

УДК 621.9.08

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ С ЧПУ

© 2015 А.А. Ваганов, В.И. Писарев

АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара

Поступила в редакцию 24.03.2015

Представлены методика, структура и практика построения системы автоматизированного мониторинга технического состояния привода главного движения станков с ЧПУ виброакустическим методом на промышленном предприятии.

Ключевые слова: *станок с ЧПУ, привод, автоматизированный мониторинг, техническое состояние, диагностическая модель*

Привод главного движения (ПГД) металлообрабатывающего станка является одной из важнейшей его подсистемой, от надежного функционирования которой во многом зависит точность формообразования, производительность и качество обрабатываемых на станке деталей. Поэтому обеспечение параметрической и функциональной надежности ПГД, как весомой части в надежности всего станка, является актуальной задачей в свете увеличивающихся скоростей резания и, как следствия, увеличения скоростей вращения шпинделя станка, несущего режущий инструмент или заготовку. Техническая диагностика является средством повышения надежности, оценки качества изготовления и технического состояния как станка в целом, так и ПГД в частности [4].

Виброакустическая диагностика как один из методов технической диагностики получила широкое распространение для оценки технического состояния роторного оборудования предприятий различных отраслей промышленности. Однако для оценки технического состояния металлообрабатывающего оборудования метод виброакустической диагностики в нашей стране распространен не так широко как за рубежом, хотя обладает большим набором возможностей как для диагностики непосредственно узлов вращения станка, так и для мониторинга процесса обработки. Кроме этого, использование виброакустического метода позволяет автоматизировать сам процесс диагностики по косвенным

диагностическим признакам путем мониторинга во времени измеряемых диагностических параметров и сравнения их с допустимыми значениями. Предпосылкой к автоматизации процесса диагностики технического состояния станочного оборудования служит тот фактор, что при проведении плановой периодической диагностики переносными диагностическими приборами появляется риск внезапного отказа в период между плановыми проверками по причине внешних факторов (например, столкновение вследствие ошибки оператора). При наличии аппаратных возможностей метод виброакустической диагностики можно дополнять измерением в реальном времени температуры наружных колец подшипников опор шпиндельного узла и температуры обмотки статора электродвигателя главного движения.

В общем случае назначением системы автоматизированного мониторинга (САМ) технического состояния ПГД металлообрабатывающих станков с ЧПУ является измерение диагностических параметров, характеризующих техническое состояние, сравнение этих параметров с допустимыми уровнями и оповещение о нарушениях технического состояния при превышении измеренных диагностических параметров допустимых значений. Поэтому диагностическая модель для диагностики технического состояния ПГД (рис. 1) включает в себя следующие основные элементы:

- объекты диагностики (T_n), техническое состояние которых необходимо контролировать;
- диагностические признаки ($D_{n1}, D_{n2}, D_{n3}, \dots, D_{nk}$), характеризующие техническое состояние для каждого объекта диагностики;

Ваганов Антон Александрович, начальник бюро диагностики и мониторинга станков. E-mail: vaganovanton@mail.ru
Писарев Владимир Иванович, кандидат технических наук, начальник технического центра по обслуживанию и ремонту оборудования с ЧПУ. E-mail: d617@samspace.ru

- диагностические параметры (X_n), представляющие собой совокупность диагностических признаков для каждого объекта диагностики, измерение значений которых, по сути, является результатом диагностики;
- допустимые уровни (P_{1n} и P_{2n}) с которыми сравниваются измеренные значения диагностических параметров и превышение которых характеризует нарушение технического состояния объекта диагностики.

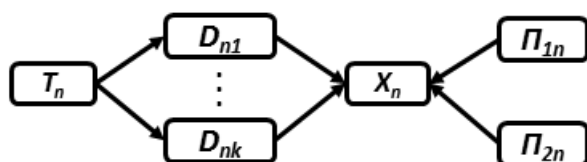


Рис. 1. Общая структура диагностической модели

К объектам диагностики относятся все механические узлы и детали вращения ПГД, такие как: подшипники, шпиндель, валы коробки скоростей, зубчатые передачи, ременные передачи, муфты, электродвигатель главного движения (рис. 2).

