



Ключевые слова:
токарная обра-
ботка, диагностика,
фазохронометри-
ческий метод

АПРОБАЦИЯ ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

**Антони СЫРИЦКИЙ, Константин ПОТАПОВ,
Дмитрий БОЛДАСОВ, Никита ЛАЗАРЕВ, Александр КОМШИН**

Описан процесс получения фазохронометрического портрета токарного станка LITZLTC 15TS. Рассмотрены особенности различных режимов работы станка в фазохронометрическом представлении: холостой ход, точение, переходный процесс.

Несмотря на большой интерес к проблемам диагностики технического состояния токарных станков, проблема контроля и прогнозирования выхода из строя отдельных элементов привода станка является актуальной. В литературных источниках и патентах можно найти не менее десятка методов диагностики, основанных на измерении различных параметров процесса резания или работы токарного станка. Наиболее детально описан метод вибрационной диагностики, который позволяет выявлять отклонения от нормального функционирования станка, как в процессе работы станка, так и в процессе тестирования оборудования на холостом ходу. Однако не секрет, что любым методам диагностики присущи отдельные сложности, а в ряде случаев и недостатки [1]. Это может быть как высокая цена измерительного канала системы диагностики, так и относительно низкая точность измерений и прочие тонкости.

Важность создания подобных систем определяется также фундаментальным принципом: выход из строя инструмента обязательно приведет к отказу всей технологической системы [2, 3]. Исследования в области диагностики состояния инструмента [4] показывают, что 20% времени внепланового простоя оборудования вызваны поломкой инструмента.

Кроме потерь от простоя, износ инструмента может привести к ухудшению качества поверхности

и даже выходу размера обрабатываемой заготовки за поле допуска. При использовании систем мониторинга состояния инструмента риск возникновения брака по этим признакам снижается. При обработке таких труднообрабатываемых материалов, как титановые сплавы, необходимость контроля состояния инструмента имеет решающее значение.

Титан имеет хорошее сочетание легкости и прочности, которое сохраняется даже при высоких температурах, и исключительную коррозионную стойкость. Эти его характеристики были главной причиной широкого распространения в промышленности. Основное применение титан нашел в авиакосмической промышленности (как в двигателестроении, так и в производстве корпусов летательных аппаратов). Также, преимущественно благодаря своим выдающимся прочностным свойствам, титан применяется, например, при изготовлении лопаток паровых турбин и суперпроводников, в ракетостроении, его коррозионная стойкость нашла применение в кораблестроении, химической и нефтехимической промышленности, биомедицине и т.д.

Однако, несмотря на высокую применимость титана, он является дорогим материалом в сравнении с большинством других из-за трудности в выплавке и производстве заготовок. С другой стороны, высокая стоимость компенсируется долгим сроком службы и его характеристиками [5].

Согласно [6] при обработке ответственных деталей из титана:

- необходимо контролировать скорость резания, подачу и износ по задней поверхности на чистовых проходах;
- поломка инструмента на чистовой операции может стать причиной повреждения поверхности детали;
- участки сопряжения на инструменте являются концентраторами напряжения.

Процесс резания может повлиять на качество поверхности детали, что при эксплуатации приведет к деформации тонкостенных элементов или к снижению усталостной прочности ответственных вращающихся деталей (дисков/валов).

Однако, несмотря на высокую актуальность, обусловленную вышеприведенными факторами, на сегодняшний день проблема создания эффективной системы мониторинга износа инструмента не решена. Отсутствие инженерных решений, прошедших глубокое внедрение в промышленности, в данной области обуславливается недостатками существующих методов. Их принято разделять на прямые и косвенные [7]. Прямые методы непосредственно позволяют измерять параметры износа при помощи контактных или бесконтактных (в основном оптических) способов. Такой подход затруднительно реализовать непосредственно в процессе резания, так как при этом необходимо останавливать обработку, что ведет к увеличению операционного времени и, следовательно, к снижению производительности. Большей эффективностью обладают косвенные методы, включающие измерение различных физических параметров, коррелированных с состоянием инструмента. Известны описания методов диагностики на основе измерения силы резания, мощности, потребляемой двигателем, анализа качества обработанной поверхности, траектории оси шпинделя станка, химического анализа поверхности инструмента, методы вибро- и виброакустической диагностики, а также всевозможные комбинации различных методов, например, метод на основе анализа виброакустического сигнала в совокупности с измерением температуры в зоне резания [8]. Тщательный анализ этих методов в отдельности приводит к заключению, что каждый из них имеет существенные недостатки, которые препятствуют повсеместному внедрению того или иного подхода к мониторингу состояния инструмента в производственный процесс.

Так, например, методу вибродиагностики свойственны проблемы с установкой первичных преобразователей. В частности, датчик должен быть установлен таким образом, чтобы все стыки, разделяющие зону резания и место установки акселерометра, были неподвижны. При этом часть

информации неизбежно теряется, и вероятна ситуация, когда именно она содержала данные о состоянии режущего инструмента [9]. В качестве сложностей при реализации метода, основанного на измерении силы резания, указывается непопулярность установки динамометрических приспособлений. Это обуславливается усложнением конструкции станка, снижением универсальности оборудования и возникновением проблем с жесткостью упругой системы и надежностью работы самих устройств.

С целью компенсации недостатков отдельных методов многие исследователи предлагают варианты систем мониторинга, включающие в себя модули измерения нескольких параметров одновременно. Это оправдано с точки зрения получения большего количества информации о процессе обработки, хотя и не лишено недостатков. Большинство подобных систем имеет в своем составе значительное количество датчиков (силы резания, акустической эмиссии, мощности, вибродатчики), что серьезно усложняет установку их на станок и снижает надежность технологической системы. Необходимо особенно отметить дополнительные сложности с параллельной обработкой больших массивов измерительных данных.

Из вышеизложенного следует необходимость поиска альтернативных методов мониторинга инструмента. Применение фазохронометрического метода диагностики для оценки износа инструмента в процессе обработки может явиться таким альтернативным подходом благодаря своим преимуществам относительно «традиционных» методов мониторинга и диагностики.

Метод фазохронометрии (ФХМ) заключается в следующем: рабочий цикл (за который принимается один оборот вала) разбивается на равные интервалы и происходит измерение времени прохождения каждой фазы, тем самым формируется ряд, отражающий нестабильность рабочего цикла [10, 11, 12].

Схема системы представлена на рис. 1. Разбиение рабочего цикла осуществляется с помощью датчика угловых перемещений ЛИР-158А. Аналоговый сигнал с датчика поступает на вход подсистемы оцифровки, где реализована дифференциальная схема измерения, которая позволяет вычлест помехи из сигнала и увеличить его амплитуду. Сигнал проходит фильтр нижних частот (ФНЧ) на основе операционного усилителя ОРА725 (ТИ), а затем попадает на вход аналогового компаратора TLV320 (ТИ), где формируется прямоугольный сигнал. Так как необходимая точность измерений интервалов времени – на уровне c , а на этапе оцифровки возможно искажение сигнала, аналоговая часть не должна вносить погрешность в результат измерения больше, чем на уровне c . Необходимый уровень точности

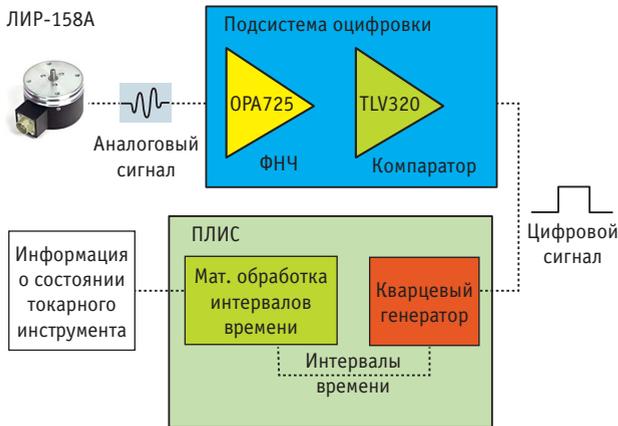


Рис. 1. Принципиальная схема системы

обеспечивается благодаря правильному выбору операционного усилителя и компараторов. Суммарная погрешность от всех компонентов аналоговой платы не превышает с.

Далее сигнал поступает на вход ПЛИС DE0-Nano-SoC (Altera), где с помощью кварцевого генератора (50 МГц) происходит измерение времени между изменениями состояния аналогового компаратора (из логического 0 в логическую 1 и наоборот). Далее измеренные интервалы обрабатываются посредством специального алгоритма, и формируется критерий оценки состояния токарной пластины. Использование ПЛИС на основе SoC (системы-на-кристалле, С-н-К) позволяет поднять файловую систему и реализовать алгоритм обработки информации непосредственно на ПЛИС, без необходимости задействовать одноплатный компьютер (ОК), что уменьшает себестоимость и сложность архитектуры системы, так как исключает разработку алгоритма для управления взаимодействием ПЛИС и ОК.

Для проведения экспериментальных исследований рассматривается выбор токарного инструмента производителя Sandvik, так как этот производитель предоставляет большое количество информации по обрабатываемому материалу, а также результаты исследований по обработке с использованием своего инструмента.

На основании информации о поведении титановых сплавов при обработке резанием было предложено разбить экспериментальные исследования на несколько этапов:

- 1. Первый этап** – снятие фазохронометрического портрета станка (холостой ход, переходные процессы, резание);
- 2. Второй этап** – точение двух титановых заготовок в идентичных условиях для изучения повторяемости показаний фазохронометрической системы;

3. Третий этап – точение титановых заготовок до достижения критического износа токарных пластин.

В данной статье будут описаны результаты первого этапа работы. Исследование фазохронометрических портретов различных токарных станков является важным этапом разработки системы мониторинга процесса точения. Под фазохронометрическим портретом в данном случае можно понимать совокупность особенностей работы станка, выделенных из хронограмм вращения при различных режимах работы (холостой ход, точение, переходные процессы).

Экспериментальные исследования проводились на производственной базе Центра технологии машиностроения ГК «Финвал» с использованием токарного обрабатывающего центра LITZLTC 15TS с мощностью привода до 7,5 кВт и частотой вращения до 6000 об/мин. Выбор данного станка был обусловлен прежде всего удобством разработки и монтажа оснастки фазохронометрической системы. Сама оснастка была разработана методом масштабирования, так как ее конструкция аналогична описанной в ранее опубликованной статье [13]. Вид установки представлен на рис. 2, 3.

Первым этапом проведения экспериментальных исследований стала запись фазохронометрического портрета на холостом ходу станка при различных скоростях вращения (407, 512, 629, 769, 865, 989, 1258, 1538 об/мин). По полученной измерительной информации были построены хронограммы для каждого значения скорости вращения. Для построения хронограмм были взяты интервалы данных по 10 тысяч значений (2 оборота шпинделя). На рисунке 4 представлен результат в виде хронограммы вращения для скорости вращения 629 об/мин.



Рис. 2. Оснастка, установленная на шпиндель станка



Рис. 3. Установка фазохронометрического датчика на станок

Можно отметить повторяемость результатов от оборота к обороту, что свидетельствует о стабильности фазохронометрического портрета стан-

ка и позволяет использовать запись холостого хода станка в качестве данных для сравнения. Это дает возможность реализовать на базе фазохронометрической системы функции по автоматическому определению момента врезания инструмента в заготовку и выхода из нее (прецизионная регистрация времени начала и конца процесса точения).

Также при проведении измерений были зарегистрированы моменты перехода с одной частоты вращения на другую. Наиболее наглядно такой переход отмечен при смене частоты вращения с 1065 на 1256 об/мин, что представлено на рис. 5.

На хронограмме виден небольшой «провал» в интервале 30000–50000 значений. Такое поведение графика можно объяснить следующим: при разгоне шпинделя двигателем в определенный момент времени скорость станка становится выше установленного значения и система ЧПУ выравнивает скорость до необходимого числа оборотов. Данные с подобной детальностью (5 тыс. измерений за оборот) могут быть использованы для оценки

