

УДК 621.9; 621:658.011.56

В. П. Фёдоров, д-р техн. наук, проф., **М. Н. Нагоркин**, канд. техн. наук, доц.,
И. Л. Пыриков, канд. техн. наук, доц., **М. П. Топорков**, канд. техн. наук, доц.
Брянский государственный технический университет, Россия
Тел.: 00-7 (4832) 68-89-61, E-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье рассматриваются вопросы моделирования и управления качеством поверхностного слоя деталей на модернизированном оборудовании. Рассматривается комплексный метод экспресс-диагностики технологических систем, включая инструментальные и программные средства измерения параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей машин.

Ключевые слова: модернизация оборудования, программные средства, обработка поверхностей, структурная модель, лазерное сканирование, устройство согласования, структуры автоматизированных систем

V. P. Fyodorov, M. N. