



Ключевые слова:

измерение, жизненный цикл, машиностроение, конструкционный материал, точность, станкостроение, металлорежущее оборудование, прогнозирующий мониторинг, фазохронометрический метод

Keywords:

measurement, life cycle, mechanical engineering, the constructional material, precision, machine-tool construction, the metal-cutting equipment, predicting monitoring, phasechronometric method

ВНЕДРЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

Михаил КИСЕЛЕВ, Александр КОМШИН, Антони СЫРИЦКИЙ

В статье рассматриваются проблемы обеспечения жизненного цикла объектов отечественного машиностроения. Проведен анализ некоторых актуальных направлений развития в соответствии с государственными программами развития. На примере внедрения измерительно-вычислительных технологий на базе фазохронометрического метода показаны возможности решения задач мониторинга, оценки технического состояния оборудования и инструмента, деграционных процессов в конструкционных материалах, определения раннего зарождения дефектов. Приведены экономические расчеты внедрения подобной технологии в станкостроении.

Abstract: In this article problems of ensuring life cycle of objects of domestic engineering industry are considered. The analysis of some actual directions of development according to state programs of development is carried out. On the example of introduction of measuring and computing technologies based on phasechronometric method possibilities of the solution of problems of monitoring, an assessment of technical condition of the equipment and the tool, the degradation processes in constructional materials, definitions of early origin of defects are shown. Economic calculations of introduction of similar technology are given in machine-tool construction.

Характерная для настоящего времени острота проблемы обеспечения жизненного цикла объектов отечественной техники, их ресурса отнюдь не убывает. Наряду с очевидными причинами сложившейся ситуации, относящейся к материальной сфере (физический износ, деграция конструкционных материалов, недостаточное обеспечение процесса замены исчерпывающих свой

ресурс объектов новыми), время высвечивает и другие — глубинные. Они в большей мере относятся к области идей, методологии. Чтобы пояснить это, достаточно обратиться к событиям середины минувшего века, к 30–40 гг., то есть к периоду господства в нашей науке философского диктата. Тогда в результате гонения на генетику и кибернетику, на её отечественных лидеров науке нашей

страны был нанесен значительный ущерб. В частности, удар по отечественной кибернетике обернулся для страны заметным отставанием в области создания вычислительной техники.

Между тем, уровень и результаты разработок электронно-вычислительных машин (ЭВМ) в те годы (академики В.П. Глушков, С.А. Лебедев и др.), по меньшей мере, не уступали зарубежным, о чем свидетельствовал и сам Норберт Винер — основоположник современной кибернетики (её истоки восходят ещё к Амперу (1775–1836), а отчасти и к Платону (428 (7) г. до н.э. — 348 (7) г. до н.э.). Более того, наследием тех лет, своего рода «родовой травмой», явилось резкое ограничение содержания понятия «машина» необходимостью наличия в устройстве механических конструктивных элементов. Поэтому в самой методологической первооснове нарушается глубинная, все более отчетливо проявляющаяся органичная связь между машиной и прибором.

В отличие от создаваемой человечеством техносферы в живой природе развитие следует законом самоорганизации при наличии естественного отбора. О достигнутом природой совершенстве, пока явно превосходящем результаты научно-технического прогресса, свидетельствуют факты.

Так, физико-механические параметры применяемых в технике конструкционных материалов известны, как правило, с точностью до 3–4 значащих цифр, а химическим реакциям, обеспечивающим межклеточный обмен веществ в живом организме, соответствует не менее 6–7 значащих цифр. Частота ошибок при ДНК-репликациях у бактерий не превышает 10^{-9} – 10^{-10} . Это объясняется не только родством формирующих молекулу ДНК её структурных элементов — нуклеотидов, но и активной ролью других структурных элементов ДНК — полимераз. Именно они способны распознавать ошибку при реализации генетического кода и исправлять её. Тем самым гарантируется сохранность биологического вида. Между тем, относительные погрешности средств контрольно-измерительной техники составляют 1–0,01%.

Очевидна необходимость дальнейшего совершенствования средств и методов оценки и прогнозирующего мониторинга технического состояния машин и механизмов.

С точки зрения метрологии наибольшей точностью обладают измерения времени и частоты. Погрешность измерения интервалов времени в промышленных условиях эксплуатации составляет не более $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ с, что соответствует, например, для металлорежущего станка относительной погрешности $\pm 1 \cdot 10^{-5}\%$ от номинального периода частоты шпинделя при резании (1500 об/мин). Особенностью реализации подобных измерительных комплексов и систем является возможность

привязки хронометрических методик к Государственным поверочным схемам средств измерений времени и частоты.

В основе подхода лежат измерения интервалов времени, соответствующих повторяющемуся заданному перемещению элемента или элементов механизма. Точность измерений фазохронометрическим методом обеспечивается фундаментальными достижениями хронометрии, что позволяет иметь высокую чувствительность к недоступным ранее переходным процессам, деградиационным изменениям в материале на новом метрологическом уровне на ранних стадиях их появления.

Применение фазохронометрического подхода способно обеспечить измерительно-вычислительный прогнозирующий мониторинг технического состояния генерирующего и вспомогательного оборудования для его аварийной защиты путем своевременного отключения. Время — одно из наиболее многоплановых понятий.

Внедрение измерительно-вычислительных технологий на базе фазохронометрического метода обладает целым рядом технологических преимуществ и открывает возможности диагностирования в процессе эксплуатации металлообрабатывающего оборудования и инструмента. На данный момент уже реализованные и продолжающиеся НИР и ОКР обеспечивают решение таких практических задач, как:

- оценка текущего технического состояния металлорежущих станков токарной группы различной компоновки;
- оценка технического состояния узлов, таких как главный привод, коробка передач, двигатель, мотор-шпиндель, включая вспомогательное оборудование;
- оценка износа и поломок режущего инструмента в процессе резания без останова оборудования;
- повышение экономичности, энергоэффективности и надежности эксплуатируемого металлорежущего оборудования.

Актуальность данного научного направления определяется в соответствии с направлениями развития отечественной промышленности, в том числе подпрограммой «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности на 2011–2016 годы» Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 гг., Государственной программой Российской Федерации «Развитие судостроения на 2013–2030 годы», «Стратегией развития Российских железных дорог до 2030 года», для решения следующих задач по:

- разработке и подготовке серийного производства конкурентоспособных импортозамещающих средств машиностроительного производ-

ства в части обеспечения диагностирования механообрабатывающего оборудования и инструмента, необходимых для технологического перевооружения российских стратегических машиностроительных организаций;

- созданию новых видов измерительного оборудования, в том числе специализированных средств измерения размеров, формы и параметров качества поверхности, обеспечивающих производство прецизионного механообрабатывающего оборудования и инструмента;
- обеспечению технологического перевооружения организаций российского машиностроения и процесса постоянного воспроизводства и совершенствования применяемых ими технологий производства;
- повышению конкурентоспособности отечественной промышленности;
- созданию уникальных информационных производственных технологий на новом метрологическом уровне;
- созданию опережающего научно-технического задела, отработке перспективных и прорывных критических технологий в машиностроении;
- созданию нового перспективного ряда продукции и модернизации существующего.

Применение фазохронометрического метода: определенным углом поворота вращающегося шпинделя станка (или его циклических элементов) соответствуют регистрируемые моменты времени t_i .

Равномерному (идеальному) вращению детали соответствуют углы поворота $\Delta\theta = \frac{2\pi}{N}$ и интервалы времени $\Delta t_n \left(\Delta t_n = \frac{2\pi}{\Omega_n N} \right)$. Возмущенному неравномерному (реальному) режиму вращения, вызванному влиянием внешней электрической сети, погрешностями оборудования, неравномерностью сил реза-

ния, сейсмическими воздействиями и т.п., соответствуют временные интервалы $\Delta t_i (\Delta t_i = t_i - t_{i-1})$. В вариациях интервалов $\delta\Delta t_i (\delta\Delta t_i = \Delta t_i - \Delta t_n)$ содержится информация о техническом состоянии машин и механизмов.

Использование подобных подходов расширяет возможности в решении задач:

- диагностирования технического состояния металлорежущего оборудования, включая элементы их конструкции, такие как мотор-шпиндель, электродвигатель, коробка передач, подшипники качения;
- мониторинга и оценки фактического состояния износа режущего инструмента в процессе обработки без снятия детали;
- контроля размеров и качества поверхности изготавливаемых деталей в процессе обработки.

