

УДК 621.833

В. А. Сидоров, д-р техн. наук, проф., **В. П. Цокур**, канд. техн. наук, доц.
Донецкий национальный технический университет, ДНР
Тел./Факс: +38(0623010731; E-mail: viktor.cokur@yandex.ua

ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОМЕТРИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ СТАНКОВ С ЧПУ

В статье приведены результаты измерения параметров вибраций шпинделя станка с ЧПУ, что позволило выявить дефекты подшипников. Анализ полученных значений виброскорости и виброускорения при различных частотах вращения шпинделя позволил установить связь составляющих спектра с повреждениями в подшипниках. Приведен алгоритм диагностики технического состояния механической системы станка с ЧПУ

Ключевые слова: шпиндель, вибрации, подшипник, виброскорость, виброускорение.

V. A. Sidorov., V. P. Tsokur

VIBROMETRY CAPABILITIES FOR TECHNICAL MAINTENANCE OF CNC MACHINES

The article shows the measurement results vibration parameters of the spindle of the CNC machine, which allowed to identify bearing defects. Analysis of the obtained values of vibration velocity and vibration acceleration at various spindle speeds made it possible to establish a connection between the components of the spectrum and damage in the bearings. An algorithm for diagnosing the technical state of the mechanical system of a CNC machine tool is presented.

Keywords: spindle, CNC machine, mechanical system, vibration

1. Введение

Производительная и качественная работа станков с ЧПУ является комплексной проблемой и зависит от взаимодействия электрической, механической, системы программного управления и оператора. Некоторые аспекты этого взаимодействия рассматривались в работах: [1] – выполнен анализ погрешностей элементов 5-ти осевого станка с ЧПУ и корректировка перемещений по осям с помощью оптических датчиков, [2] – анализ динамического поведения шпинделя на обрабатывающем центре с ЧПУ, [3] – рассмотрены средства и методы автоматической диагностики системы при механической обработке, [4] – проведен анализ вибраций и определены возможности диагностирования неисправностей и др. Механическая часть станка с ЧПУ может являться причиной последующих повреждений системы контроля и измерения. Раннее обнаружение повреждений механической части обеспечивает минимальные затраты для восстановления работоспособности при условии своевременного проведения ремонта. Возможные решения данной задачи рассматривались в работах [5, 6]. Существуют предложения об установке стационарной системы вибродиагностики на станок с ЧПУ, например, приведенные в работах [7].

Известным фактом, является использование контроля вибрации, в частности спектрального анализа для обнаружения повреждений механических элементов. Приложение методов виброметрии, с учётом особенностей металлорежущих станков рассматривались ранее в работах [8, 9], результаты диагностирования технического состояния металлорежущих станков указывают на наличие некоторых особенностей при оценке технического состояния подшипниковых узлов. Определение связи параметров вибросигнала с состоянием подшипниковых узлов является актуальной задачей.

Целью работы является исследование возможности виброметрии при техническом обслуживании станков с ЧПУ, как одной из возможностей информационных технологий, обеспечивающей повышение безотказности оборудования и качества изготавливаемых деталей.

2. Основное содержание и результаты работы

Исследования проводили на станках, внешний вид которых показан на рис. 1. Первые отклонения в работе металлорежущих станков наиболее часто регистрируются при помощи органолептических методов – изменяется характер звука на холостом ходу и при обработке появляется вибрация или повышается температура узлов станка. Сравнительный анализ характера шума не позволяет локализовать место повреждения из-за наличия релаксационных шумов и субъективности метода.



Рисунок 1. Общий вид токарного станка с ЧПУ GLS-200M (а) и горизонтального обрабатывающего центра FRITZ WERNER TC 1.4 C (б)

Возможное решение - измерение общего уровня вибрации проводилось в фиксированных частотных диапазонах: виброскорость – среднеквадратичное значение в диапазоне (СКЗ) 10...1000 Гц; виброускорение – пиковое (ПИК) и среднеквадратичное (СКЗ) значения в диапазоне 10...5000 Гц.

Результаты взаимной оценки исправного и неисправного станков по значению виброскорости при частоте вращения 2000 об/мин в одинаковом режиме работы показаны в таблице 1 - значения низкие, имеют равный порядок, за исключением осевого направления. Это позволяет предположить наличие неисправности в одном из шариковых радиально-упорных подшипников.

