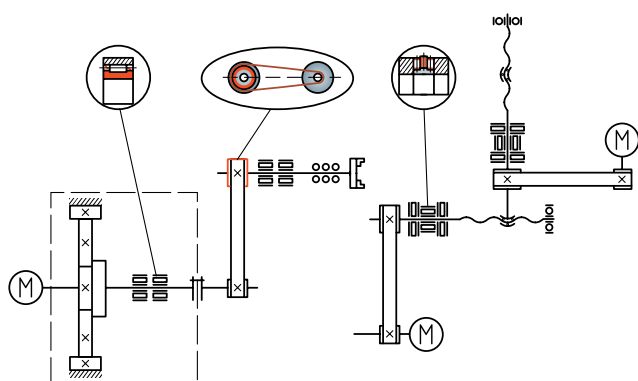


Рис. 8. Схема состояния деталей обрабатывающего центра модели Masturn 550 № 3

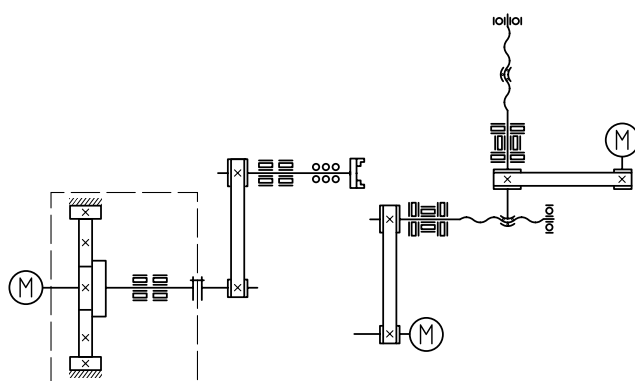


Рис. 9. Схема состояния деталей обрабатывающего центра модели Masturn 550 № 4

На рис. 6–9 представлено фактическое состояние четырех станков модели Masturn 550.

По результатам проведенных испытаний можно составить таблицу дефектов каждой детали, либо представить эту информацию в графическом виде согласно схеме состояния деталей станка, приведенной для токарных станков модели Masturn 550 (рис. 2). В качестве критерия на основе статистических данных, принята допустимая величина износа 10%. Детали, имеющие износ более 10%, подлежат замене, а имеющие меньший износ — допустимы к работе.

Как видно из схемы состояния деталей токарных станков модели Masturn 550, имеется следующий износ:

- в станке модели Masturn 550 № 1 требуется заменить шпиндельные подшипники SKF7024 и SKFNN3022;
- в станке модели Masturn 550 № 2 требуется заменить подшипник привода «Z» SKF6006;
- в станке модели Masturn 550 № 3 требуется заменить подшипник привода «Z» SKF3062 и подшипник коробки скоростей SKFNUP210, а также устранить биение шкива с диаметром 306 мм;

→ в станке модели Masturn 550 № 4 замен не требуется.

Вышеприведенные данные о фактическом износе четырех станков за период работы с 2005 года подтверждают, что приобретение станков высокого качества и их правильное обслуживание приводят к значительному снижению издержек при эксплуатации оборудования.

Хочется отметить, что при безразборной вибродиагностике устанавливается не только то, какие детали износились, но идентифицируются составляющие этого износа. Так, в случае подшипников шпиндельного узла, произошел износ внутренних колец и сепараторов. Это важно, так как позволяет определить не только дефекты деталей, но и качество сборки узлов, в том числе перекосы колец подшипников, дисбаланс и т.п. Полный перечень определяемых дефектов механических узлов приведен в таблице.

Также на основе вибродиагностических испытаний без разборки станка идентифицируются имеющиеся дефекты в электромагнитных системах и гидроприводе. Для асинхронных электродвигателей при безразборной вибродиагностике определяются следующие показатели: неуравнове-

шенность ротора, биение ротора, ослабление крепления опор, статический эксцентриситет зазора, динамический эксцентриситет зазора, дефекты обмоток ротора, дефекты обмоток статора, искажения формы напряжения, несимметрия напряжения питания.

Из проведенных испытаний следует, что для токарных станков модели Masturn 550, согласно графику выполнения ППР [1] достигших момента проведения капитального ремонта, то есть полной разборки, в реальности необходимо выполнить лишь ограниченный объем работ по устранению выявленных недостатков.

