

Потапов Константин Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ ОЦЕНКИ
ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЛАВНЫХ ПРИВОДОВ
ТОКАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ
ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

Специальность 05.11.15 - Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана».

Научный **Киселёв Михаил Иванович**

руководитель доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный работник ВШ РФ

Официальные **Телешевский Владимир Ильич**

оппоненты: доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры Измерительные информационные
системы и технологии МГТУ «СТАНКИН»

Серков Николай Алексеевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник Института
машиноведения Российской академии наук

Ведущая Всероссийский научно-исследовательский институт
организация метрологической службы, г. Москва

Защита диссертации состоится 24.12. 2015 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана», по адресу 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru

Телефон для справок: +7 (499)267 09 63

Автореферат разослан «16» кабде 2015 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д212.141.18,

доктор технических наук,

профессор



Цветков Юрий Борисович

Актуальность работы.

Повышение требований к качеству выпускаемой продукции является причиной того, что к современному металлорежущему оборудованию непрерывно ужесточаются требования точности обработки, производительности и надежности. Однако их реализация в полном объеме сдерживается следующими факторами:

- системы диагностики, построенные на амплитудных методах измерения, на сегодняшний день не могут полностью заменить систему планово-предупредительного ремонта (ППР), так как позволяют диагностировать лишь отдельные узлы оборудования. К тому же метрологический уровень применяемых здесь средств измерения недостаточен, а алгоритмы обработки данных сложны;

- заявленные разработчиками металлорежущего оборудования показатели точности часто достигаются только в отдельно взятых операциях для конкретных режимов обработки и конкретного режущего инструмента.

Особо следует выделить автоматические роботизированные линии, которые наиболее чувствительны к отказу оборудования, так как это приводит к большим издержкам производства.

Согласно статистике, около 60 % всех операций по обработке металла приходится на долю токарных работ. Поэтому, по праву, токарные работы по металлу считаются самым востребованным видом механической обработки. При этом высокоточные токарные станки многих крупных производителей, таких как Mazak, DMG, Okuma и др. стоят сотни тысяч евро (долларов) и, соответственно, выход из строя такого оборудования приводит к серьёзным издержкам.

Следует отметить, что большинство разработчиков современных станков с ЧПУ предусматривает в конструкции определённые датчики (датчики крутящего момента, температуры и др.), что позволяет системе ЧПУ отслеживать состояние отдельных элементов станка и выявлять явные сбои в работе. Но проблемы диагностики механической части до конца не решены и представляют большой интерес в плане предупреждения развития дефектов. Поскольку наиболее ответственной частью любого станка является его шпиндель, то наибольший интерес в диагностическом плане представляет главный привод.

Таким образом, можно констатировать тот факт, что данная проблема является актуальной. При этом требуются новые подходы в экспериментальных исследованиях и уточненные методы расчета динамики станков в процессе их эксплуатации.

Цель диссертации заключается в разработке на базе фазохронометрического метода (ФХМ) технических средств и методик, позволяющих с высокой точностью оценивать текущее техническое состояние главных приводов металлорежущих станков токарной группы на этапе эксплуатации, и выявлять зарождающиеся дефекты на ранней их стадии.

Для достижения установленной цели в диссертации были поставлены следующие задачи:

- построение математической модели токарного станка 16К20Ф3 с ЧПУ, связывающей вариации конструктивных параметров его главного привода с вариациями интервалов времени характеризующих неравномерность вращения шпинделя как на холостом ходу, так и в процессе обработки;
- построение принципиальной схемы измерительно-вычислительной системы диагностики технического состояния главных приводов токарных станков на базе ФХМ;
- разработка и создание измерительного модуля фазохронометрической системы (ФХС), его установка на станке 16К20Ф3 с ЧПУ и получение экспериментальных данных;
- выполнение вычислительного эксперимента и верификация математической модели;
- построение алгоритмов идентификации дефектов главного привода токарного станка 16К20Ф3 с ЧПУ;
- установление характера влияния неравномерности вращения шпинделя на качество поверхности обрабатываемой детали;
- оценка погрешностей измерительного модуля ФХС;
- оценка погрешностей вычислительных алгоритмов;
- контроль площади контакта в конусной паре шпинделя.

Методология исследования. В работе использован математический аппарат прикладной метрологии в сочетании с методами теоретической механики, теории колебаний, сопротивления материалов, теории электропривода, моделирования динамических систем и трибологии.

Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных и производственных условиях с использованием современного токарного оборудования с ЧПУ, а также станков предыдущего поколения. Измерения производились современными измерительными средствами на базе радио- и оптоэлектроники. Обработка результатов осуществлялась на персональных компьютерах с применением методов теории обработки результатов многократных измерений, методов теорий случайных сигналов и спектрального анализа, отвечающих требованиям нормативов прикладной метрологии.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Предложена новая методика оценки текущего технического состояния главных приводов токарного оборудования фазохронометрическим методом на примере станка 16К20Ф3, предусматривающая использование одного-двух измерительных каналов на шпинделе для получения информации о непостоянстве фаз рабочих циклов основных элементов кинематической цепи (электродвигатель, передаточные механизмы и шпиндельный узел) с последующем выявлением на основе этой информации фазовых признаков дефектов основных узлов привода.

2. Разработана математическая модель привода металлорежущего станка 16К20Ф3 с двухступенчатой коробкой передач, предусматривающая учёт трения и переменной жёсткости в зубчатом зацеплении, трения и перекосов колец в опорах качения, непостоянства электромеханических характеристик

асинхронного двигателя. Получаемые на выходе модели временные интервалы могут быть использованы для сравнения расчётных и экспериментальных хронограмм.

3. Предложены алгоритмы идентификации отдельных дефектов электродвигателя, передаточных механизмов и шпиндельного узла на основе верифицированной математической модели привода, позволяющей варьировать такие параметры элементов кинематической цепи, как коэффициенты жёсткостей, демпфирования, трения и т.д., и формировать информативные фазовые признаки, которые подлежат выявлению в экспериментальных данных. Декомпозиция измеряемых и вычисляемых интервалов времени осуществляется с помощью следующих инструментов: разность рассматриваемой и опорной хронограмм, автокорреляционная функция (АКФ) и её спектр, смещение оценки математического ожидания рассматриваемой хронограммы относительно опорной. При этом весовой вклад дефекта характеризуется амплитудой в спектре АКФ.

Практическую значимость имеют:

1. Различные варианты оснастки для установки датчика измерительного модуля фазохронометрической системы на станках 16K20Ф3 МГТУ им. Н.Э. Баумана, GDW 250 CNC Раменского приборостроительного завода и Hwacheon Cutex-240 B SMC ГК «Финвал».

2. Рекомендации по использованию результатов измерения ФХС системой ЧПУ станка для более точного регулирования скорости вращения шпинделя на финишных операциях обработки.

При этом штатные цифровые датчики скорости вращения, при их наличии на станке, предоставляют системе ЧПУ менее точную информацию.

3. Рекомендации по выбору размеров и формы наконечников щупов измерителей переходного сопротивления и ёмкости при контроле площади контакта в конусной паре, а также усилия их прижатия к поверхности деталей. Обоснована допустимая величина непостоянства осевого усилия втягивания наружного конуса во втулку для обеспечения ошибок контроля первого и второго опода не более 5 %.

Достоверность результатов. Достоверность полученных научных результатов основывается на корректно произведённых измерениях и обработке их результатов согласно метрологическим нормативам, привязке хронометрических средств и методик к Государственным поверочным схемам средств измерения времени и частоты, на положительных результатах верификации математической модели главного привода токарного станка с ЧПУ 16K20Ф3, на экспериментально и теоретически обоснованных алгоритмах поиска дефектов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2012), Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва, 2013), Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2013), одиннадцатой сессии Международной научной школы

«Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов» (Санкт-Петербург, 2013), Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва, 2014), Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов МИКМУС (Москва, 2014).

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана, приняты к внедрению в центре модернизации машиностроения «МГТУ – Пумори».

На защиту выносятся метод диагностики текущего технического состояния главного привода токарного станка 16K20Ф3 с использованием численных значений параметров, характеризующих качество его работы.

Основные результаты диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах. Из них 7 в рецензируемых научных изданиях, среди которых 3 входят в перечень ВАК РФ, 6 тезисов докладов, отчёт в рамках Государственного контракта № 16.740.11.0710 от 08 июня 2011 г. «Разработка научных основ и технических средств прецизионного измерительного вычислительного сопровождения жизненного цикла машин и механизмов в области станкостроения» и патент №2561236 «Способ диагностирования циклических машин - металлорежущих станков фазохронометрическим методом».

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения по диссертации, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 116 наименований, приложения. Она содержит 186 страниц машинописного текста, 114 рисунков, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, определено её содержание, указаны основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируется сопровождающий развитие человеческой цивилизации научно-технический прогресс с инженерно-физической точки зрения. Приводятся примеры проблем, характерные для ранних стадий реализации технических объектов, и связанные с нестабильностью их конструктивных параметров и рабочих режимов. Подчёркивается важность надёжной работы металлообрабатывающих станков как основы промышленного производства. Акцентируется внимание на том, что для достижения устойчивости процесса обработки и повышении его точности требуется совершенствование информационно-метрологического сопровождения станочного оборудования. Далее рассматриваются этапы развития технической диагностики в станочном производстве. Анализируются существующие на сегодняшний день методы и средства диагностики металлорежущих станков и инструмента.

Проведённый анализ работ в области оценки технического состояния металлорежущего оборудования и инструмента позволил сделать следующие выводы:

а) не существует универсальных методов диагностики, которые позволили бы проводить оценку технического состояния для определённого типа станков;

б) наиболее широко применяющиеся на сегодняшний день амплитудные методы диагностики имеют ограниченную точность, жёсткую привязку к конкретному станку и не отличаются универсальностью;

в) не решены в полной мере задачи диагностики металлорежущего оборудования как целостной системы.

Можно констатировать лишь тот факт, что хорошо отработаны только методики диагностики отдельных узлов.

Таким образом, достоверность современного уровня диагностики требуется повышать, чтобы уверенно вступить в 6-й технологический уклад.

Этой цели служит фазохронометрический метод диагностики циклических машин и механизмов.

Во второй главе последовательно выводятся дифференциальные уравнения, составляющие основу математической модели главного привода токарного станка 16К20ФЗ.

Математическая модель базируется на классической теории динамических систем для многомассовых моделей. В модели учитываются различные факторы, вызывающие неравномерность вращения шпинделя токарного станка, такие как трение и периодические изменения жёсткости в зубчатом зацеплении, трение в подшипниках качения, эксцентриситеты валов, входящих в кинематическую цепь, изменение силы натяжения ремня в ремённой передаче, кромочные эффекты, погрешности углового шага и другое.

Рассмотренные в работе подходы к математическому моделированию приводов металлорежущего оборудования не являются новыми, но имеют одну важную особенность: модель адаптируется под фазохронометрический метод, в результате чего получается более детальной. Такие факторы, как колебание угловых скоростей вращения звеньев кинематической цепи в установившемся режиме, эксцентриситеты валов, трение в узлах и т.п. в обычной практике моделирования, как правило, не учитываются, поскольку только усложняют модель. В данном же случае необходимо стремиться к максимальной детальности, так как диагностическая информация при использовании фазохронометрического метода содержится в малых вариациях интервалов времени, и задача математической модели предоставить различимый отклик, выраженный в единицах измеряемой величины, на незначительные изменения параметров системы.

При составлении модели сделаны следующие допущения:

- распределённые параметры системы заменяются сосредоточенными с массами m_i и моментами инерции J_i ;

- валы считаются невесомыми и имеют жёсткости q_i ;

Динамическая схема указанного выше станка приведена на Рисунке 1.

На Рисунке 1 приняты следующие обозначения:

$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$ – сосредоточенные массы шкивов и зубчатых колёс;

$J_3, J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_n$ – моменты инерции сосредоточенных масс;

k_r – коэффициент демпфирования ремённой передачи;

k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты демпфирования валов привода;

k_{z1}, k_{z2} – коэффициенты демпфирования изгибных колебаний зубьев колёс коробки передач;

q_1, q_2, q_3, q_4 – крутильная жёсткость валов привода;

c_r – жёсткость ремня при растяжении;

c_{z1}, c_{z2} – изгибная жёсткость зубьев в передаче.

Под заготовкой на схеме понимается часть шпинделя, включающая патрон и обрабатываемую заготовку.

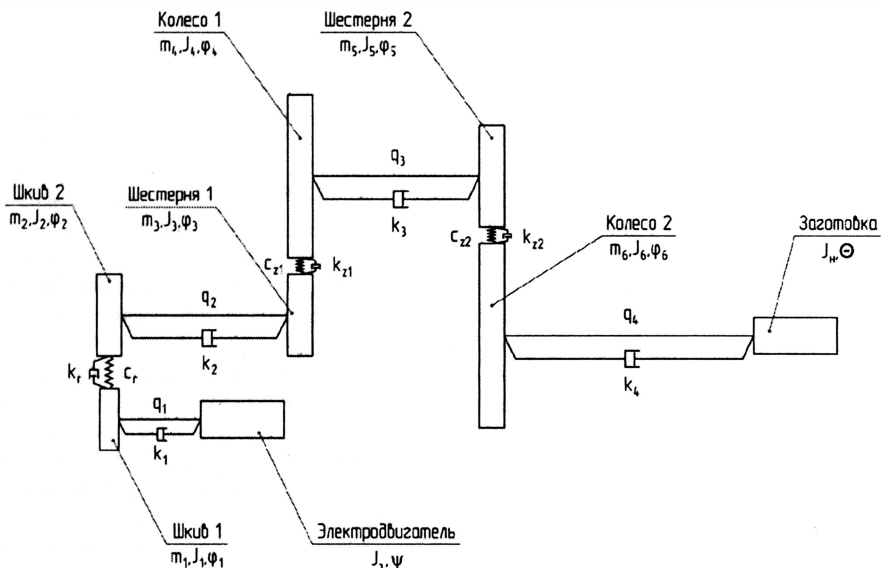


Рисунок 1. Динамическая схема привода с двухступенчатой коробкой передач

Уравнения динамики дополняются уравнениями Парка-Горева для асинхронной машины.

Математическая модель электромеханической части привода в конечном итоге имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \Psi_x(t) + R_s \frac{(L_r + l_r) \cdot \Psi_x(t) - M \cdot \Psi_y(t)}{\sigma \cdot ((L_s + l_s) \cdot (L_r + l_r))} - \omega_c \cdot \Psi_y(t) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_y(t) + 2E_r + R_s \frac{(L_r + l_r) \cdot \Psi_y(t) - M \cdot \Psi_x(t)}{\sigma \cdot ((L_s + l_s) \cdot (L_r + l_r))} + \omega_c \cdot \Psi_x(t) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_x(t) + R_r \frac{(L_s + l_s) \cdot \Psi_x(t) - M \cdot \Psi_y(t)}{\sigma \cdot ((L_s + l_s) \cdot (L_r + l_r))} - \left(\omega_c - p \cdot \left(\frac{d}{dt} \psi(t) \right) \right) \cdot \Psi_y(t) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_y(t) + R_r \frac{(L_s + l_s) \cdot \Psi_y(t) - M \cdot \Psi_x(t)}{\sigma \cdot ((L_s + l_s) \cdot (L_r + l_r))} + \left(\omega_c - p \cdot \left(\frac{d}{dt} \psi(t) \right) \right) \cdot \Psi_x(t) = 0$$