Таблица 1. Результаты измерения виброскорости в контрольных точках станков.

Точка измерения	Среднеквадратичное значение виброскорости (мм/с), для направлений измерения, частотный диапазон 10... 1000 Гц		
	Вертикальное	Горизонтальное	Осевое
1	0,26 (0,20)	0,19 (0,18)	0,32 (0,04)
2	0,24 (0,22)	0,14 (0,15)	0,34 (0,05)

Примечание: в скобках значения для шпинделя без постороннего звука.

При значительных повреждениях значения общего уровня вибрации могут быть значительными. Это подтверждают результаты, приведенные в таблице 2. Измерения выполнены в контрольных точках: 1 – стол станка; 2 – шпиндель станка; 3 – подшипник двигателя свободный; 4 – зажимное устройство – радиальное направление; 5 – зажимное устройство – осевое направление.

Таблица 2. Значения параметров вибрации для контрольных точек станка FRITZ WERNER TC 1.4 C

Точка измерения	Виброскорость, мм/с холостой ход	Виброскорость, мм/с рабочий ход	Виброускорение СКЗ/ПИК, м/с ² холостой ход
1	0,05	0,4	0,1/0,4
2	0,2	1,6	1,2/11,7
3	0,5	1,9	1,7/5,8
4	5,8	9,2	2,6/11,3
5	2,4	3,9	6,9/25,9

Анализ результатов показывает:

- значения виброскорости при работе под нагрузкой увеличиваются;
- наибольшее значение виброскорости и виброускорения зафиксировано на зажимном устройстве в точках 4 и 5 на холостом и рабочем ходу;
- наименьшее значение виброскорости и виброускорения зафиксировано на столе в точке 1 на холостом и рабочем ходу.

Следующий этап – установление зависимостей. При изменении частоты вращения шпинделя от 500 об/мин до 3000 об/мин в режиме холостого хода были установлены зависимости изменения параметров вибрации (рис. 2). Для параметра виброскорости (рис. 2, а) характерны линейные зависимости с различным углом наклона для роликового и шариковых подшипников. Следовательно, это не дисбаланс, для которого характерны квадратичные зависимости, а механические повреждения подшипников.

Зависимости виброускорения (рис. 2, б) остаются линейными для шариковых и становятся нелинейными для роликового подшипника. Это указывает на взаимное влияние подшипниковых узлов при проявлении диагностических признаков повреждений.

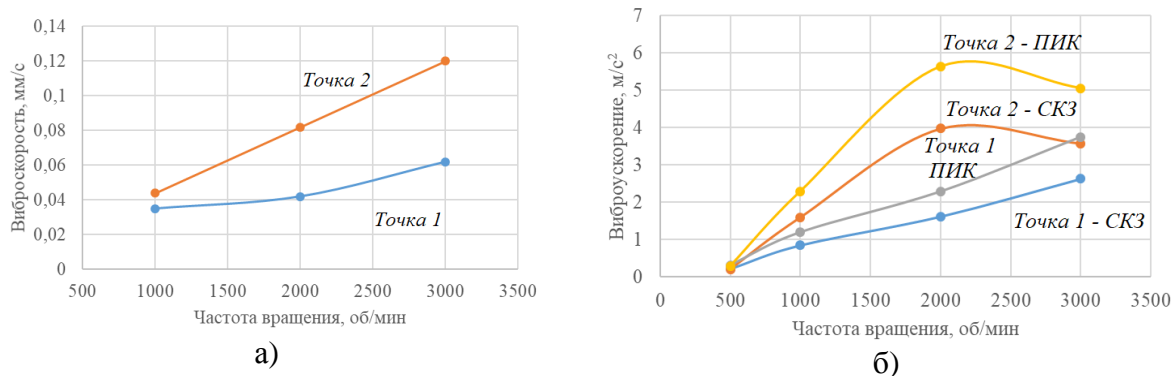


Рисунок 2. Зависимости изменения параметров вибрации от частоты вращения:
а - виброскорость; б - виброускорение

Спектральный анализ наиболее эффективен для идентификации вида повреждения. Однако на различной частоте повреждение создаёт различный спектр составляющих виброускорения. Смещаются оборотные частоты и гармоники, изменяется расположение боковых полос и глубина модуляции (рис. 3).

