

**Ключевые слова:**

станок, дефекты, вибродиагностика, подшипник, шарико-винтовая пара, точность, вибрации

# УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАНКА DMU 100 MONOBLOCK

**Юрий САВИНОВ, Валерия ПЕРЕБАСОВА**

Рассмотрены проблемные вопросы управления жизненным циклом оборудования и приведено решение с применением метода безразборной вибрационной диагностики. Описана методика работ, рассмотренная на примере диагностики станка DMU 100 Monoblock. Разработана подробная схема на основе детальной таблицы дефектов узлов. Для повышения информативности результатов проведены работы по определению точности и согласованности работы приводов.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с выходом нового ГОСТ «Станки металлорежущие. Условия испытаний. Нормативно-техническое обеспечение совершенствования методов диагностирования и технологий ремонтно-восстановительных работ станочного парка» [1], который должен вступить в действие в первой половине 2019 года, возникают вопросы о готовности отдельных предприятий к работе по современной методике предупредительного обслуживания, позволяющей управлять жизненным циклом станков.

В настоящий момент имеется положительный опыт в металлургии, машиностроении, нефтегазовой промышленности, передовые предприятия которых уже перешли к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию и в первый же год на 30% снизили затраты на обслуживание оборудования. Таким образом, практически исключили аварийный выход оборудования из строя из-за технической неисправности [2]. В машиностроительных отраслях переход на современное обслуживание только начинается, что вызвано в первую очередь сложностью технологического оборудования и достоверностью идентификации имеющихся дефектов. К тому же ряд фирм, специализирующихся на диагностике станков и иного технологического оборудования, за результаты

диагностики выдают измерения только общего уровня вибрации, что является явно недостаточным, тем самым фактически дискредитируя методы безразборной диагностики.

Наиболее эффективное обслуживание станочного парка выполняется на предприятиях ракетно-космической промышленности, специалисты которых проводят безразборную диагностику станков с высокой достоверностью и информативностью [3, 4], что позволяет предотвращать преждевременный выход из строя технологического оборудования, повышать эффективность работы станков и сокращать расходы на обслуживание. Достигнутые результаты определяются тем, что специалисты ракетно-космической промышленности имеют собственные разработанные методы диагностики, защищенные патентами, которые многократно отработаны на стендах для проверки шпиндельных узлов и стендах для обкатки шариково-винтовых пар (ШВП). Указанные методы проверены на отечественных станках и станках производства Германии, Японии, Швейцарии, Тайваня и т.д.

Следует привести пример безразборной диагностики станка, выполненной специалистами ФГУП «НПО «Техномаш», которые имеют опыт по безразборной диагностике отечественных и импортных станков, различных типов: токарных, токарно-кару-

сельных, обрабатывающих центров, горизонтально-расточных, координатно-расточных, шлифовальных, балансировочных и т.д. Руководству одного из предприятий потребовалось определить техническое состояние станка DMU 100 Monoblock, который длительное время работал на производстве, вследствие чего стали проявляться значительные вибрации. При общении со службой главного механика авторам статьи было высказано мнение, что без разборки невозможно определить причину и дефекты пятикоординатного станка. Данное заблуждение является весьма характерным, ведь инженеры-механики проходят обучение лишь по кинематике станков, а обучение для инженеров-станочников по динамике станков проводится только в весьма ограниченном числе вузов. В качестве положительных примеров можно привести преподавание динамики станков в МГТУ им. Н. Э. Баумана и МГТУ «СТАНКИН».

### БЕЗРАЗБОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА И ПРИВОДА ПО ОСИ X

Для понимания процесса безразборной диагностики опишем последовательность выполнения работы. Весь процесс проведения вибродиагностики можно разделить на несколько этапов, которые неизменны на любом оборудовании. На первом этапе необходимо получить необходимую информацию о диагностируемом оборудовании. Например, для диагностики станка DMU 100 Monoblock необходима следующая информация: кинематические схемы шпинделя, поворотного стола, приводов по трем осям; перечень элементов каждого из приведенных узлов, частоты вращения электродвигателей. На втором этапе инженер-диагност рассчитывает собственные частоты каждого элемента узла, что в дальнейшем позволяет при сравнении расчетных данных с экспериментальными определить виды имеющихся дефектов и их величины [4].