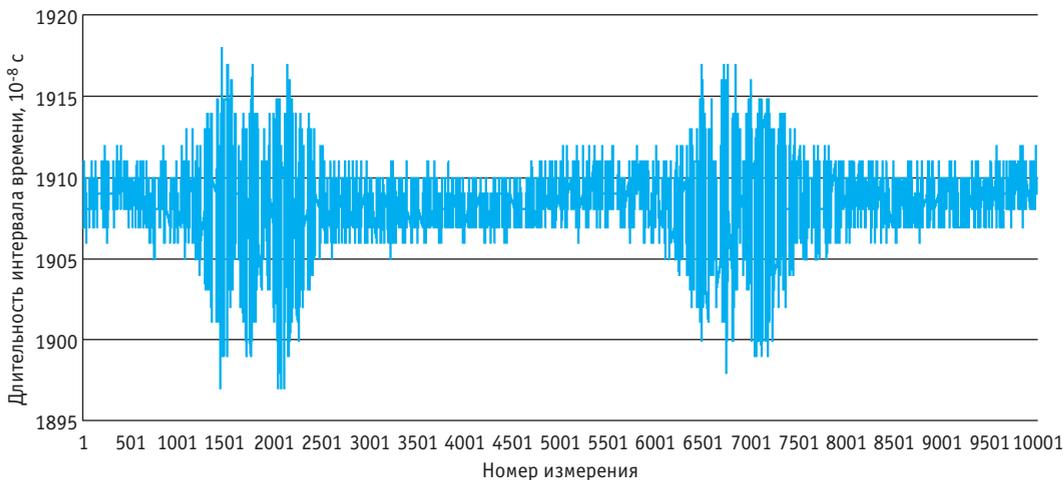


Рис. 4. Хронограмма холостого хода при скорости вращения 629 об/мин

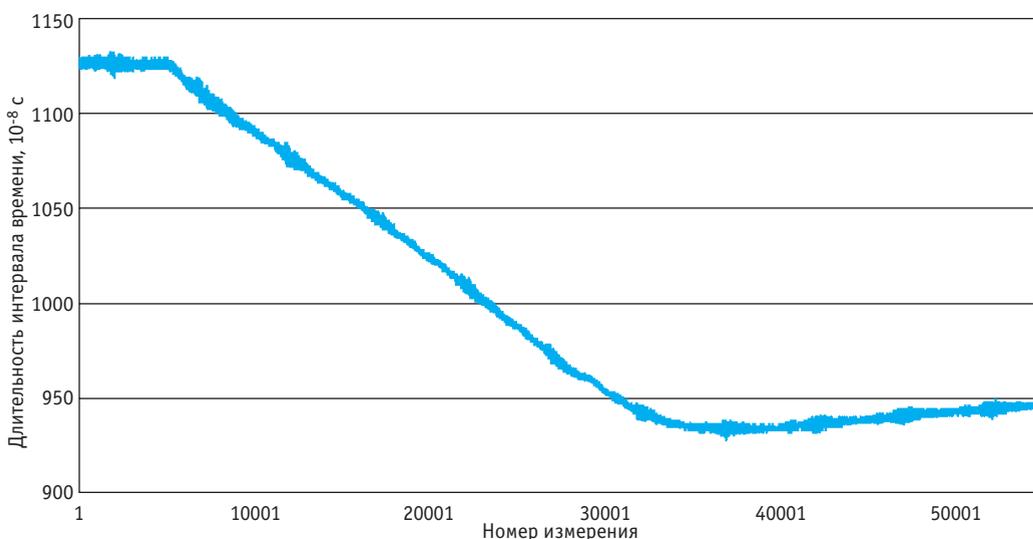


Рис. 5. Хронограмма разгона шпинделя станка

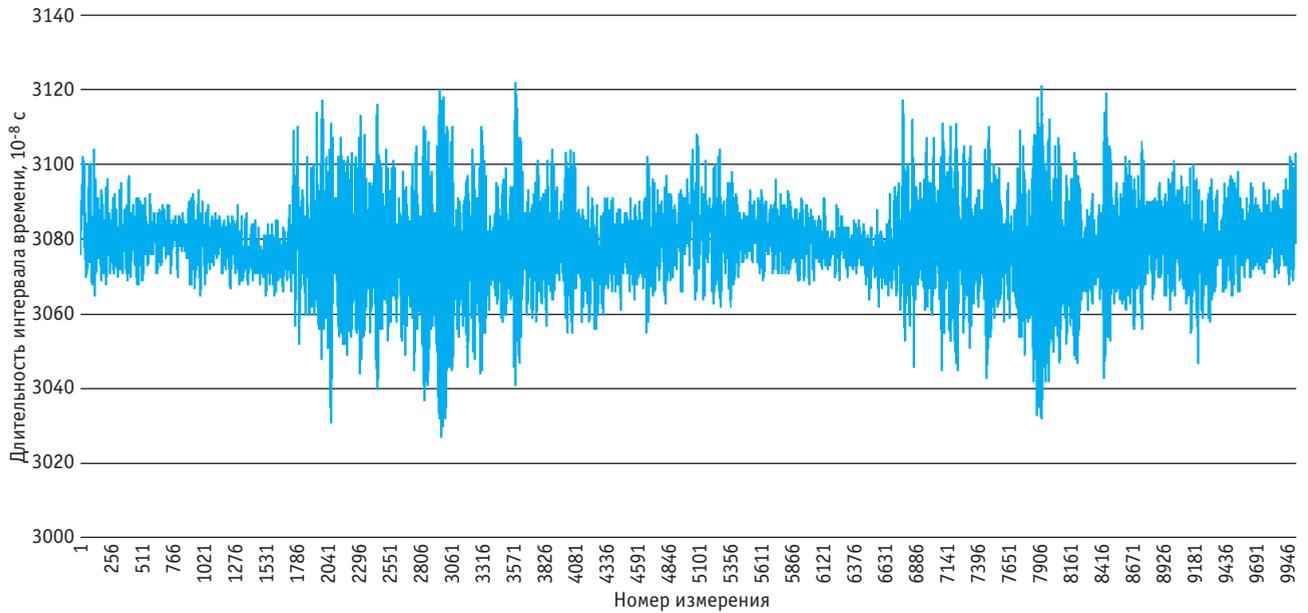


Рис. 6. Хронограмма точения диаметра 32 мм

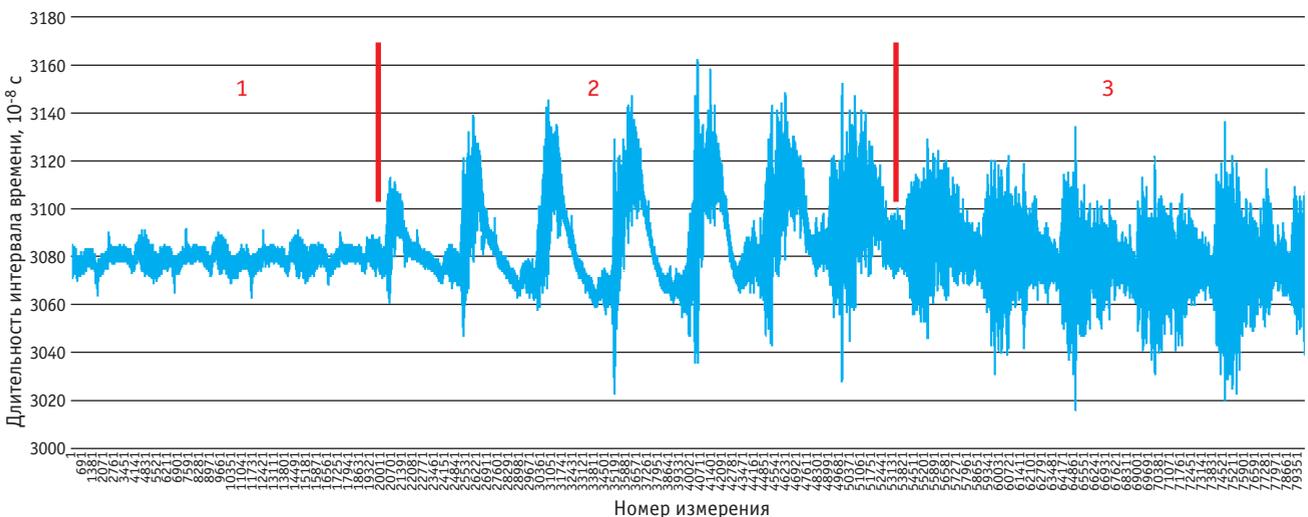


Рис. 7. Хронограмма точения диаметра 20 мм

качества работы пары «привод станка + система ЧПУ».

Далее было проведено продольное точение наружной поверхности цилиндрической заготовки, в качестве материала которой был выбран титановый сплав ВТ6. Выбор данного материала обусловлен тем, что в области обработки титановых сплавов инструментом Sandvik он выступает в качестве эталона обрабатываемости [6], также для этого материала установлено время стойкости различных пластин данного производителя.

Параметры точения и режимы резания:

→ инструмент – сменные пластины типа SNMG 12 04 12- SMR 1115;

- державка – MSBNR2020K12;
- глубина резания – 1 мм;
- подача – 0,4 мм/об;
- скорость резания – 43,5 м/мин.