При частоте вращения 500 об/мин (рис. 3а) в спектре присутствует модуляция сигнала частотой 83 Гц – 10-я гармоника оборотной частоты. Увеличение частоты вращения шпинделя до 1000 об/мин приводит к модуляции сигнала частотой 164 Гц - 10-я гармоника оборотной частоты. Значения виброускорения становятся нестабильными. частота вращения 2000 об/мин – в спектре присутствует модуляция сигнала частотой 328 Гц - 10-я гармоника оборотной частоты. присутствует модуляция частотой 16 Гц – частота вращения сепаратора. на частоте вращения 3000 об/мин в спектре виброускорения присутствует модуляция сигнала частотой 494 Гц - 10-я гармоника оборотной частоты и модуляция частотой 22 Гц – частота вращения сепаратора.

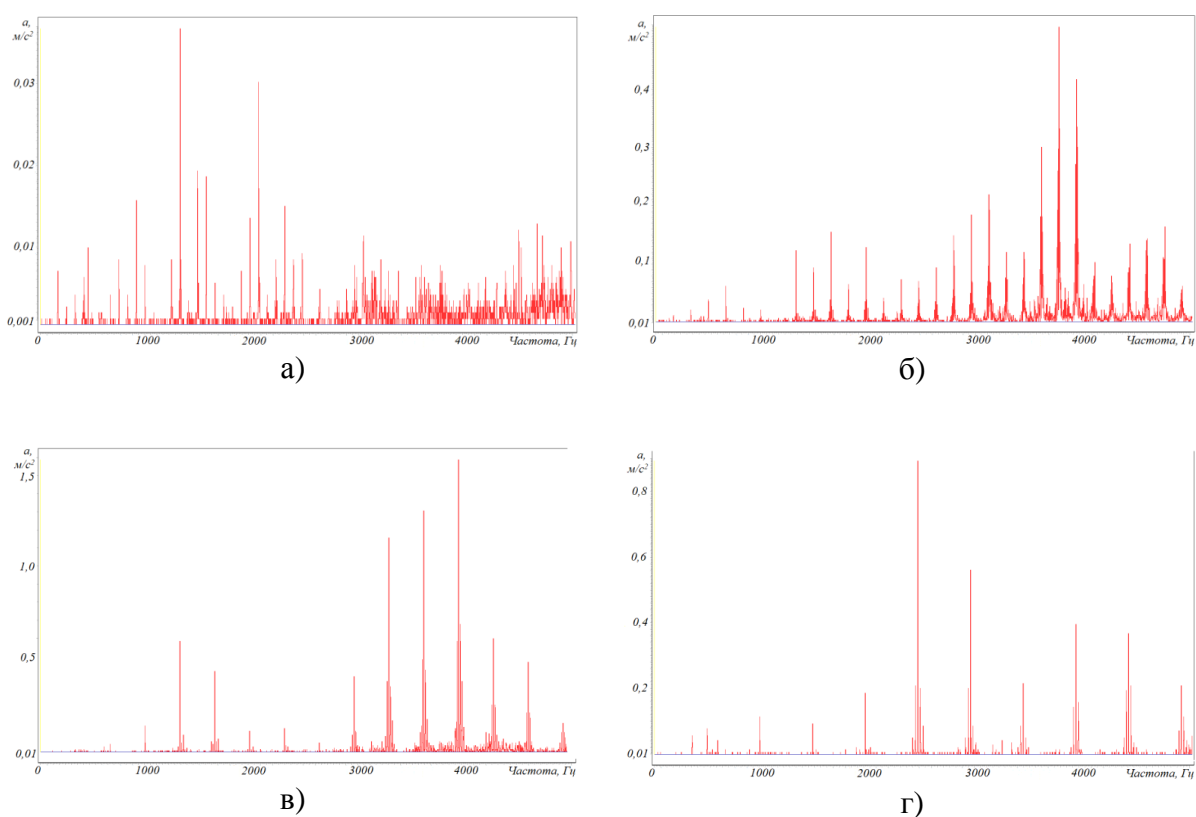


Рисунок 3. Изменения составляющих спектра виброускорения при различной частоте вращения шпинделя: а - 500 об/мин; б - 1000 об/мин; в - 2000 об/мин; г - 3000 об/мин

Наличие гармонических составляющих обычно не характерно при повреждениях подшипников. Расчёт информативных частот (таблица 3) возможных повреждений подтвердил наличие только частоты, связанной с вращением сепаратора.