Чаще всего в документации на оборудование частоты вращения электродвигателей задаются в оборотах в минуту, но для дальнейших расчетов необходим их перевод в герцы:

$$f_{\text{вр}} = \frac{n}{60},$$

где  $n$  – частота вращения вала электродвигателя, об/мин.

В качестве примера определения дефектов в подшипниковом узле рассмотрен подшипник 3182126 со следующими исходными данными:

- $f_{\text{вр}} = 3,34$  Гц – частота вращения электродвигателя;
- $d_{\text{н}} = 200$  мм – диаметр наружного кольца;
- $d_{\text{в}} = 130$  мм – диаметр внутреннего кольца;

- $d_{\text{тк}} = 16$  мм – диаметр тела качения;
- $\alpha = 0^\circ$  – угол контакта тел и дорожек качения;
- $z = 26$  – количество тел качения.

Каждый элемент в подшипнике (наружное кольцо, внутреннее кольцо, сепаратор и тела качения) имеет свои собственные частоты колебаний, поэтому их достаточно легко различить и определить дефектный элемент.

Частота вращения сепаратора относительно наружного кольца  $f_{\text{с}}$ , Гц:

$$f_{\text{с}} = \frac{1}{2} \times f_{\text{вр}} \times \left(1 - \frac{d_{\text{тк}}}{(d_{\text{с}} \times \cos \alpha)}\right).$$

где  $d_{\text{с}}$  – диаметр сепаратора в мм, определяемый как  $d_{\text{с}} = (d_{\text{н}} + d_{\text{в}})/2$ .

Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу  $f_{\text{н}}$ , Гц:

$$f_{\text{н}} = \frac{1}{2} \times f_{\text{вр}} \times \left(1 - \frac{d_{\text{тк}}}{(d_{\text{с}} \times \cos \alpha)}\right) \times z.$$

Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу  $f_{\text{в}}$ , Гц:

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2} \times f_{\text{вр}} \times \left(1 + \frac{d_{\text{тк}}}{(d_{\text{с}} \times \cos \alpha)}\right) \times z.$$

Частота вращения тел качения относительно поверхности колец  $f_{\text{тк}}$ , Гц:

$$f_{\text{тк}} = \frac{1}{2} \times f_{\text{вр}} \times \frac{d_{\text{с}}}{d_{\text{тк}}} \times \left(1 + \frac{d_{\text{тк}}}{(d_{\text{с}} \times \cos \alpha)}\right) \times z.$$

Частоты всех элементов раскладываются на первые 10 гармоник и сводятся в одну таблицу (табл. 1).

По данным таблицы строятся графики частот с произвольной амплитудой, но она должна быть одинакова для всех гармоник каждого элемента (рис. 1).

В диапазоне частот от 0 до 15 Гц плохо различимы частоты, поэтому в таком случае применяют метод «Лупа». Данный метод заключается в следующем: тот диапазон частот, который плохо различим на основном графике, переносят на другой с большим разрешением по частоте, что нужно для четкого и правильного анализа построенных графиков частот.

Аналогичные операции расчета проводятся при расчете зубчатых зацеплений.

Частота вращения ведущей шестерни  $f_{31}$ , Гц:

$$f_{31} = f_{\text{вр}} \times \frac{z_1}{z_2}.$$

Частота вращения ведомой шестерни  $f_{32}$ , Гц:

$$f_{32} = f_{\text{вр}} \times \frac{z_2}{z_1}.$$

где  $z_1$  – число зубьев ведущей шестерни;  $z_2$  – число зубьев ведомой шестерни.

Ременная передача имеет схожий расчет с зубчатой передачей. По своей кинематике она соответствует трехосевой зубчатой передаче, где на каждой оси присутствует по одной шестерне. Наибольшей шестерней является ремень с наибольшим числом зубьев.

Частота вращения ведущего вала  $f_{p1}$ , Гц:

$$f_{p1} = f_{вр}$$

Частота вращения ведомого вала  $f_{p2}$ , Гц:

$$f_{p2} = f_{p1} \times \frac{d_1}{d_2}$$

Частота вращения ремня  $f_{p3}$ , Гц:

$$f_{p3} = f_{p1} \times \left(\frac{\pi \times d_1}{L}\right) = f_{p2} \times \left(\frac{\pi \times d_2}{L}\right),$$

где  $d_1$  – диаметр ведущего шкива;  $d_2$  – диаметр ведомого шкива;  $L$  – длина ремня.

По рассчитанным собственным частотам элементов узлов определяем параметры необходи-

Таблица 1. Результаты расчета частот вращения элементов подшипника

Гармоники	$f_c$	$f_n$	$f_b$	$f_{тк}$
1	1,508	39,210	47,63	17,06
2	3,016	78,419	95,261	34,12
3	4,524	117,629	142,891	51,18
4	6,032	156,838	190,522	68,24
5	7,540	196,048	238,152	85,30
6	9,048	235,257	285,783	102,36
7	10,556	274,467	333,413	119,42
8	12,064	313,677	381,043	136,48
9	13,573	352,886	428,674	153,54
10	15,081	392,096	476,304	170,60

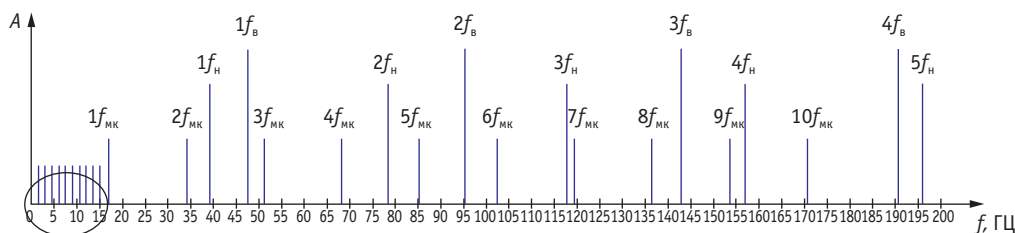


Рис. 1. Наглядное отображение частот элементов подшипника

Шпиндель

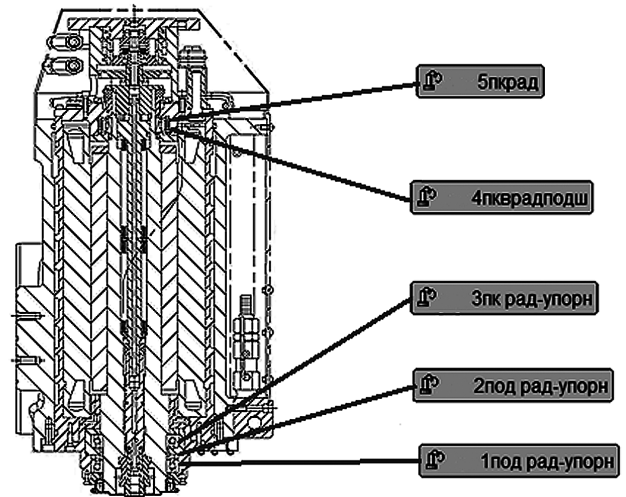


Рис. 2. Схема управляющей программы по диагностике шпиндельного узла перед измерениями

мого частотного диапазона, приняв, что в него должны попадать десять гармоник каждого элемента, и составляем программу расчета в виде схемы (рис. 2). Проводим измерение спектров огибающей и прямых спектров в выбранном частотном диапазоне. Необходимо иметь возможность работать в октавном или в третьоктавном режимах. Время измерения выбираем с учетом суммирования не менее десяти спектров, в дальнейшем после суммирования и определения спектра со средними значениями проводим сравнение и анализ вышеприведенного спектра с ранее рассчитанными значениями собственных частот деталей и узлов станка. В связи с тем, что иногда реальная частота вращения отличается от заданной, необходимо в таких случаях определить реальную частоту вращения вала, провести корректировку расчетов для собственных частот всех элементов с учетом ширины допуска (в процентах) для автоматизированной подстройки расчетных частот и их сравнения с пик-факторами спектров. Определяем виды дефектов, для чего накладываем откорректированные собственные частоты элементов на