На рис. 6 представлена хронограмма точения диаметра 32 мм при частоте вращения шпинделя 395,6 об/мин, а на рис. 7 – хронограмма в момент врезания инструмента в заготовку.

Скорость вращения шпинделя отличается лишь для поддержания одинаковой скорости резания, чтобы условия точения были одинаковы. В графиках прослеживается повторяемость и периодичность от оборота к обороту (рис. 6), при этом характер хронограммы сопоставим с затухающими колебаниями.

Периодичность наблюдается и при переходных процессах, таких как врезание в заготовку инструмента (рис. 7). Хронограмму, построенную по 16 оборотам шпинделя, можно разделить на три зоны:

- **зона 1** – холостой ход шпинделя;
- **зона 2** – переходный процесс при врезании инструмента в заготовку;
- **зона 3** – установившееся резание металла.

Из хронограммы можно подсчитать количество оборотов, в течение которых наблюдался переходный период. При перемножении на значение продольной подачи можно оценить длину поверхности, обработанной в условиях нестабильного резания – 2,8 мм. В случае чистового точения этой части детали следует уделить особое внимание при контроле качества поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований представляют комплекс решений, а также являются одним из современных инструментов повышения производительности и энергоэффективности промышленного производства, что приводит к интеллектуализации техники и реализации инженерных решений «Индустрии 4.0».

Контроль технического состояния, диагностика, оптимизация режимов резания труднообрабатываемых материалов способствуют решению целого ряда технологических задач. Измерительная информация является основой повышения качества продукции, конкурентоспособности, реализации программы «Цифровая экономика» и перехода в четвертую промышленную революцию.

Результаты исследований поддержаны в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности НИР 9.4968.2017/БЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ghasempoor A., Moore T. N. and Jeswiet J.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – B. 1998. Vol. 212. P. 105–112. On-line wear estimation using neural networks.
2. **Синопальников В. А., Григорьев С. Н.** Надежность и диагностика технологических систем: Учебник. – М.: Высш. шк., 2005. 343 с.: ил.
3. **Altintas Y.** Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design / 2nd ed. – Cambridge, 2012. 382 p.
4. **Silva R. G., Reuben R. L., Baker K. J. and Wilcox S. J.** Mechanical Systems and Signal Processing. 1998. 12. P. 319–332. Tool wear monitoring of turning operations by neural network and expert system classification of a feature set generated from multiple sensors.
5. **Machado A. R. and Wallbank J.** 1990 Proc Instn Mech Engrs. 1990. Vol. 204. P. 53–59. Machining of Titanium and its Alloys – A Review.
5. **Техническое руководство.** Обработка титана. AB Sandvik Coromant. 2011.12.
6. **Ромашев А. Н.** Классификация способов мониторинга состояния режущего инструмента // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 178–186.
7. **Макаров В. Ф., Шохрин А. В., Потягайло О. Н.** Исследование влияния режима резания и износа режущего инструмента на изменение физических параметров процесса резания на станках с ЧПУ // СТИН. 2010. № 9. С. 30–32.
8. **Козочкин М. П., Сабиров Ф. С.** Аттракторы при резании и перспективы их использования в диагностике // Измерительная техника. 2009. № 2. С. 37–41.
9. **Сырицкий А. Б.** Измерение износа режущего инструмента фазохронометрическим методом в процессе обработки // Измерительная техника. 2016. № 6. С. 30–32.
10. **Сырицкий А. Б., Болдасов Д. Д., Потапов К. Г.** Применение фазохронометрического метода при диагностике металлорежущего оборудования токарной группы // СТИН. 2016. № 1. С. 5–10.
11. **Болдасов Д. Д., Лазарев Н. Ю., Сырицкий А. Б.** Измерительный блок фазохронометрической системы мониторинга процесса токарной обработки // Приборы. 2015. № 10. С. 6–9.
12. **Потапов К. Г., Сырицкий А. Б.** Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // Приборы. 2014. № 5. С. 13–18.

СЫРИЦКИЙ Антони Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н. Э. Баумана

ПОТАПОВ Константин Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н. Э. Баумана

БОЛДАСОВ Дмитрий Дмитриевич – инженер-конструктор, ПАО «Авиационная корпорация «Рубин»

ЛАЗАРЕВ Никита Юрьевич – аспирант, Федеральная политехническая школа Лозанны

КОМШИН Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н. Э. Баумана