В результате вибрационного исследования сделаны следующие выводы:

- увеличение значений виброскорости пропорционально изменению частоты вращения;
- значения виброускорения различны для направлений, большие значения виброускорения зафиксированы в районе роликоподшипника;
- отклонения в работе подшипников качения.

Диагноз – состояние привода станка – плохое, эксплуатация в длительном временном интервале не рекомендуется, необходима ревизия блока подшипников шпинделя.

Таблица 3. Информативные частоты (Гц) возможных повреждений подшипников 3018 и 7020 при различной частоте вращения.

Повреждения	Частота вращения, об/мин			
	500	1000	2000	3000
Перекатывание по наружному кольцу	101,4/81,3	202,7/162,6	406,5/326,2	610,4/489,9
Перекатывание по внутреннему кольцу	122,8/101,3	245,5/202,6	492,6/406,4	739,6/610,1
Вращение тел качения	42,9/33,9	85,9/68,0	172,5/136,4	258,9/204,8
Вращение сепаратора	3,7/3,7	7,5/7,4	15,1/14,8	22,6/22,3
Изменение формы тел качения	16,4/16,4	32,9/32,7	66,0/65,6	99,1/98,5
Оборотная частота	8,3	16,6	33,3	50,0

Составляющие спектра вибрации, полученные при исследовании станка FRITZ WERNER TC 1.4 C содержали (рис. 4): гармоники до 24-й оборотной частоты – наличие металлического контакта; преобладают 2-я и 4-я гармоники – перекос, изгиб вала; присутствуют субгармоники и их модуляции – наличие зазоров; не стабильный спектр – металлический контакт; негармонические составляющие – отклонения в работе подшипников.

Поставленный диагноз - состояние привода станка – плохое, эксплуатация в длительном временном интервале не рекомендуется, необходим осмотр подшипников шпинделя и элементов зажимного устройства.

Заключительным этапом диагностирования является визуальный осмотр, в первую очередь подшипников, при котором определяются проявления зафиксированных повреждений. Так в результате осмотра подшипников шпинделя станка с ЧПУ GLS-200M установлено наличие следующих повреждений (рис. 5): следы проворота наружного кольца в корпусе, по торцевым поверхностям, следы ослабления посадки по валу, следы окисления в виде полосы светло коричневого цвета, которые являются признаком нарушения свободы вращения тел качения.

Таким образом, замена подшипников проведена на ранней стадии – макроповреждения, на деталях подшипника, отсутствуют; на беговых дорожках колец присутствуют следы окислительного износа и микроцарапины расположенные по направлению движения. Причиной повышенной вибрации подшипникового узла шпинделя стало вращение тел качения по одной оси при фиксации тел качения из-за накопления продуктов износа смазочного материала в окнах сепаратора. Колебания наиболее загрязнённого подшипника передавались по валу относительно податливой «О»-