графики спектров огибающей и прямого спектра. По выбору вводим различные расчетные значения элементов, один или несколько (рис. 3, 4). Следующим шагом



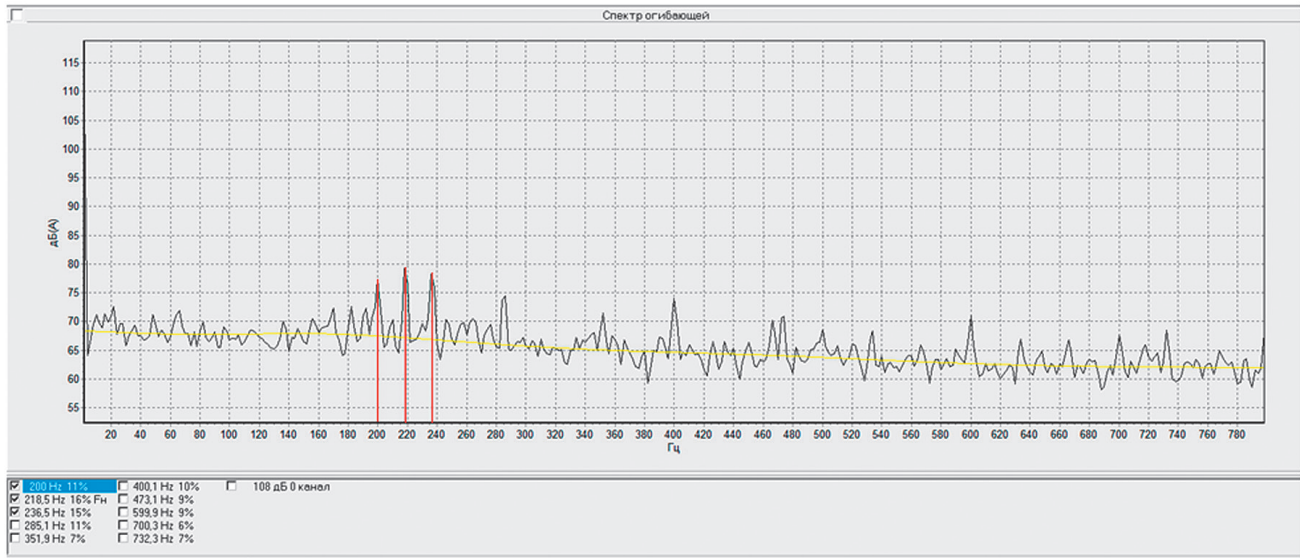


Рис. 3. Спектр огибающей упорно-радиального подшипника

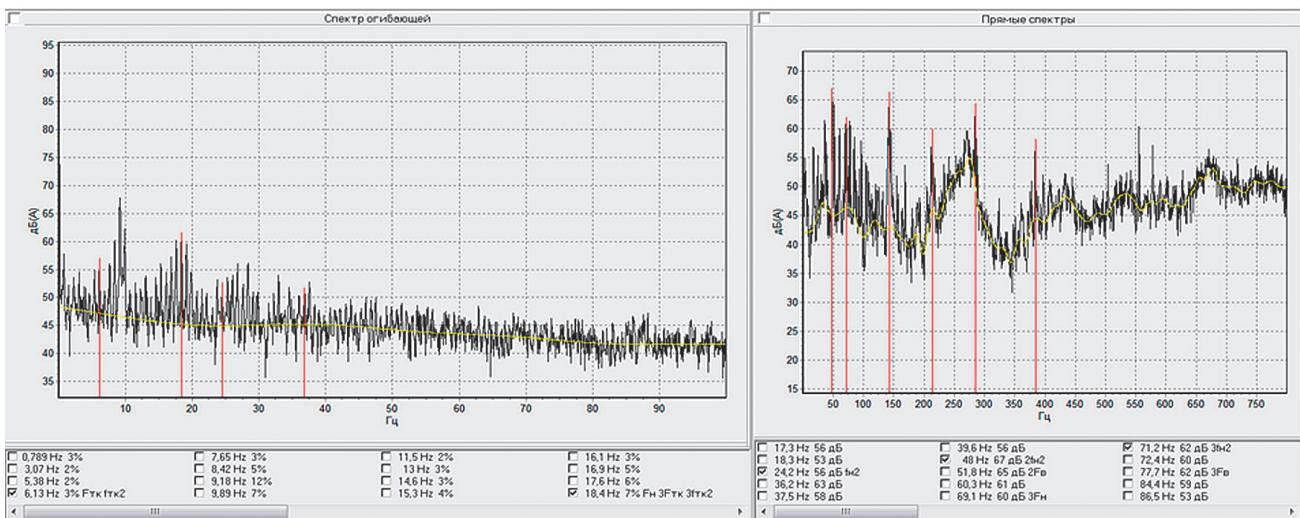


Рис. 4. Спектр огибающей и прямой спектр ШВП по оси X

определяем величины дефектов, взяв отношение наибольших по значениям пик-факторов из экспериментальных данных, для каждого случая выявленного соответствия расчетных и экспериментальных величин к величине среднеквадратического значения (СКЗ). СКЗ для определения величин дефектов определяем двумя вариантами – по всей ширине частотного диапазона и по участкам, которые разбиваются на имеющие стабильный характер СКЗ. Рассчитываем для каждой величины дефекта коэффициент модуляции, то есть отношение разницы максимального сигнала и минимального сигнала к сумме максимального и минимального сигнала в процентах, что

характеризует достоверность идентификации. В окончательном варианте выводим два-три графика: спектр огибающей, прямой спектр, спектр с ограниченным частотным диапазоном «Луна», по возможности используя третьоктавный фильтр.

Необходимо на основе анализа спектров идентифицировать причины, характеризующие дефекты, в том числе вызванные кинематическими или параметрическими погрешностями, образовавшиеся из-за сил трения или вызванные ударным воздействием. Приведенный выше анализ проводит эксперт-диагност, который также учитывает природу сигнала: является ли он амплитудно-модулированным или частотно-модулированным, осо-