Таким образом, вместо полной разборки станка требуется лишь частичный разбор тех узлов, где имеются дефектные детали, и устранение конкретных неисправностей, соответственно, реально необходимый объем работы составляет не более 20% от трудозатрат по методу ППР. Также сокращается время ремонта, поскольку исправные узлы не требуют разборки, также можно заранее заказать требующиеся для замены комплектующие. Можно сделать однозначный вывод: переход на систему обслуживания оборудования по техническому состоянию позволяет получить существенный экономический эффект.

Для выполнения качественной и достоверной диагностики технического состояния деталей и узлов станков реализуется удаленная диагностика, схема которой приведена на рис. 10.

При использовании имеющейся в лаборатории диагностики базы данных по элементам станков, включающей десятки тысяч подшипников как отечественного, так и зарубежного производства, в том числе известных фирм SKF, FAG, INA, ZKL, NSK, TIMKEN и т.д., а также сотни шарико-винтовых пар, несколько десятков моделей станков отечественного и зарубежного производства, диагностика которых уже отработана в условиях заводских испытаний, значительно сокращается время испытаний и упрощается работа заводских служб. Так, например, разработанная и проверенная управляющая программа для диагностики обрабатывающего центра модели MCFV 1680 на одном из заводов, при наличии аналогичного станка на другом предприятии пересылается по сети Интернет. На предприятии проводятся только измерения, которые отсылаются в лабораторию диагностики, где остается провести анализ полученных данных и направить на предприятие полный отчет о состоянии деталей и узлов станка. Весь процесс выполняется в течение одного рабочего дня.

Преимущества вышеприведенной схемы в том, что на предприятии не надо содержать в штате квалифицированных инженеров-диагностов, нет необходимости в установке программного обеспечения,

Таблица. Диагностические параметры, определяемые с помощью вибродиагностических методов

№	Определяемые параметры	Результаты измерения
1	Износ наружного кольца подшипника	
2	Износ внутреннего кольца подшипника	
3	Износ шариков или роликов подшипника	
4	Износ сепаратора	
5	Перекос наружного кольца подшипника	
6	Биение валов, шпинделей	
7	Неравномерный радиальный натяг в подшипнике	
8	Раковины, трещины на наружном кольце подшипника	
9	Раковины, трещины на внутреннем кольце подшипника	
10	Раковины, сколы на телах качения подшипника	
11	Дефект ведущей шестерни	
12	Дефект ведомой шестерни	
13	Дефект зацепления ведущей шестерни	
14	Дефект зацепления ведомой шестерни	
15	Биение винта шарико-винтовой передачи	
16	Перекос винта шарико-винтовой передачи	
17	Износ шариков шарико-винтовой передачи	
18	Раковины, сколы на телах качения шарико-винтовой передачи	
19	Износ винта шарико-винтовой передачи	
20	Раковины, трещины винта шарико-винтовой передачи	
21	Износ гаек шарико-винтовой передачи	
22	Раковины, трещины гаек шарико-винтовой передачи	
23	Дисбаланс валов, шпинделей, шкивов	

достаточно иметь только измерительный прибор и специалистов, выполняющих измерения. Кроме того, разработанные и уже опробованные программы диагностики станков на нескольких предприятиях дают, несомненно, более высокую точность и достоверность результатов. Некоторые крупные предприятия предпочитают с течением времени обучить своих инженеров-диагностов и создавать управляющие программы для диагностики станков. Недостатком является то, что большая часть задействованного инженерно-технического персонала, прекрасно разбираясь в кинематике станков, вопросы динамики станков знает недостаточно. Поэтому в процессе обучения в вузах по станочным специальностям необходимо больше времени уделять освоению таких разделов, как «Динамика станков» и «Вибродиагностика работающего оборудования». Для получения современных знаний по диагностике станков в настоящее время проводятся занятия в ОАО «ИПК МАШПРИБОР»