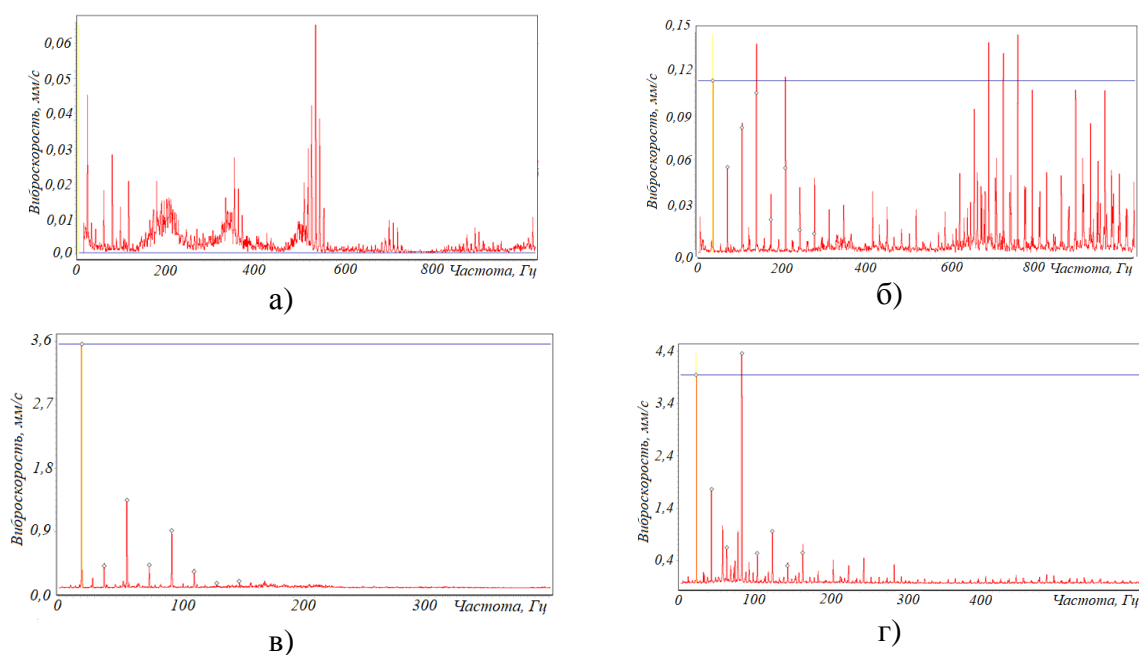


Рисунок 4. Изменения составляющих спектра виброскорости:
 а) шпиндель – холостой ход; б) шпиндель под нагрузкой;
 в) зажимное устройство – холостой ход; г) зажимное устройство под нагрузкой



Рисунок 5. Повреждения подшипников шпинделя станка GLS-200M:
 а - следы проворота наружного кольца в корпусе; б - следы ослабления посадки по валу.

образной пары на роликовый подшипник, имеющий более строгие допуски по возможности компенсации угловых отклонений.

Прикладным использованием методов виброметрии можно считать возможность уравнивания приспособлений в жёстких шпинделях станков. Динамическое уравнивание приспособления (рис. 6) для механической обработки деталей проведено в опорах станка с ЧПУ GLS-200M.

Приспособление представляло собой ассиметричную конструкцию, уравновешенную в процессе проектирования и после изготовления статически. Однако, расчётная частота вращения 3000 об/мин достигнута не была из-за повышенной вибрации на частоте 1000 об/мин. Уравнивание приспособления, установленного на станке, проведено в три этапа. Первоначальная вибрация 1,8 мм/с на частоте вращения

1000 об/мин, была принята в качестве предельно допустимой не оказывающей существенного влияния на измерительную систему станка.

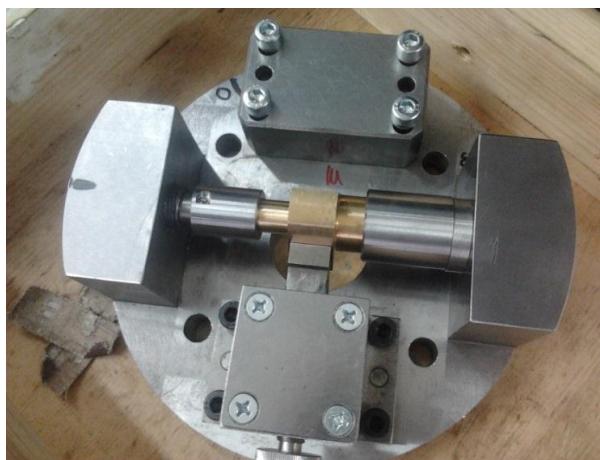


Рисунок 6. Приспособление для механической обработки деталей

Уравновешивание, проведенное на частоте 1000 об/мин, позволило увеличить частоту вращения до 1500 об/мин, а следующее уравновешивание предоставило возможность разогнать шпиндель до частоты 2000 об/мин. Для установки пробного и компенсирующих грузов были использованы технологические отверстия приспособления. В результате уравновешивания удалось достигнуть значения виброскорости 0,2 мм/с при частоте вращения 2500 об/мин. Проведенные исследования показали необходимость дополнения конструкции приспособления местами для размещения компенсирующих грузов.

На основании изложенных подходов, в дополнение к рекомендациям, приведенным в работах [10, 11, 12] предлагается алгоритм проведения диагностирования технического состояния электромеханической системы (ЭМС) станка (рис. 7).