$$\begin{aligned}
& J_s \cdot \frac{d^2}{dt^2} \psi(t) + k_s \cdot \frac{d}{dt} \psi(t) + k_1 \cdot \left(\frac{d}{dt} \psi(t) - \frac{d}{dt} \varphi_1(t) \right) + q_1 \cdot (\psi(t) - \varphi_1(t)) = \\
& = \frac{3}{2} \cdot \frac{p \cdot M}{\sigma \cdot ((L_s + l_s) \cdot (L_r + l_r))} (\Psi_y(t) \cdot \Psi_x(t) - \Psi_y(t) \cdot \Psi_x(t)) \\
& J_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_1(t) + k_1 \cdot \left(\frac{d}{dt} \varphi_1(t) - \frac{d}{dt} \psi(t) \right) + K_{R1}(t) \cdot \left(r_{1w} \frac{d}{dt} \varphi_1(t) - r_{2w} \frac{d}{dt} \varphi_2(t) + \frac{d}{dt} \varepsilon_1(t) \right) + \\
& + q_1 \cdot (\varphi_1(t) - \psi(t)) + C_{R1}(t) \cdot (r_{1w} \cdot \varphi_1(t) - r_{2w} \cdot \varphi_2(t) + \varepsilon_1(t)) = -M_{Gb1}(t) \\
& J_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_2(t) + k_2 \cdot \left(\frac{d}{dt} \varphi_2(t) - \frac{d}{dt} \varphi_3(t) \right) + K_{R2}(t) \cdot \left(r_{2w} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_2(t) - r_{1w} \frac{d}{dt} \varphi_1(t) - \frac{d}{dt} \varepsilon_1(t) \right) + \\
& + q_2 \cdot (\varphi_2(t) - \varphi_3(t)) + C_{R2}(t) \cdot (r_{2w} \cdot \varphi_2(t) - r_{1w} \cdot \varphi_1(t) - \varepsilon_1(t)) = -M_{Gb2}(t) \\
& J_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_3(t) + k_2 \cdot \left(\frac{d}{dt} \varphi_3(t) - \frac{d}{dt} \varphi_2(t) \right) + K_{Z1}(t) \cdot \left(r_{1b} \frac{d}{dt} \varphi_3(t) - r_{2b} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_4(t) + \frac{d}{dt} \varepsilon_2(t) \right) + \\
& + q_2 \cdot (\varphi_3(t) - \varphi_2(t)) + C_{Z1}(t) \cdot (r_{1b} \cdot \varphi_3(t) - r_{2b} \cdot \varphi_4(t) + \varepsilon_2(t)) = -M_{Gb3}(t) \\
& J_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_4(t) + k_3 \cdot \left(\frac{d}{dt} \varphi_4(t) - \frac{d}{dt} \varphi_5(t) \right) + K_{Z2}(t) \cdot \left(r_{2b} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_4(t) - r_{1b} \frac{d}{dt} \varphi_3(t) - \frac{d}{dt} \varepsilon_2(t) \right) + \\
& + q_3 \cdot (\varphi_4(t) - \varphi_5(t)) + C_{Z2}(t) \cdot (r_{2b} \cdot \varphi_4(t) - r_{1b} \cdot \varphi_3(t) - \varepsilon_2(t)) = -M_{Gb4}(t) \\
& J_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_5(t) + k_3 \cdot \left(\frac{d}{dt} \varphi_5(t) - \frac{d}{dt} \varphi_4(t) \right) + K_{Z3}(t) \cdot \left(r_{3b} \frac{d}{dt} \varphi_5(t) - r_{4b} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_6(t) + \frac{d}{dt} \varepsilon_3(t) \right) + \\
& + q_3 \cdot (\varphi_5(t) - \varphi_4(t)) + C_{Z3}(t) \cdot (r_{3b} \cdot \varphi_5(t) - r_{4b} \cdot \varphi_6(t) + \varepsilon_3(t)) = -M_{Gb5}(t) \\
& J_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \varphi_6(t) + k_4 \cdot \left(\frac{d}{dt} \varphi_6(t) - \frac{d}{dt} \Theta(t) \right) + K_{Z4}(t) \cdot \left(r_{4b} \cdot \frac{d}{dt} \varphi_6(t) - r_{3b} \frac{d}{dt} \varphi_5(t) - \frac{d}{dt} \varepsilon_3(t) \right) + \\
& + q_4 \cdot (\varphi_6(t) - \Theta(t)) + C_{Z4}(t) \cdot (r_{4b} \cdot \varphi_6(t) - r_{3b} \cdot \varphi_5(t) - \varepsilon_3(t)) = -M_{Gb6}(t) \\
& J_n \cdot \frac{d^2}{dt^2} \Theta(t) + k_4 \cdot \left(\frac{d}{dt} \Theta(t) - \frac{d}{dt} \varphi_4(t) \right) + q_4 \cdot (\Theta(t) - \varphi_6(t)) = -M_c(t)
\end{aligned}$$

где $\Psi_x(t)$ и $\Psi_y(t)$ – величины проекций векторов потокосцеплений на ось X статора и ротора соответственно;

$\Psi_y(t)$ и $\Psi_y(t)$ – величины проекций векторов потокосцеплений на ось Y статора и ротора соответственно;

R_s, L_s, l_s – активное сопротивление, индуктивности самоиндукции и рассеяния фазы статора соответственно;

R_r, L_r, l_r – активное сопротивление, индуктивности самоиндукции и рассеяния фазы ротора соответственно;

E_f – эффективное фазное напряжение;

M – величина взаимной индукции между фазами статора и ротора;

σ – полный коэффициент рассеяния;

ω_c – угловая скорость вращения поля;

$\psi(t), \varphi_1(t), \varphi_2(t), \varphi_3(t), \varphi_4(t), \varphi_5(t), \varphi_6(t), \Theta(t)$ – углы поворота сосредоточенных масс;

r_{1w}, r_{2w} – радиусы ведущего и ведомого шкивов соответственно;

$\Gamma_{b1}, \Gamma_{b2}, \Gamma_{b3}, \Gamma_{b4}, \Gamma_{b5}, \Gamma_{b6}$ – радиусы основных окружностей всех участвующих в зацеплении зубчатых колёс;

$K_{R1}(t), K_{R2}(t)$ – функции демпфирования ремённой передачи, вычисляемые по соответствующим коэффициентам демпфирования;

$K_{Z1}(t), K_{Z2}(t), K_{Z3}(t), K_{Z4}(t)$ – функции демпфирования зубчатых колёс коробки передач, вычисляемые по соответствующим коэффициентам демпфирования;

$C_{R1}(t), C_{R2}(t)$ – функции жёсткости на растяжение (сжатие) ремённой передачи, вычисляемые по соответствующим коэффициентам жёсткости;

$C_{Z1}(t), C_{Z2}(t), C_{Z3}(t), C_{Z4}(t)$ – функции контактно-изгибной жёсткости зубчатых колёс коробки передач, вычисляемые по соответствующим коэффициентам жёсткости;

$\Delta_1(t), \Delta_2(t), \Delta_3(t)$ – поправки на непостоянство передаточных отношений ремённой передачи и двух ступеней коробки передач;

M_{Gb1} – суммарный момент сопротивления на i -ой ступени привода;

M_d – электромагнитный момент, развиваемый двигателем;

$M_C(t)$ – момент сопротивления при резании.

Процесс резания характеризуется введением переменного момента сопротивления, колебания которого описываются формулой:

$$\Delta M_c = -(C_p t^{xp} S^{yp} V_\phi^{np-1} n_p \cdot \dot{u}_z + C_p R_d t^{xp} S^{yp} V_\phi^{np-1} n_p \cdot \phi) R_d,$$

где C_p, x_p, y_p, n_p – эмпирические коэффициент и показатели степени;

t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об;

V_ϕ – фактическая скорость резания, м/мин;

R_d – радиус точки приложения силы;

u_z – колебание резца в тангенциальном направлении;

ϕ – угол поворота шпинделя.

При решении системы дифференциальных уравнений получаемые углы поворотов сосредоточенных масс преобразуются в интервалы времени с помощью специального математического алгоритма, заключающегося в линеаризации функции на малых временных отрезках (не более 10 мкс) и последующем вычислении интервала времени на каждом таком отрезке.

В третьей главе производится верификация математической модели для частот вращения шпинделя 300 – 2000 об/мин. Измерительная информация представляется в виде временных рядов (хронограмма вращения). Для обработки используется теория корреляционного и спектрального анализов.

Важность диагностики дефектов привода обусловлена его ощутимым влиянием на режущий инструмент и соответственно на качество обработки поверхности детали на финишных операциях.

На Рисунках 2 и 3 ниже приведены расчётная и экспериментальная хронограммы для холостого хода шпинделя на частоте вращения 315 об/мин, а на Рисунках 4 и 5 – спектры их автокорреляционных функций (АКФ).

Точность совпадения расчётных и экспериментальных спектров АКФ по частоте характеризуется относительной погрешностью от 0,2 до 1,2 %.

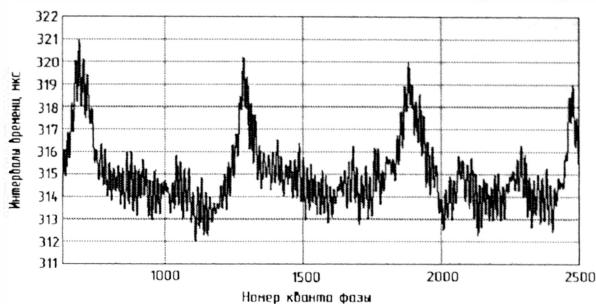


Рисунок 2. Расчётная хронограмма

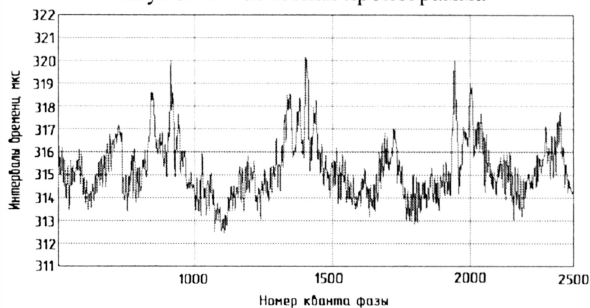


Рисунок 3. Экспериментальная хронограмма

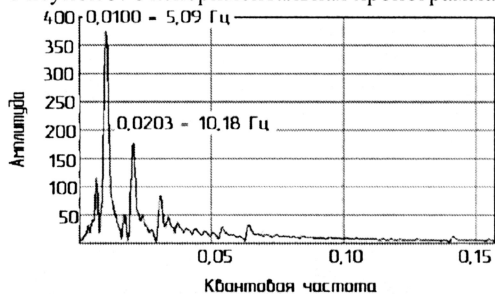


Рисунок 4. Расчётный спектр АКФ

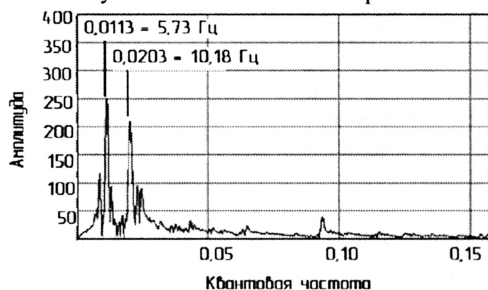


Рисунок 5. Экспериментальный спектр АКФ

В качестве примера приводятся алгоритмы идентификации для шести дефектов и отклонений от нормы:

- 1) колебания фазного напряжения, вызванные нестабильностью питающего напряжения;
- 2) колебания питающей частоты, вследствие нестабильности сети или погрешностей частотного регулирования скорости вращения электродвигателя;
- 3) перегрев обмоток статора;
- 4) растяжение ремня ремённой передачи;
- 5) поломка одного зуба шестерни первой ступени коробки передач;
- 6) выход из строя масляного насоса или приход в негодность смазки в зубчатом зацеплении;

Так, признаком нестабильности питающего напряжения является модуляция амплитуды на относительной частоте 0,1376 в спектре АКФ. Здесь использование относительной частоты удобно тем, что положение спектральных линий не привязано к скорости вращения шпинделя. Формула связи абсолютной и относительной частот имеет вид:

$$f_{\text{абс}} = f_{\text{отн}} \cdot \frac{n \cdot m}{60},$$

где $f_{\text{абс}}$ и $f_{\text{отн}}$ – абсолютная и относительная частота соответственно;

n – действительная частота вращения шпинделя;

m – число квантов фазы.

При наличии погрешностей регулирования скорости вращения шпинделя через широтно-импульсную модуляцию в хронограмме вращения присутствуют пилообразные «всплески», а в спектре АКФ – ниспадающие низкочастотные гармоники. Поломка зуба в зубчатой передаче характеризуется чётко повторяющимися резкими скачками на хронограмме вращения, как показано на Рисунке 6. Причём положение скачка указывает на номер дефектного зуба.