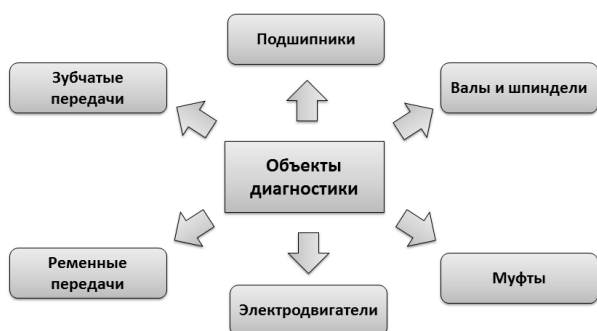


Рис. 2. Объекты диагностики привода главного движения

Метод виброакустической диагностики позволяет производить выявление дефектов по множеству диагностических признаков. Например, количество диагностических признаков для выявления дефектов подшипников качения может достигать 26, а для выявления дефектов зубчатых передач – 22. Однако использование такого большого количества диагностических признаков в стационарных системах вибродиагностики нецелесообразно по двум причинам. Во-первых, ремонт или замену узла в механизме необходимо производить даже при появлении одного из множества дефектов диагностируемых в этом узле. Во-вторых, постоянный мониторинг с небольшой разницей во времени между измерениями даже ограниченного числа диагностических параметров дает адекватную оценку

фактического технического состояния объекта диагностики при корректно определенных допустимых уровнях.

Количество измеряемых диагностических параметров, при построении САМ технического состояния ПГД металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе стационарных систем вибродиагностики целесообразно выбирать по количеству объектов диагностики (рис. 3). При невозможности выбора одного диагностического признака для объекта диагностики, однозначно определяющего его техническое состояние (например, для подшипников качения), измеряемый диагностический параметр должен представлять собой суммарную величину – сумму, среднее значение или среднее квадратичное значение. В общем случае, при построении системы мониторинга на базе метода виброакустической диагностики, диагностические признаки представляют собой определенные частоты в спектре вибросигнала, а диагностические параметры представляют собой численное значение, полученное путем математических операций со значениями амплитуд в спектре вибросигнала.

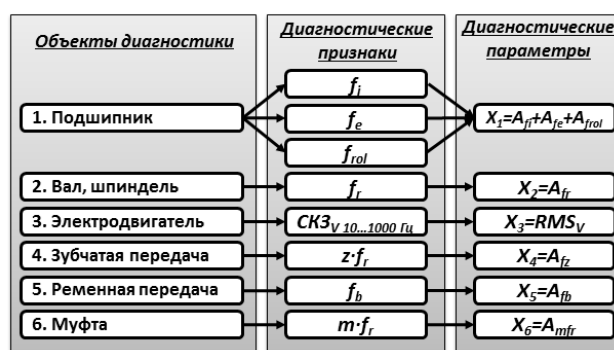


Рис. 3. Диагностическая модель привода главного движения

При построении САМ на базе метода виброакустической диагностики необходимо организовать вычисление как прямого спектра вибросигнала, так и спектра огибающей вибросигнала. Дальнейшая математическая обработка строится на работе с амплитудами спектров вибросигнала. Диагностический параметр для выявления дефектов подшипников качения (X_1) целесообразно представлять как сумму величины амплитуд на основных дефектных частотах в спектре огибающей вибросигнала (рис. 4а). В качестве основных дефектных частот подшипников качения выбраны частота перекачивания по внутреннему кольцу f_i , частота перекачивания по наружному кольцу f_e и частота вращения тел качения f_{rol} , определяемые соответственно по следующим общеизвестным формулам:

$$f_i = 0,5 f_r z \left(1 + \frac{D_w}{D_{cp}} \cos \alpha \right);$$

$$f_e = 0,5 f_r z \left(1 - \frac{D_w}{D_{cp}} \cos \alpha \right);$$

$$f_{rol} = \frac{D_{cp}}{2D_w} f_r \left[1 - \left(\frac{D_w}{D_{cp}} \right)^2 (\cos \alpha)^2 \right],$$

где f_r – частота вращения внутреннего кольца подшипника, Гц, z – количество тел качения подшипника в ряду, D_w – диаметр тел качения подшипника, мм, D_{cp} – средний диаметр подшипника, мм, α – угол контакта.