Особое внимание следует обратить на зону взаимодействия, в которой происходит электромеханическое преобразование энергии – электрическая энергия преобразуется в механическую. Текущие электрические мощность, ток, электромагнитный момент преобразуются в механическую мощность на валу (значения момента и частоты вращения).

Если со стороны механизма, исполнительного органа имеет место повышения нагрузки, то это находит свое отражение в росте токовых значений, развиваемого двигателем момента, температуре нагрева двигателя. Механическая часть реагирует на рост нагрузок увеличением упругого момента в соединительных звеньях, ростом усталостных повреждений, увеличением момента сопротивления и снижением скорости движения исполнительных звеньев.

Зафиксированные перегрузки механические и электрические проходят несколько этапов сравнения и оценки. В первую очередь оценивается уровень перегрузок, а далее сигналы проходят через детерминаторы воздействий и блоки критериев состояния – это даёт возможность принять решение о продолжении работы ЭМС, о продолжении работы с допустимыми перегрузками.

В тех случаях, когда отклонения от допустимых, выбираются ремонтные воздействия и после их реализации, проверки качества проведенного ремонта и устранения всех повреждений даётся разрешение на продолжение эксплуатации объекта.

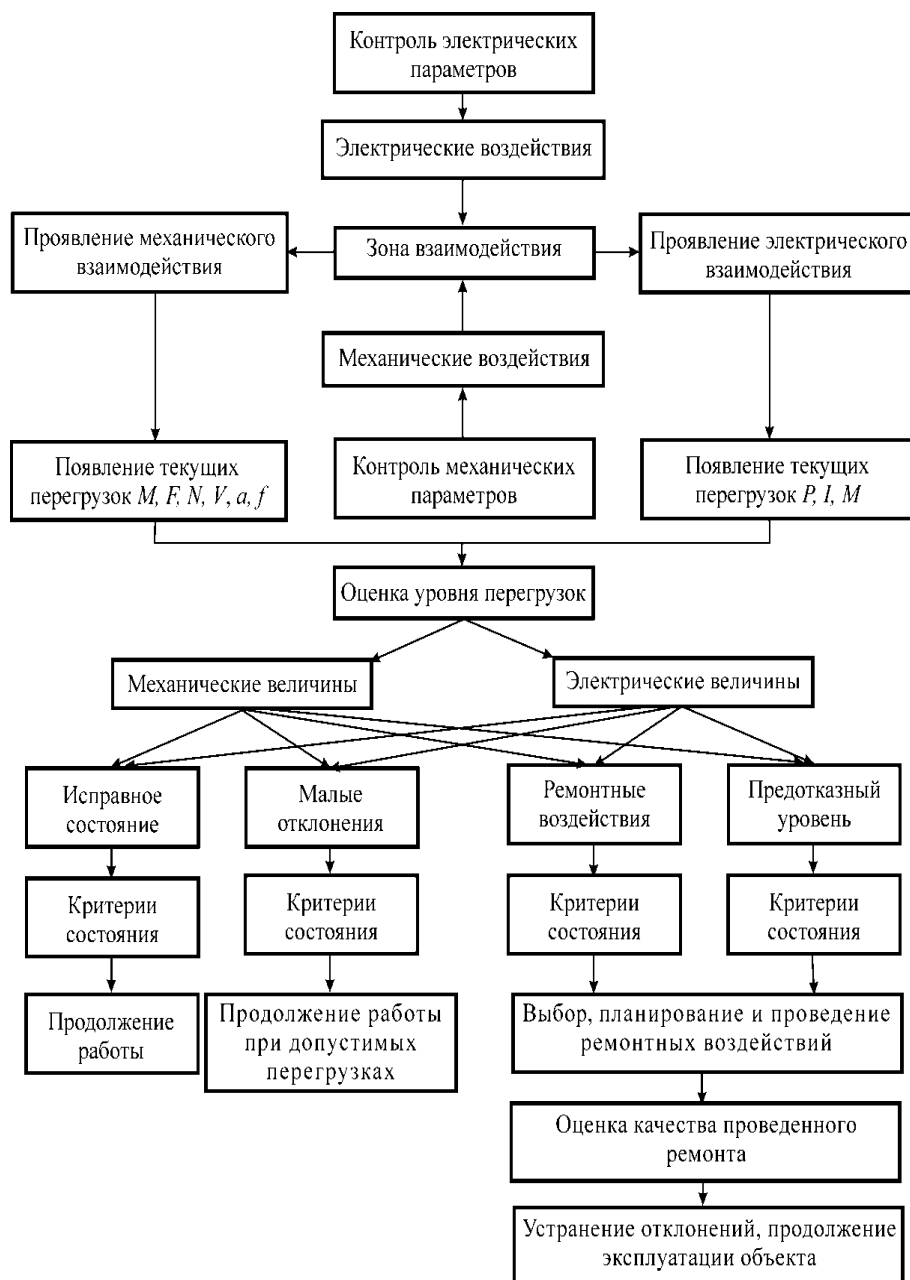


Рисунок 7. Блок-схема электромеханической системы (ЭМС) станка

Проверка качества ремонтной операции осуществляется при режиме холостого хода, а далее при работе под нагрузкой. Необходимо разработать оперативные методы активного воздействия на техническое состояние, позволяющие предупредить возникновение отказа.

3. Заключение.

Предлагаемый алгоритм оценки технического состояния ЭМС учитывает реальное состояние объекта на основе измерения параметров вибрации, определяет необходимое упреждающее ремонтное воздействие с последующей оценкой качества ремонта, определяя на основании этого возможность дальнейшей эксплуатации системы.

Результаты одноплоскостной динамической балансировки приспособления для механической обработки в опорах станков показывают на возможность эффективного

снижения дисбаланса с использованием современных анализаторов вибрации по стандартной методике уравнивания и снижения среднеквадратического значения виброскорости (в частотном диапазоне 10...1000 Гц), до уровня 0,2 мм/с, что значительно ниже допустимых значений регламентирующих вибрацию стандартов.