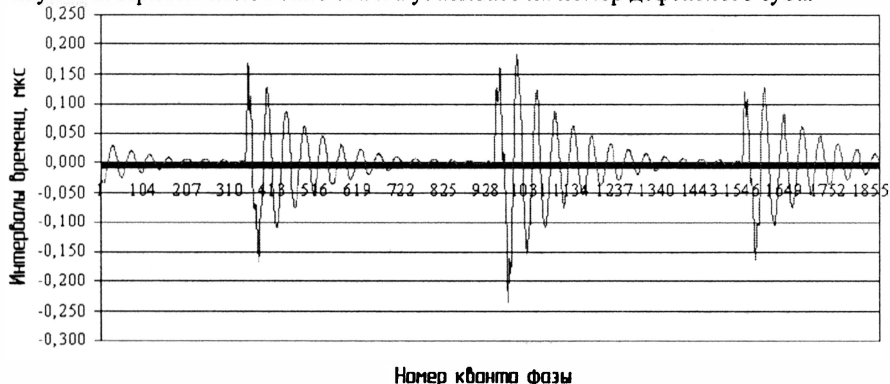


Рисунок 6. Трещина ножки зуба

Перегрев статорных обмоток проявляется в систематическом изменении оценки математического ожидания временного ряда, т.е. в смещении

хронограммы. Индикатором растяжения ремня ремённой передачи является модуляция амплитуд на относительных частотах 0,1345, 0,0136 и 0,4430 в спектре АКФ. Выход из строя смазки в зацеплении проявляется в модуляции амплитуды на относительной частоте 0,1407 в спектре АКФ.

При этом необходимо особо подчеркнуть, что упоминаемые спектры не являются амплитудными; как это принято в вибродиагностике. Речь идёт о спектрах временных рядов.

В этой же главе установлен масштаб влияния дефектов привода (на примере трещины ножки зуба) на состояние поверхности обрабатываемой детали. Выяснено, что на финишных операциях токарной обработки незначительные дефекты или отклонения от нормы в работе станка ощутимо сказываются на шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки. В рассмотренном в работе примере пятидесяти процентная потеря жёсткости зуба шестерни первой ступени коробки передач приводит к увеличению параметра шероховатости R_z примерно в два раза.

В четвёртой главе приводится описание токарного станка 16K20Ф3, на котором производились экспериментальные исследования. Также представляется схема построения фазохронометрического измерительного модуля, обосновывается выбор первичных преобразователей, а также приводятся некоторые конструктивные схемы реализации установки датчиков на разные типы токарного оборудования.

Схема, согласно которой строится фазохронометрический модуль, показана на Рисунке 7.

Приводятся условия проведения измерений и полученные результаты. Натурно имитировался дефект шпиндельных подшипниковых опор, а именно наличие проскальзывания тел качения. На первом этапе ослаблялся передний подшипниковый узел, а на последующем – задний. В результате устойчивый признак, сопровождающий подобный дефект, обнаружен в спектре АКФ, как показано на Рисунке 8.

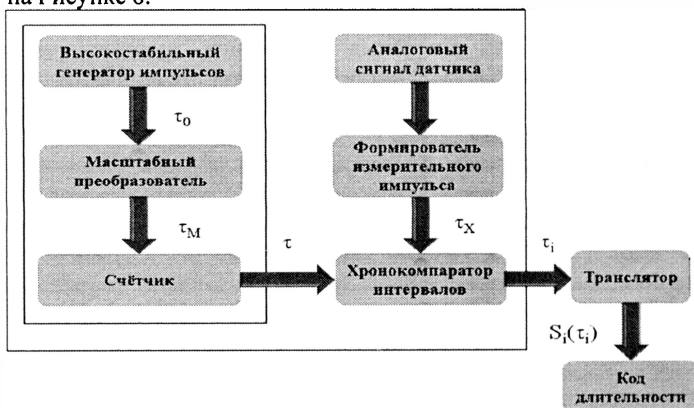


Рисунок 7. Принципиальная схема фазохронометрического модуля

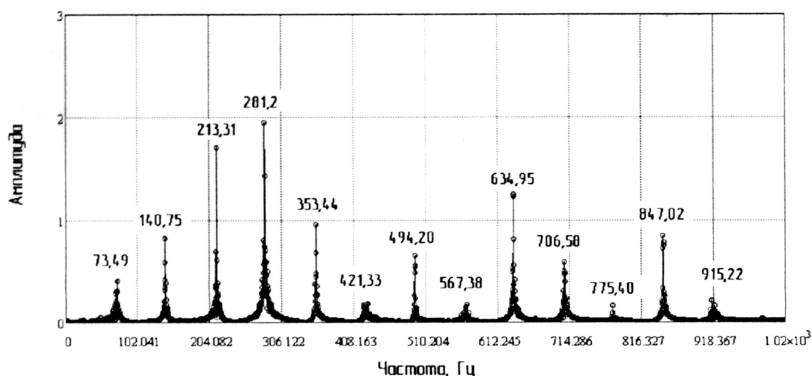


Рисунок 8. Спектр АКФ, холостой ход: 1000 об/мин,
ослаблены оба шпиндельных подшипника

Возникающие при этом субгармоники кратны частоте перекачивания тел качения по внутреннему кольцу, т.е. справедливо выражение:

$$f_g = k \cdot z \cdot f_c,$$

где k – коэффициент пропорциональности;

z – число тел качения;

f_c – частота вращения сепаратора.

Установлено, что амплитуда субгармоник возрастает при увеличении скорости вращения шпинделя.

В пятой главе анализируются погрешности измерительного канала и погрешности вычислительных алгоритмов.

К погрешностям измерительного канала отнесены погрешности первичных преобразователей и блока определения интервалов времени.

Погрешности вычислительных алгоритмов разбиты на 3 части:

- 1) погрешность интегрирования системы дифференциальных уравнений методом конечных разностей;
- 2) погрешность алгоритма построения хронограммы вращения, путём линеаризации зависимости угла поворота шпинделя от времени;
- 3) погрешность вычисления спектров в соответствии с теоремой Котельникова.

Вычисление данных погрешностей произведено методом контурных оценок.