Данная технология уже прошла апробацию на нескольких типах токарных станков: Hwacheon Cutex-240 В SMC (пр-во Южная Корея, ЧПУ Siemens Sinumerik 808D), УТ16П (пр-во Россия), 16K20Ф (модернизированный станок с ЧПУ Flex NC, пр-во Россия), G.D.W. 240 CNC (пр-во Германия, ЧПУ Heidenhain).

На рис. 1 и 2 приведена реализация системы для станков Hwacheon Cutex-240 В SMC и G.D.W. 240 CNC.

Математическое моделирование — одна из основных составляющих фазохронометрического метода. В процессе обработки результатов измерений выполняют уточнение величин параметров, входящих в математические модели, на соответствие текущему техническому состоянию машины, а затем по результатам имитационного моделирования с использованием уточненных моделей и с последующей математической обработкой определяют величины диагностируемых параметров и



Рис. 1. Установка измерительных датчиков фазохронометрической системы на станках:

а — установка измерительного датчика на станке G.D.W. 240 CNC;

б — установка измерительного датчика на станке Hwacheon Cutex-240 В SMC



Рис. 2. Общий вид измерительной фазохронометрической системы для станка G.D.W. 240 CNC

возможных дефектов машины, по ним оценивают текущее техническое состояние машины.

Это последовательность общих приемов действий ФХМ, которые необходимо каждый раз творчески применять с индивидуальными нюансами реализации для диагностирования конкретных типов циклических машин.

На рис. 3 приведен пример получения диагностической информации.

Сравнительный анализ (рис. 3) показывает одинаково «рваный» характер обработки данного материала ШХ15 режущей пластиной Т15К6. Отличие в результатах математического моделирования и эксперимента связаны с отличием реальных условий измерений и математического моделирования.

Сравнительный анализ спектров собственных частот приведен в таблице. Спектр собственных частот результатов измерений показан на рис. 4.

Сравнительный анализ спектров показывает наличие близких частот

Экспериментальные значения собственных частот, Гц	Расчетные значения собственных частот моделирование, Гц	Относительная погрешность, %
4,245	4,37	2,8
8,683	8,81	1,4

На рис. 5 показан пример диагностирования с помощью информационно-измерительного комплекса фазохронометрическим методом дефекта подшипника токарного станка 16К20Ф (ЧПУ Flex NC) в процессе работы.

Измерительно-вычислительная технология на базе фазохронометрического метода открывает новые возможности мониторинга процессов амор-