Статическое уравнивание металлорежущего инструмента и приспособлений для механической обработки не позволяет достичь необходимой точности уравнивания. Доказательство данного утверждения заключается в возможности снижения составляющих от дисбаланса до уровня 0,02 мм/с при динамическом уравнивании, что соответствует требованиям обеспечения высокого качества обрабатываемой поверхности при частотах вращения свыше 2000 об/мин. В механотронной системе станков наряду с системами вибрационного контроля должны быть предусмотрены системы регулирования вибрации. Например, система автоматической компенсации дисбаланса, что позволит увеличить срок службы инструмента и станка в целом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01101528/document>.
2. Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00660867/document>.
3. Systèmes de surveillance automatique en usinage: Moyens et methods http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/52148/a_IU3P65K3.pdf?sequence=1.
4. Surveillance vibratoire et maintenance predictive. <http://silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/r6100.pdf>.
5. Фельдштейн, Е. Э. Обработка деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие / Е.Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 3-е изд., доп. – Минск: Новое знание, 2007. – 299 с.
6. Система мониторинга вибраций (VCM) для станков с ЧПУ. http://www.omative.com/image/users/.173890/ftp/my_files/Russian/Documents/TechSpec_Config/TechSpec_for_VCM_Russian.pdf
7. Система мониторинга вибраций (VCM) для станков с ЧПУ. http://www.omative.com/image/users/173890/ftp/my_files/Russian/Documents/TechSpec_Config/TechSpec_for_VCM_Russian.pdf.
8. Сидоров, В. А. Уравнивание в опорах станков / В. А. Сидоров / «Вестник современных технологий». Сборник научных трудов ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – Вып. №6. – 2017. – С. 56 – 61.
9. Сидоров, В. А. Диагностирование подшипников шпинделя станка с ЧПУ / В. А. Сидоров / «Вестник современных технологий». Сборник научных трудов ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – №1(9). – 2018. – С. 58-63.
10. Шпак, В. Неполадки модернизированных станков с ЧПУ: советы и рекомендации профессионалов / «Техническое обслуживание и ремонт». – №3. – 2010. – С. 47-52. (Неполадки модернизированных станков с ЧПУ. <http://stepmotor.ru/nepoladki>).
11. Методы поиска неисправностей работы станков с ЧПУ. <http://delta-grup.ru/bibliot/7k/40.htm>.
12. Неисправности шпинделя и способы их устранения (список проблем и решений). <http://cncmotors.ru/articles/neispravnosti-shpindelja-i-sposoby-ix-ustraneniya-spisok-problem-i-reshenij>.

Поступила в редколлегию 03.02.2021 г.