Относительные погрешности для измерительного блока не превышают величины $4,3 \cdot 10^{-4} \%$. Первые две составляющие погрешности вычислительных алгоритмов составляют $3,22 \cdot 10^{-6} \%$ и могут быть отброшены, как величины второго порядка малости. Погрешность вычисления спектров не превышает $0,1 \%$.

В данной главе также оценивается информационная эффективность метода, которая оказывается в 1,84 раза больше в битах, чем обеспечивает метод вибродиагностики, что весьма существенно, так как результат получен в логарифмическом масштабе.

В шестой главе раскрывается принципиальная возможность реализации контроля качества контакта в конусной паре шпинделя на базе электрорезистивного и электроёмкостного методов. Контроль площади контакта необходим для более точного определения коэффициентов жёсткости и демпфирования в рамках разработанной математической модели привода. Выводятся зависимости переходного электрического сопротивления $R_{\Pi}(S_K)$ и переходной электрической ёмкости $C_{\Pi}(S_K)$ от площади контакта в соединении S_K :

$$R_{\Pi}(S_K) = \rho \cdot C \cdot \frac{\sqrt{HB}}{\left(\frac{(\pi D - \sqrt{\pi^2 D^2 - 4\pi \cdot S_K \cdot \operatorname{tg} \alpha_a}) \cdot S_K}{\frac{2\pi \cdot D \cdot \sin \alpha_a \cos \alpha_a}{\sin \Delta \alpha} \cdot \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)} \right)^x},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление [Ом·мм];

C – коэффициент, зависящий от степени чистоты поверхности;

HB – твёрдость поверхности по Бринеллю [кгс/мм²];

x – показатель степени; D – максимальный диаметр втулки [мм];

α_a, α_b – углы раствора втулки и наружного конуса соответственно;

$\Delta \alpha$ – разность углов раствора;

C_1 и C_2 – коэффициенты Лямэ наружного конуса и втулки соответственно;

E_1 и E_2 – модули упругости первого рода наружного конуса и втулки соответственно [кгс/мм²].

$$C_{\Pi}(S_K) = \frac{5,82 \varepsilon_0 \cdot S_K \sqrt{r_{np} \frac{(\pi D - \sqrt{\pi^2 D^2 - 4\pi \cdot S_K \cdot \operatorname{tg} \alpha_a}) \cdot S_K}{\frac{2\pi \cdot D \cdot \sin \alpha_a \cos \alpha_a}{\sin \Delta \alpha} \cdot \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)} (1 - \mu)^2}}{E_{np}^{0,5} a_m^{1,5}} \times \\ \times \left(2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 \cdot \frac{(h_m - a_m)^2}{a_m^2} + 4\varepsilon_1 h_m \left(\frac{0,5}{\sqrt{h_m - a_m + a_n}} + \frac{1}{\sqrt{a_m - a_n}} \right) \right),$$

где $\varepsilon_0 = 4\pi \cdot 10^{-10}$ – диэлектрическая постоянная [Ф/мм];

ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость;

r_{np} – приведённый радиус неровностей [мм], равный $r_1 \cdot r_2 / (r_1 + r_2)$;

E_{np} – приведённый модуль Юнга [кгс/мм²], равный $E_1 \cdot E_2 / (E_1 + E_2)$;

μ – коэффициент Пуассона; h_m – максимальная высота выступов [мм];

a_m – максимальное внедрение выступов [мм];

a_n – толщина оксидной плёнки [мм].

Установлено, что для обеспечения значений величин ошибок контроля α и β не более 5 % необходимо выполнение следующих условий:

- основная погрешность измерителя сопротивления не должна превышать 0,15 мкОм, а измерителя ёмкости – 200 мкФ;

- наконечник щупа при измерении сопротивления должен быть или сферическим или плоским с радиусом в несколько миллиметров. Усилие контакта должно быть не менее 10 Н;

- наконечник шупа при измерении ёмкости должен быть сферическим с радиусом, равным удвоенному радиусу закругления неровностей. Усилие контакта не должно превышать 0,1 Н;

- неповторяемость осевого усилия втягивания наружного конуса во втулку необходимо обеспечивать на уровне не более 270 Н.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа современных методов и средств диагностики металлорежущего оборудования и инструмента установлено, что для полноценного перехода от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по текущему техническому состоянию требуется разработка новых методов, дополняющих существующие.

2. Разработана математическая модель привода токарного станка с ЧПУ 16K20ФЗ в виде многомассовой крутильной системы, в которой сосредоточенные массы соединены друг с другом невесомыми упругими нитями. При этом фазохронометрическое представление модели учитывает непостоянство передаточных отношений, непостоянство электромеханических характеристик двигателя и другие дефекты привода.

Это позволяет косвенно связать конструктивные параметры основных узлов привода с измеряемыми интервалами времени, и использовать модель для отработки алгоритмов идентификации точностных и прочностных дефектов в них.

3. Построена принципиальная схема измерительно-вычислительной процедуры, сочетающей измерение интервалов времени с помощью высокостабильного кварцевого генератора и оперативно реализуемых вычислений на основе математической модели функционирования привода. В качестве первичного преобразователя в отсутствие смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) целесообразно использовать фотоэлектрические или оптоэлектронные датчики угла поворота. Для достижения абсолютной погрешности измерений на уровне 0,1 мкс, а относительной - $5 \cdot 10^{-4}$ рекомендуется использовать СИ не ниже 5-го класса (погрешность шага регулярного растра лимба ± 15 угл. сек).

4. Для различного типа токарного оборудования разработан и создан универсальный измерительный модуль ФХС, обеспечивающий возможность измерения параметров рабочего цикла главного привода. При этом использование датчика на шпинделе позволяет получать одновременно информацию о всех элементах кинематической цепи главного привода, что недоступно для амплитудных методов измерения.