бенное внимание должно уделяться моделирующему сигналу. На спектре огибающей и прямом спектре вводим отличающимся цветом откорректированные значения собственных частот всех элементов по очереди или совместно, выводим таблицы всех амплитуд, по которым произошла идентификация дефектов, определяем виды и величины дефектов и коэффициент модуляции. Виды и величины дефектов в окончательном варианте представляем отдельной таблицей (табл. 2).

Изображение узлов станка в графическом виде, где каждый элемент станка, влияющий на точность обработки, выделяется одним из трех цветов, в зависимости от его технического состояния представлен на рис. 5:

- красный – превышает допустимые пределы и подлежит замене или требует устранения дефектов сборки (перекосы, несоосность и т.д.);
- желтый – имеется допустимый износ или дефект сборки;
- зеленый – нет дефектов.

По результатам диагностики собираются все данные по элементам диагностируемого оборудования, выделяются элементы, имеющие сильные дефекты, и представляются в графическом виде для отображения полной картины (рис. 6).

Для комплексной диагностики оборудования и, в частности, станка модели DMU 100 Monoblock следует провести проверку точности и согласованности работы приводов. По своей сути такая проверка заключается в определении отклонения от круглости и построении круглограммы. Для станка модели DMU 100 Monoblock проведена проверка точности и постоянства отработки круговой траектории в плоскости X и Y при подаче 1000 мм/мин (рис. 7).