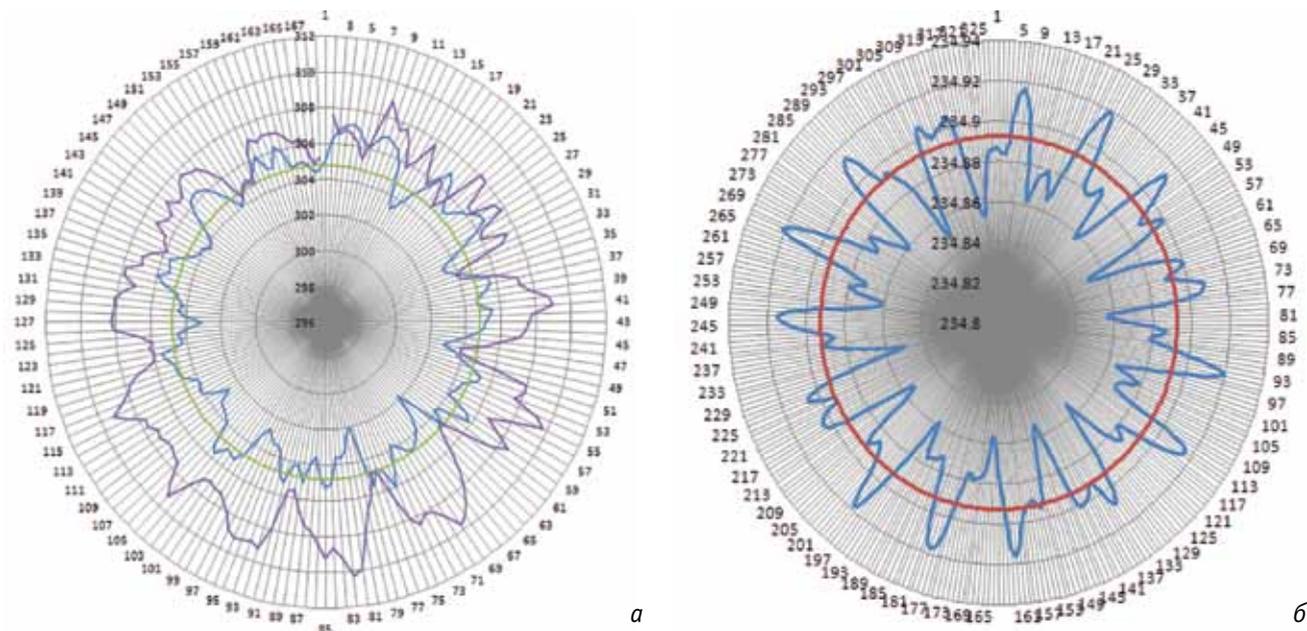


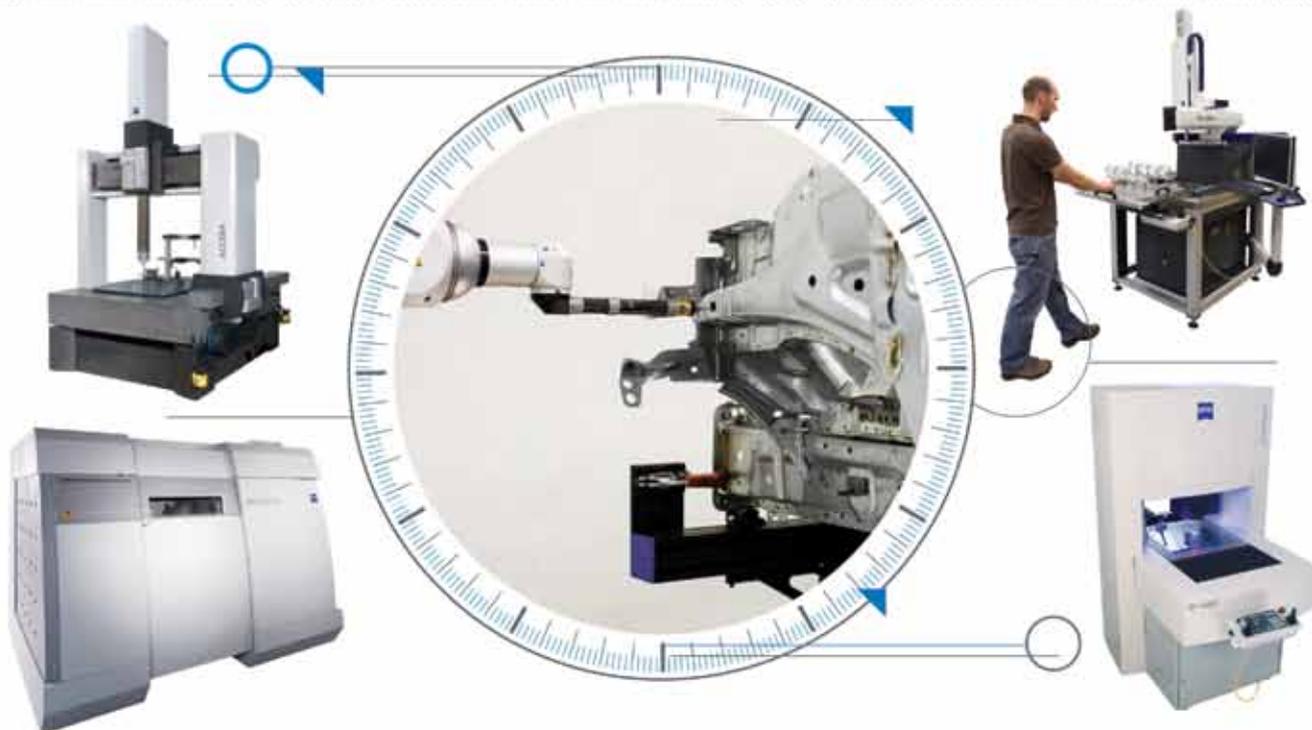
Рис. 3. Сравнение диагностической информации по результатам эксперимента и математического моделирования:
 а — экспериментальная хронограмма (измерение): хронограмма вращения шпинделя станка УТ16П в полярных координатах, резание, скорость вращения 315 об/мин, $s = 0,045$ мм/об, $t = 0,5$ мм, материал заготовки ШХ15, режущая пластина из сплава Т15К6;
 б — расчетная хронограмма (моделирование): хронограмма вращения шпинделя станка УТ16П в полярных координатах, резание, скорость вращения 315 об/мин, $s = 0,045$ мм/об, $t = 0,5$ мм, материал заготовки ШХ15, режущая пластина из сплава Т15К6



We make it visible.