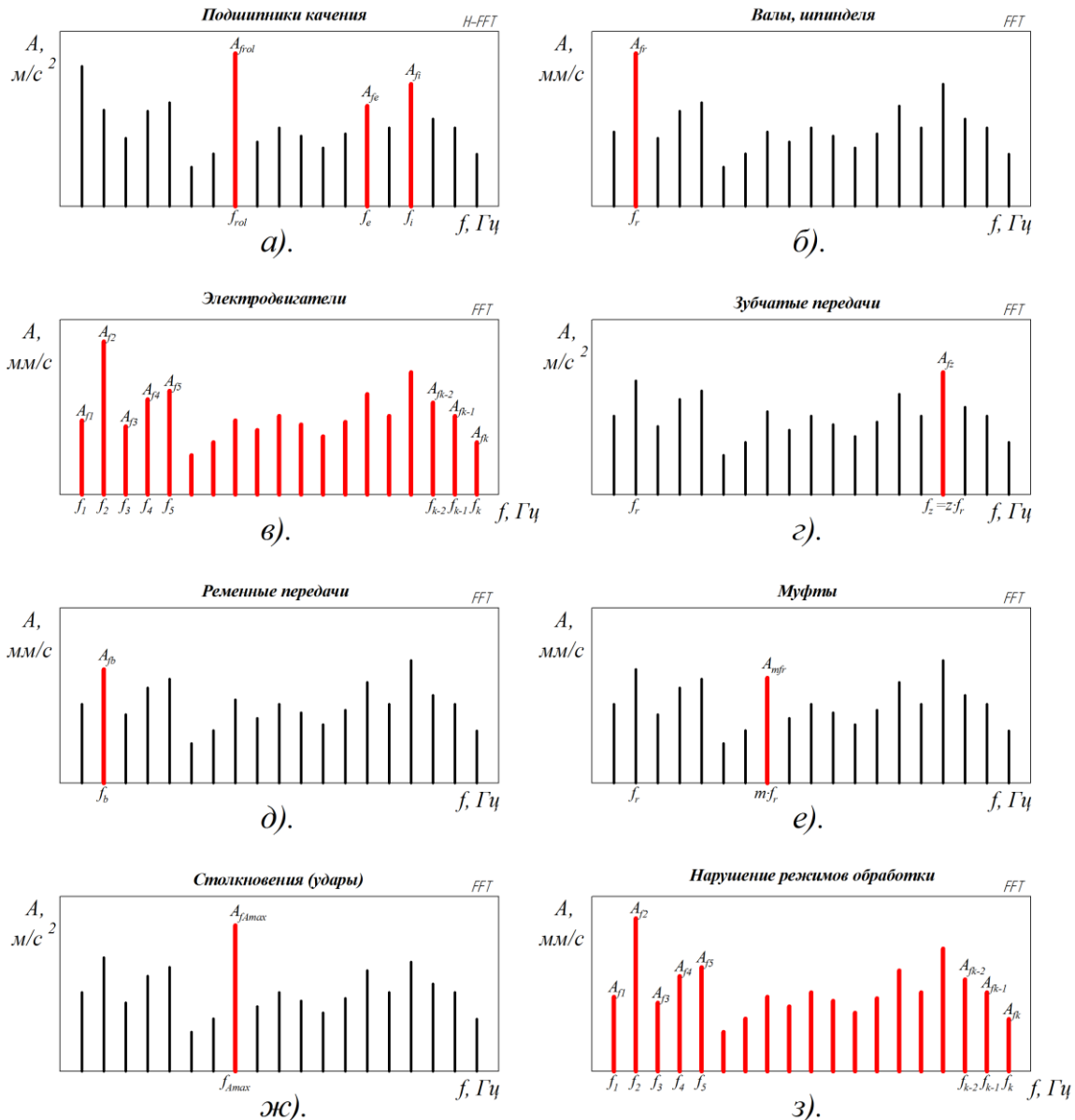


Рис. 4. Диагностические признаки дефектов в спектре вибросигнала

Диагностический параметр для выявления дефектов валов и шпинделей (X_2) целесообразно представлять как величину амплитуды на оборотной частоте вала или шпинделя f_r в прямом спектре виброскорости, характеризующую дисбаланс вала (рис. 4б). Диагностический параметр для диагностики электродвигателя главного движения (X_3) целесообразно представлять как среднее квадратическое значение амплитуд виброскорости в спектре в стандартном диапазоне