Как следует из приведенных данных, отклонение от точности отработки круговой траектории станка DMU 100 Monoblock в плоскости X и Y составляет 10,0 мкм. Наибольшую погрешность в отклонении

Таблица 2. Техническое состояние шпиндельного узла и ШВП по оси X станка модели DMU100Monoblock

Диагностический узел	Тип	Рекомендации	Сильные дефекты	Средние дефекты	Слабые дефекты
<b>Шпиндельный узел</b>					
1-я, 2-я, 3-я точки измерения	Подшипник качения упорно-радиальный	Заменить подшипник	Задирь наружного кольца – 17%; задирь внутреннего кольца – 14%; задирь на телах качения – 12%		
4-я, 5-я точки измерения	Подшипник качения радиальный с цилиндрическими роликами	Заменить подшипник	Задирь наружного кольца – 17%; задирь внутреннего кольца – 15%; задирь на телах качения – 7%		
<b>Привод по оси X</b>					
1-я точка измерения	Подшипник качения 40115	Заменить подшипник	Задирь наружного кольца – 11%		
2-я точка измерения	Ременная передача 57/880	Нет дефектов			
3-я, 4-я точки измерения	ШВП	Нет дефектов			
5-я точка измерения	Подшипник качения 40115	Заменить подшипник	Задирь на наружном кольце – 18%	Задирь, сколы на телах качения – 5%	

от круглости в плоскости X и Y вносит отклонение от перпендикулярности 83,4 мкм/мм, что вносит погрешность 8,3 мкм, или 56% от суммарного отклонения от круглости. Остальные погрешности составляют не более 10% от суммарного отклонения от круглости и поэтому не рассматриваются.

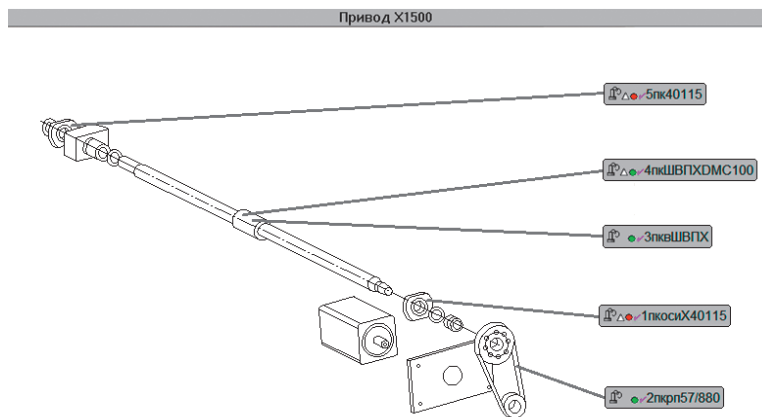


Рис. 5. Схема управляющей программы по диагностике привода по оси X после измерений