ОПТЭК
Объединяя решения

Решения Carl Zeiss для промышленной метрологии. Координатные измерительные машины



Компания ОПТЭК, эксклюзивный дистрибьютор ZEISS в России и странах СНГ, предлагает предприятиям широкий ассортимент координатных измерительных машин (КИМ) для решения задач контроля геометрических параметров продукции, измерения инструмента и приспособлений.

Типы измерения: тактильное, оптическое, лазерное сканирование, – можно совмещать в одной измерительной машине и одной системе координат. Также мы предлагаем решения в области метрологической томографии для измерения недоступных элементов методом неразрушающего контроля.

ЛИНЕЙКА ОБОРУДОВАНИЯ:

- » Лабораторные портальные машины
- » Цеховые машины
- » Стоечные измерительные машины
- » Крупногабаритные измерительные машины (до 10 м)
- » Метромотографы
- » Двухсенсорные машины тактильно-оптического контроля

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- » Автомобильная промышленность
- » Авиакосмическая промышленность
- » Машиностроение
- » Приборостроение
- » Производство протезов и медицинского оборудования
- » Обучение специалистов в технических университетах

Объемная погрешность начиная от $0,3 + L/1000$ мкм
Измерительный диапазон до 6000 x 11000 x 3500 мм (Ш x Д x В)

8-800-2000-567
www.optecgroup.com

Не является рекламой.

ОПТЭК более 20 лет поставляет измерительное оборудование ZEISS предприятиям различного типа. Мы предлагаем комплексные решения для любой измерительной задачи, включая поставку и монтаж оборудования, техническое обслуживание, разработку измерительных программ.