частот 10-1000 Гц (рис. 4в). Диагностический параметр для выявления дефектов зубчатых передач (X_4) целесообразно представлять как величину амплитуды на зубцовой частоте f_z в прямом спектре виброускорения, равной произведению оборотной частоты вала на число зубьев зубчатого колеса ($f_z = z \cdot f_r$), вращающегося вала (рис. 4г). Диагностический параметр для выявления дефектов ременных передач (X_5) целесообразно представлять как величину амплитуды на

ременной частоте f_b в прямом спектре виброскорости (рис. 4д). Ременная частота для клиновых и поликлиновых передач определяется по формуле:

$$f_b = \frac{\pi \cdot D \cdot f_r}{L},$$

где D – диаметр шкива, мм, f_r – оборотная частота вала, на котором вращается шкив, Гц, L – длина ремня, мм. Ременная частота для плоскозубчатых ременных передач определяется по формуле:

$$f_b = \frac{z \cdot f_r}{z_b},$$

где z – число зубьев шкива, z_b – число зубьев ремня, f_r – оборотная частота вала, на котором вращается шкив, Гц.

Диагностический параметр для выявления дефектов муфт (X_6) целесообразно представлять как величину амплитуды на частоте ($m \cdot f_r$) в

прямом спектре виброскорости, равной произведению оборотной частоты вала на число кулачков, пальцев или зубьев соответственно кулачковой, пальцевой или зубчатой муфты, вращающейся на валу (рис. 4е).

Кроме диагностики технического состояния непосредственно узлов и деталей вращения ПГД, система мониторинга на базе метода виброакустической диагностики позволяет выявлять столкновения подвижных узлов станка, а также нарушения режимов обработки заготовки в процессе резания. Диагностический параметр для выявления столкновений подвижных узлов станка целесообразно представлять как величину амплитуды в прямом спектре виброускорения, имеющую наибольшее значение (рис. 4ж). Диагностический параметр для диагностики нарушений режимов обработки заготовки в процессе резания целесообразно представлять как среднее квадратическое значение амплитуд виброскорости в спектре в стандартном диапазоне частот 10-1000 Гц (рис. 4з).

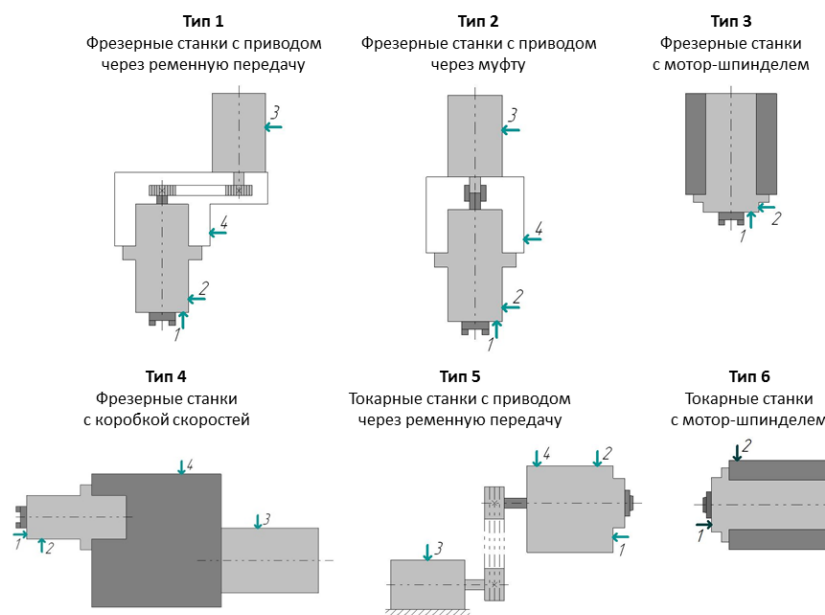


Рис. 5. Типовые схемы установки датчиков по типам привода

Немаловажной задачей при внедрении САМ технического состояния ПГД является определение точек измерения диагностических параметров, т.е. разработка схем установки датчиков. На основании анализа конструкций современных металлообрабатывающих станков с ЧПУ, работающих на предприятии, были выделены 6 типов компоновок привода главного движения, для которых разработаны типовые схемы установки датчиков, представленные на рис. 5. Каналы измерения для всех типов приводов, представленных на рис. 5, унифицированы