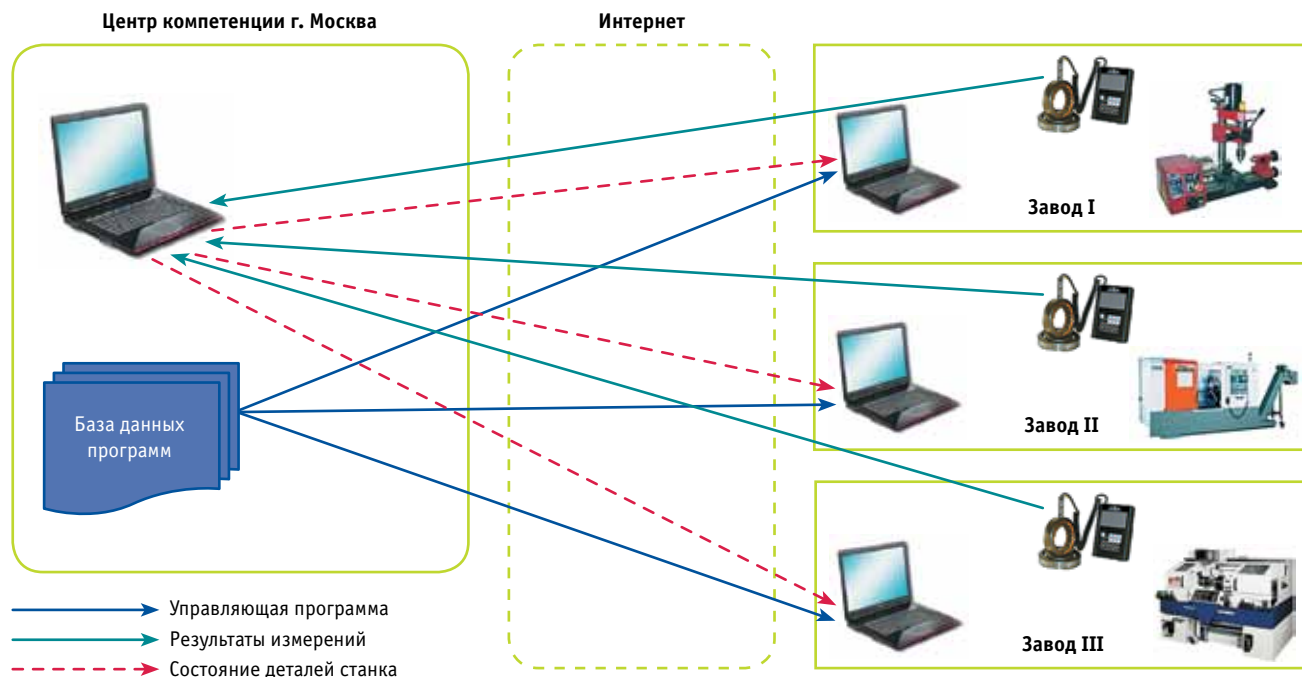


Рис. 10. Схема удаленной диагностики технического состояния станков

(Институт повышения квалификации работников машиностроения и приборостроения Федерального космического агентства).

Специалисты ФГУП «НПО «Техномаш» провели работы по диагностике на основе безразборных методов для предприятий ракетно-космической, авиационной, атомной промышленности, транспортного машиностроения и т.д., оказав предприятиям реальную помощь по защите от поставок некачественного оборудования, в том числе с положительным решением в арбитражном суде.

ВЫВОДЫ

При внедрении современных методов обслуживания станочного парка получается существенный экономический эффект, важнейшими составляющими которого являются:

- исключение необходимости разборки работоспособных узлов и деталей;
- устранение дефектов на начальном этапе их возникновения;
- предупреждение аварийных выходов из строя оборудования;
- оптимизация реальных сроков проведения ремонтных работ;
- планирование объемов работ по выявленным дефектам;
- сокращение заказов запасных частей и снижение объемов механической обработки;
- заказ необходимых комплектующих до начала проведения ремонтных работ;

- уменьшение времени для проведения работ;
- повышение качества обслуживания оборудования;
- снижение стоимости обслуживания оборудования на 40–50%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клягин В.И., Сабиров Ф.С. Типовая система технического обслуживания и ремонта металлорежущего и деревообрабатывающего оборудования. — М.: Машиностроение, 1988. 672 с.
2. Савинов Ю.И. Определение параметров механических систем станков // Станки и инструмент. 2010. № 10. С. 8–10.
3. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — Издательский центр СПбГМТУ, 2000. 159 с.
4. Савинов Ю.И. Обслуживание станков по фактическому состоянию // РИТМ. 2011. № 4. С. 130–133. www.mirprom.ru/Pubs.aspx?id=12183.
5. Савинов Ю.И., Шаронов С.В. Патент на изобретение № 2399033. Способ определения люфтов в приводе станка, зарегистрирован 10.09.2010 г.
6. Диметберг Ф.М. и др. Вибрации в технике: справочник. — М.: Машиностроение, 1980. Т. 3. 544 с.

Юрий Иванович САВИНОВ —
кандидат технических наук,
начальник отделения ФГУП НПО «Техномаш»