5. Для таких дефектов, как колебание фазного напряжения, колебание питающей частоты, перегрев обмоток статора, растяжение ремня ремённой передачи, поломка одного зуба шестерни первой ступени коробки передач, выход из строя масляного насоса или приход в негодность смазки в зубчатом зацеплении, проскальзывание тел качения в шпиндельных подшипниках установлена их взаимосвязь с регистрируемыми вариациями интервалов времени, отражающими неравномерность вращения шпинделя. Это позволяет составить практические алгоритмы идентификации данных дефектов.

6. Проанализировано влияние неравномерности вращения шпинделя на качество поверхности обрабатываемой заготовки. Установлено, что любые дефекты главного привода токарного станка в той или иной степени влияют на вибрационное состояние резца таким образом, что режущий инструмент «копирует» крутильные колебания шпинделя. В результате шероховатость обрабатываемой поверхности увеличивается как минимум в 2 раза, что недопустимо на финишных операциях обработки;

7. Проведен сравнительный анализ способов контроля контакта в конусной паре шпинделя на базе электрорезистивного и электроёмкостного способов. На основе полученных зависимостей переходного сопротивления $R_{\Pi}(S_K)$ и ёмкости $C_{\Pi}(S_K)$ от площади контакта S_K в конусной паре шпинделя показано, что для осуществления достоверного контроля необходимо обеспечить неповторяемость осевого усилия втягивания наружного конуса во втулку в диапазоне не более 270 Н. При этом в качестве средств измерения могут применяться как отдельно взятые измерители ёмкости, так и RLC-измерители.

8. Произведены оценки погрешностей измерительного модуля ФХС и вычислительных алгоритмов. Полученные максимальные оценки в относительном выражении составляют: $4,3 \cdot 10^{-4} \%$ - погрешность измерительного модуля, $3,22 \cdot 10^{-6} \%$ - погрешность численного интегрирования и построения интервалов времени, 0,1 % - погрешность построения спектров с учётом теоремы Котельникова. Погрешность совпадения расчётных и экспериментальных спектров в диапазоне скоростей вращения шпинделя 300 - 2000 об/мин находится в пределах от 0,2 до 1,2%. Полученный уровень точности измерения приблизительно на три порядка выше, чем уровень, достигнутый виброакустическими методами в области станкостроения, что позволяет получать больше в 1,84 бита информации о режимах функционирования привода.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Потапов К.Г., Оценка технического состояния главных приводов токарных станков фазохронометрическим методом // Журнал «Мир измерений» №12, 2014. С. 10-18. (1 п.л.)

2. Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Оценка износа резца на основе измерения неравномерности вращения шпинделя токарного станка // Вестник МГТУ Станкин. 2014, №4. с. 107-112. (0,625 п.л. / 0,3125 п.л.)

3. Потапов К.Г., Сырицкий А.Б., Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // Приборы №5, 2014. С. 18-22. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)

4. Потапов К.Г. Фазохронометрический контроль износа рабочих профилей зубчатых колёс редуктора в процессе его функционирования // Метрология №9, 2013. С. 27 – 35. (1 п.л.)

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. Электрон. журн. 2013. № 2. (1,3125 п.л. / 0,4375 п.л.)

6. Особенности измерительного контроля сборки клеевых соединений электрорезистивными и электроёмкостными методами / К.Г. Потапов [и др.] // Все

материалы. Энциклопедический справочник 2014, №6. С. 13-18. (0,625 п.л. / 0,2083 п.л.)

7. Потапов К.Г. Оценка качества контакта в конусной паре через электрические параметры // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 4. (0,5625 п.л.)

8. Потапов К.Г. Диагностика главных приводов токарного оборудования фазохронометрическим методом // Сборник трудов XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов «МИКМУС», 2014, С. 323-330. (0,4375 п.л.)

9. Потапов К.Г. Математическое моделирование в рамках реализации фазохронометрического подхода к оценке технического состояния зубчатых передач // Сборник трудов XI Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники», 2014. С. 151 – 153. (0,125 п.л.)

10. Потапов К.Г. Математическая модель зубчатого зацепления одноступенчатого редуктора // Сборник трудов одиннадцатой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов», 2013. С. 291 – 293. (0,125 п.л.)

11. Потапов К.Г. Фазохронометрический контроль износа рабочих профилей зубчатых колёс редуктора в процессе его функционирования // Сборник трудов шестой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», 2013. С. 64 – 66. (0,125 п.л.)

12. Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Измерение кинематических параметров вращения токарно-винторезных станков фазохронометрическим методом // Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений» МГТУ им. Н.Э. Баумана 04 – 06 февраля 2013 г. С. 161 – 162. (0,125 п.л. / 0,0625 п.л.)

13. Атаманов В. Н., Кудрявцев Е.А, Потапов К.Г. Экспериментальная разработка метода регистрации положения зубчатого колеса // Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений» МГТУ им. Н.Э. Баумана 04 – 06 февраля 2013 г. С. 140 – 146. (0,375 п.л. / 0,125 п.л.)

14. Потапов К.Г. Фазохронометрическая система диагностики железнодорожных подвагонных редукторов // Сборник трудов пятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», 2012. С. 64 – 65. (0,0625 п.л.)

15. Разработка научных основ и технических средств прецизионного измерительного вычислительного сопровождения жизненного цикла машин и механизмов в области станкостроения: отчёт о НИР (заключ.) / МГТУ им. Н.Э. Баумана». Руководитель темы А.С. Комшин. Исполнители Быков П.А., Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. [и др.]. ГК № 16.740.11.0710, Инв. № 02201362711, М., 2013. 76 с.

16. Патент № 2561236 РФ, МПК6 G01M1/00. Способ диагностирования циклических машин – металлорежущих станков фазохронометрическим методом/ А.С. Комшин, К.Г. Потапов, А.Б. Сырицкий, М.И. Киселёв, В.И. Пронякин; Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. N 2013158894/28; Заяв. 30.12.2013; Оpubл. 27.08.2015.