следующим образом. Канал измерения №1 для всех типов привода расположен на корпусе шпиндельного узла возле подшипников передней опоры шпинделя параллельно оси вращения шпинделя. Канал измерения №2 для всех типов привода расположен на корпусе шпиндельного узла возле подшипников передней опоры шпинделя перпендикулярно оси вращения шпинделя. Канал измерения №3 расположен на электродвигателе главного движения перпендикулярно оси вращения двигателя для типов привода 1, 2, 4 и 5. Канал измерения №4 расположен на корпусе

шпиндельного узла возле подшипников задней опоры шпинделя перпендикулярно оси вращения шпинделя для типов привода 1, 2 и 5, а для типа привода 4 канал измерения №4 расположен на корпусе коробки скоростей перпендикулярно оси вращения шпинделя. Каждый канал измерения

программируется на измерение диагностических параметров определенных объектов диагностики. Количество и вид объектов диагностики определяется в зависимости от конструкции ПГД (рис. 6).



Рис. 6. Привязка объектов диагностики к каналам измерения для типов привода

Оценка технического состояния объектов диагностики осуществляется путем сравнения измеренных значений диагностических параметров $X_1 \dots X_6$ с допустимыми значениями (рис. 7). Допустимые значения определяются относительно базового значения диагностического параметра X_{on} , характеризующего нормальное состояние объекта диагностики в период его начальной эксплуатации. Базовое значение диагностического параметра определяется по формуле:

$$X_{on} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_{ni}^2} = \sqrt{\frac{X_{n1}^2 + X_{n2}^2 + \dots + X_{nk}^2}{k}},$$

где $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}$ – измеренные значения диагностического параметра, k – количество измерений. Изначально рекомендуется устанавливать значение допустимого уровня «Предупреждение» в 3 раза больше базового значения диагностического параметра ($P_{1n} = 3 \cdot X_{on}$), а значение допустимого уровня «Авария» в 6 раз больше базового значения диагностического параметра ($P_{2n} = 6 \cdot X_{on}$). Однако в процессе эксплуатации стационарной системы диагностики значения допустимых уровней «Предупреждение» и «Авария» необходимо корректировать с учетом мониторинга фактического состояния объектов диагностики.

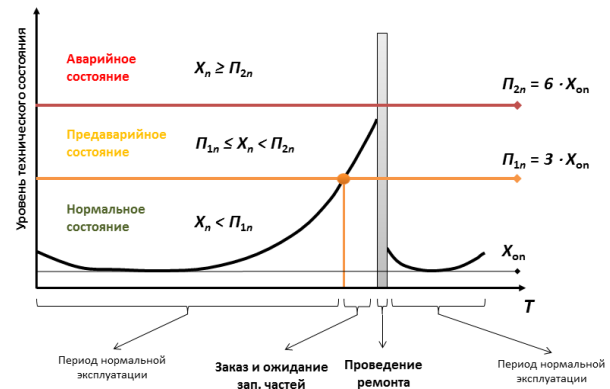


Рис. 7. К оценке технического состояния объектов диагностики

Работа САМ технического состояния ПГД металлообрабатывающих станков с ЧПУ иллюстрируется блок-схемой, представленной на рис. 8. При каждом включении станка в блоке 1 автоматически происходит включение заданной ступени переключаемой коробки скоростей при ее наличии. Далее в блоке 2 происходит включение заданного числа оборотов электродвигателя главного движения. В блоке 3 с выхода контроллера УЧПУ на вход регистратора подается сигнал (24 В) на начало измерений заданных диагностических параметров конструкционных объектов диагностики при холостом ходе станка. В