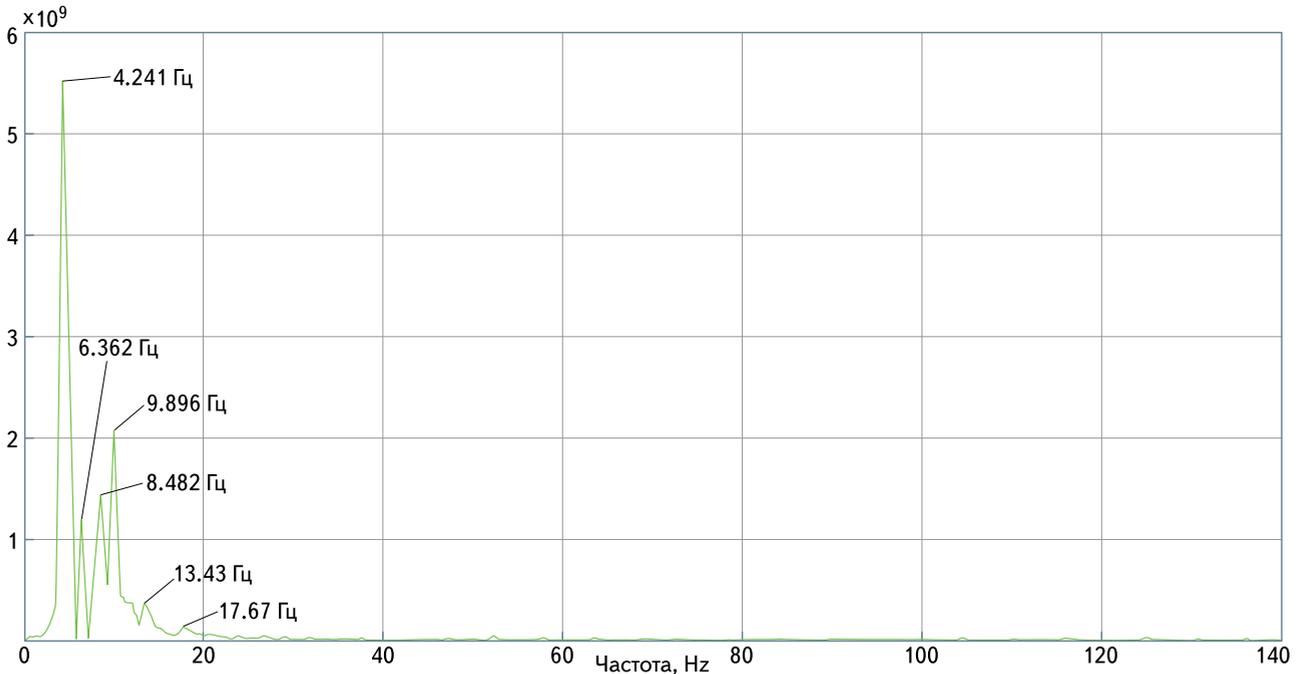


Рис. 4. Спектр собственных частот, полученный из результатов измерений



Рис. 5. Экспериментальная хронограмма с дефектом и без дефекта перекоса колец подшипника шпинделя:

а — экспериментальная хронограмма вращения шпинделя: хронограмма вращения шпинделя станка 16К20Ф (модернизированный станок с ЧПУ Flex NC) **без дефекта**;
 б — экспериментальная хронограмма вращения шпинделя: хронограмма вращения шпинделя станка 16К20Ф (модернизированный станок с ЧПУ Flex NC) **с дефектом**

тизации и оценки технического состояния оборудования и инструмента, деградиционных процессов в конструкционных материалах, определения раннего зарождения дефектов и т.п.

На рис. 6 приведено экономическое соотношение затрат в общей стоимости технической реализации проекта. Основную стоимость составляет наукоемкая часть, то есть интеллектуальная составляющая. Материальные затраты составляют не более 20%. Общий вид информационно-измерительного комплекса на базе фазохронометрического метода приведен на рис. 7.

Измерительный фазохронометрический метод открывает также возможности для решения таких задач, как:

- измерение параметров вращения асинхронного двигателя или мотор-редуктора;
- измерение износа зубчатых колес коробки скоростей;
- измерение параметров и исследование процесса резания (датчики со стороны задней бабки);
- измерение параметров обработки заготовки и износа режущего инструмента (датчики в соответствующих сечениях заготовки).

ВЫВОДЫ

Измерительно-вычислительная технология на базе фазохронометрического метода открывает новые возможности мониторинга процессов амортизации и оценки технического состояния оборудования и инструмента, деградиционных процессов в конструкционных материалах, определения раннего зарождения дефектов, в перспективе может обеспечить решение таких задач, как:

- оценка текущего технического состояния металлорежущих станков;
- определение оптимальных с технологической точки зрения режимов резания;

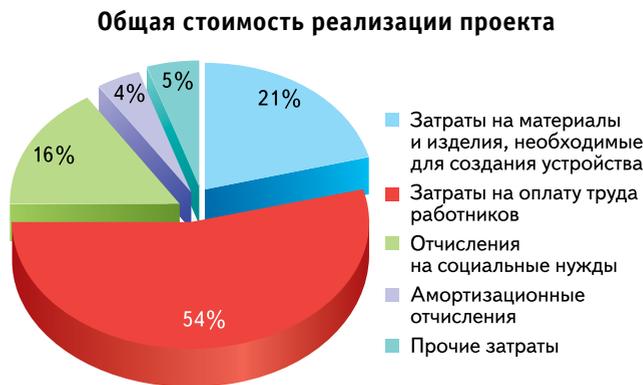
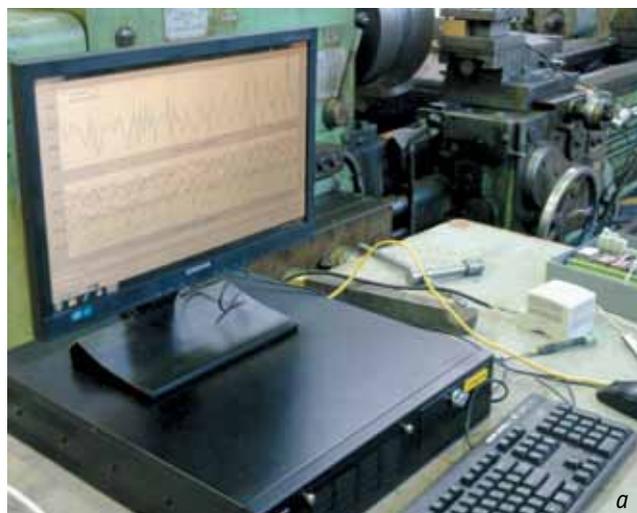