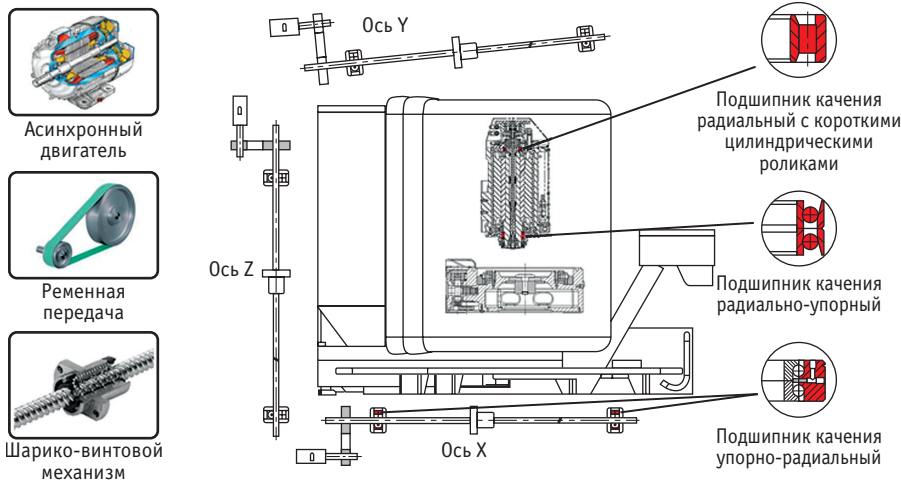


Рис. 6. Итоговая схема технического состояния станка модели DMU 100 Monoblock

После проведенной диагностики можно сделать выводы, что станок модели DMU 100 Monoblock сохраняет высокую точность и согласованность работы приводов, вместе с тем стоит отметить значительные задиры подшипников шпиндельного узла, вызванные ударным воздействием, подшипников привода оси X, образованные вследствие ударного воздействия с одновременной моментной нагрузкой.

После проведенной работы состоялось обсуждение результатов безразборной диагностики станка и специалисты предприятия подтвердили, что причиной явился слом сверла при выполнении подачи по оси X, что повлекло ударное воздействие со значительным моментным нагруже-

нием, выявленное на вибрационных характеристиках. То есть при проведении безразборной диагностики удалось установить и причину повышенной вибрации, и конкретные подшипники, которые требуют замены, что позволяет объективно оценить техническое состояние станков, не допускать их аварийного выхода из-за технической неисправности, знать действительный ресурс каждого элемента станка, фактически управлять его жизненным циклом.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Проект ГОСТ «Станки металлорежущие. Условия испытаний. Нормативно-техническое обеспечение совершенствования методов диагностирования и технологий ремонтно-восстановительных работ станочного парка», ЕАСС, 2018, 63 с.
2. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. — СПб.: СПб МТУ, 2004.
3. Писарев В. И., Ваганов А. А., Денисенко А. Ф., Тютюрев И. О. Техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе безразборной диагностики технического состояния. Известия Самарского народного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1(2).
4. Савинов Ю. И. Управление жизненным циклом станков на предприятиях Роскосмоса // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2016. № 2.

**Ballbar диагностика (%)**

**XУ 360град 100мм подача 992,1 предварительно**

Оператор: Савинов  
Дата: 2017-июл-12 11:15:37

Станок: DMU100Monoblock  
QC20-W: 69W486, Предыдущая калибровка: 2012-05-08

56%	Отклонение от перпендикулярности	83,4 мкм/м
8%	Выбросы обратного хода Y	▲ -0,1 мкм ▼ -1,2 мкм
7%	Выбросы обратного хода X	▶ 1,1 мкм ◀ 1,0 мкм
6%	Рассогласование шкал	1,8 мкм
5%	Люфт X	▶ -0,5 мкм ◀ -0,7 мкм
	Отклонение от круглости	10,0 мкм

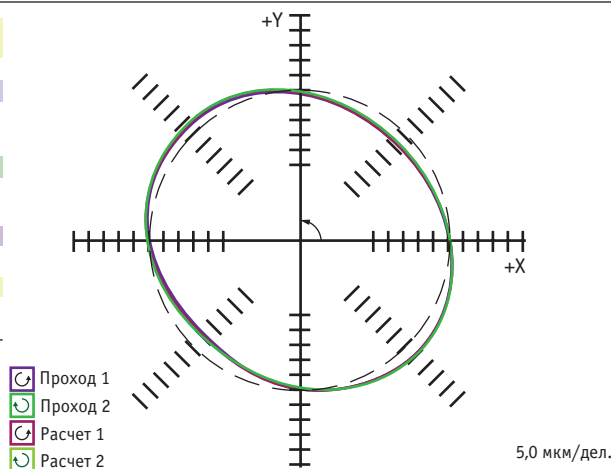


Рис. 7. Результаты проверки точности и постоянства отработки круговой траектории на станке DMU 100 Monoblock

**САВИНОВ Юрий Иванович** – кандидат технических наук, начальник отделения отраслевой диагностики технологического оборудования ФГУП «НПО «Техномаш»

**ПЕРЕБАСОВА Валерия Максимовна** – инженер отделения отраслевой диагностики технологического оборудования ФГУП «НПО «Техномаш», студентка 6 курса МГТУ им. Н.Э. Баумана