процессе проведения измерений в блоке 4 в УЧПУ производится отсчет заданного времени измерения. По окончании времени измерений в блоке 5 сигнал (24 В) с выхода контроллера УЧПУ снимается. Далее, если в приводе присутствуют другие ступени коробки скоростей, то происходит включение следующей ступени и действия 1-5 повторяются. Процессы, происходящие в блоках 1-5, полностью автоматизированы средствами УЧПУ и прописываются в программе электроавтоматики станка при установке системы мониторинга. После окончания измерений диагностических параметров $X_1 \dots X_6$ объектов диагностики, полученные значения записываются во внутреннюю циклическую память регистратора и могут удаленно передаваться по сети для дальнейшего анализа. Кроме этого, происходит сравнение измеренных значений диагностических параметров с допустимыми значениями и при их превышении на панели оператора СЧПУ выводится предупреждающее сообщение о нарушении технического состояния того или иного объекта диагностики.

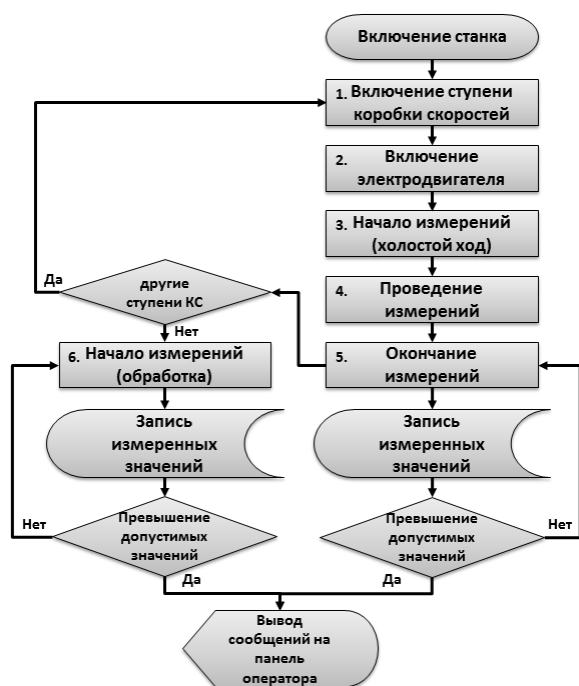


Рис. 8. Блок-схема работы системы мониторинга технического состояния ПГД

Параллельно, после окончания измерений диагностических параметров $X_1 \dots X_6$, в блоке 6 начинается мониторинг столкновений подвижных узлов станка и нарушений режимов обработки заготовки. Процесс измерения в блоке 6 осуществляется автоматически при отсутствии сигнала (24 В) на входе регистратора. Измеряемые в блоке 6 значения диагностических параметров, характеризующих столкновения

подвижных узлов станка и нарушения режимов обработки, сравниваются с допустимыми значениями постоянно в режиме реального времени, а записываются во внутреннюю память регистратора, как через заданные равные промежутки времени, так и при превышении допустимых значений. При превышении значений диагностических параметров допустимого уровня «Предупреждение» на панели оператора СЧПУ выводится предупреждающее сообщение о нарушении режимов обработки заготовки, а при превышении допустимого уровня «Авария» происходит аварийное отключение станка.

В настоящее время в АО «РКЦ «Прогресс» ведутся работы по внедрению САМ технического состояния ПГД на особо ответственном оборудовании с ЧПУ. Комплекс мероприятий по внедрению САМ включает в себя: монтаж аппаратной части системы; настройку программного обеспечения для сбора, обработки и удаленной передачи измеряемых значений диагностических параметров для объектов диагностики; разработку и настройку системы визуализации технического состояния объектов диагностики не базе SCADA-системы. Дальнейшим развитием САМ технического состояния ПГД будет являться ее интеграция в разрабатываемую на предприятии автоматизированную систему управления техническим обслуживанием и ремонтом (АСУ ТОиР) оборудования с ЧПУ для автоматизации планирования ремонтов по фактическому состоянию с прогнозированием остаточного ресурса и оценкой риска выхода из строя.