Рис. 6. Соотношение затрат в общей стоимости технической реализации проекта

- оценка технического состояния узлов, вспомогательного оборудования;
- оценка износа и поломок режущего инструмента в процессе работы станка;
- повышение экономичности и надежности эксплуатируемого металлорежущего оборудования. Стоимость создания с учетом разработки подобной системы не превышает 25% стоимости металлорежущего станка, а стоимость серийного образца не более 10%. Вместе с тем, срок окупаемости не превысит одного года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советский энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия. 1979. 1600 с. с ил.
2. Киселев М.И. Особенности информационного обеспечения жизненного цикла объектов машиностроения в связи с ужесточением требований к их качеству // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 6. С. 2—9.



Рис. 7. Общий вид информационно-измерительного комплекса на базе фазохронометрического метода:
а — блок обработки информации;
б — измерительный блок

3. *Киселев М.И.* Прогнозирование техногенных катастроф: применение фазохронометрического подхода // Стандарты и качество. 2013. № 10. С. 56–59.
4. *Комшин А.С., Сырицкий А.Б.* Измерительно-вычислительные технологии эксплуатации металлорежущего оборудования и инструмента // Мир измерений. 2014. № 12. С. 3–9.
5. *Комшин А.С., Потапов К.Г., Сырицкий А.Б.* Оценка технического состояния станка УТ16П фазохронометрическим методом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2013. № 2. — Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/532755.html> (дата обращения 06.02.2013).
6. *Потапов К.Г., Сырицкий А.Б.* Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // Приборы. 2014. № 5. С. 18–22.
7. *Потапов К.Г., Сырицкий А.Б.* Оценка износа резца на основе измерения неравномерности вращения шпинделя токарного станка // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 4 (31). С. 107–112.
8. *Комшин А.С.* Метрологическое обеспечение измерения параметров конструкционных материалов в процессе эксплуатации в машиностроении // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. № 6. С. 2–7.
9. Патент № 2561236 от 30.12.2013. Способ диагностирования циклических машин — металлорежущих станков фазохронометрическим методом // [А.С. Комшин и др.]. Заявка 2013158894/28, 30.12.2013. Опубликовано: 27.08.2015. Бюллетень № 24.

Михаил Иванович КИСЕЛЕВ —

доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость», научный руководитель научно-образовательного центра «Прецизионное метрологическое обеспечение машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Александр Сергеевич КОМШИН —

кандидат технических наук, доцент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость», ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Прецизионное метрологическое обеспечение машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Антони Борисович СЫРИЦКИЙ —

ассистент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость», руководитель лаборатории научно-образовательного центра «Прецизионное метрологическое обеспечение машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Стерлитамакские станкостроители и создатели авиационных моторов планируют расширять сотрудничество

Представители НПО «Сатурн» (г. Рыбинск) и инструментальных предприятий из Рыбинска и Перми провели деловую встречу со стерлитамакскими станкостроителями из НПО «Станкостроение» и Группы «Стан». Итогом прошедших переговоров стало решение о расширении сотрудничества, сообщили в пресс-службе рыбинского предприятия, В частности, были проведены переговоры по расширению сотрудничества при производстве и поставке на отечественный рынок высокотехнологичной продукции: моноколес, лопаток, дисков и корпусов авиационных моторов. На НПО «Сатурн» на сегодняшний день эксплуатируется большое количество разнообразного оборудования, поставленного стерлитамакскими станкостроительными предприятиями. Станкостроителям была дана возможность ознакомиться с тем, как оно используется непосредственно в цехах.

Станкостроители заверили рыбинцев, что обязуются полностью соответствовать заданному уровню и поставить оборудование, в том числе новые шлифовальные станки, фрезерные станки по металлу, которое будет, как минимум, не хуже, а по ряду направлений лучше в сравнении с приобретаемым импортным оборудованием. Стерлитамаковцы сообщили также, что планируют увеличить объем поставок металлообрабатывающего оборудования, а также провести модернизацию станков, поставленных в период 2005—2008 гг.



www.ostankah.ru