В ходе внедрения САМ в АО «РКЦ «Прогресс» на данный момент решены следующие задачи:

- проведен анализ значений параметров вибрации объектов диагностики, представленных на рис. 2, на более чем 100 единицах оборудования с ЧПУ в течение трех лет и выявлено влияние уровней вибрации на фактическое техническое состояние ПГД;
- предварительно определены допустимые уровни диагностических параметров, которые могут корректироваться в процессе эксплуатации системы автоматизированного мониторинга;
- разработаны методика измерений диагностических параметров включая унифицированные схемы установки датчиков;
- разработано программное обеспечение, отображающее техническое состояние объектов диагностики в виде трендов изменения значений диагностических параметров во времени в сравнении с допустимыми уровнями как для конкретной единицы оборудования с ЧПУ, так и для группы станков одной модели (рис. 9).

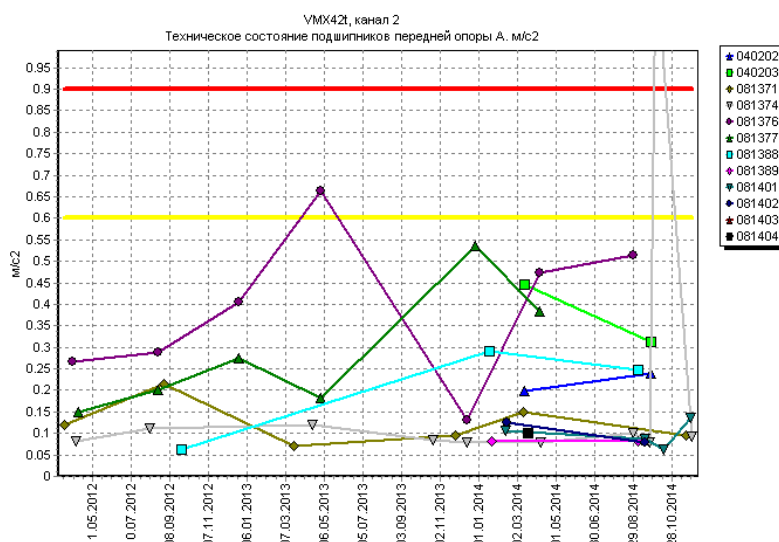


Рис. 9. Тренды изменений значений диагностического параметра, характеризующего техническое состояние подшипников передней опоры шпинделя для группы станков одной модели

Выводы: внедрение САМ технического состояния ПГД оборудования с ЧПУ позволяет: получать оперативную информацию в режиме реального времени как о техническом состоянии механических узлов ПГД станка, так и о состоянии технологического процесса обработки заготовок; снижать последствия столкновений подвижных узлов станка путем его оперативного отключения при авариях; предотвращать износовые отказы механических узлов особо ответственного и дорогостоящего оборудования с ЧПУ за счет своевременного планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту; осуществлять прогнозирование остаточного ресурса механических узлов ПГД станка; производить оценку рисков выхода из строя станка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Григорьев, С.Н. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
2. Козочкин, М.П. Сертификация и испытания металлорежущих станков // М.П. Козочкин, Ф.С. Сабиров. – М.: Изд-во «ИТО», 2012. 250 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. 829 с.
4. Проников, А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 1. Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.; под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана: Машиностроение, 1994. 444 с.

THE AUTOMATED MONITORING SYSTEM OF TECHNICAL CONDITION OF THE MAIN MOTION DRIVE AT METALWORKING MACHINE TOOLS WITH NUMERICAL PROGRAM CONTROL

© 2015 A.A. Vaganov, V.I. Pisarev

JSC "RSC "Progress", Samara

The method, structure and practice of creation the automated monitoring system of technical condition of the main motion drive at machines with numerical program control by vibroacoustic method at the industrial enterprise are presented.

Key words: machine about numerical program control, drive, automated monitoring, technical condition, diagnostic model

Anton Vaganov, Chief of the Diagnostics and Monitoring of Machine Tools Bureau. E-mail: vaganovanton@mail.ru
Vladimir Pisarev, Candidate of Technical Sciences, Head of the Technical Center for Maintenance and Repair of Equipment with Numerical Program Control. E-mail: d617@samspace.ru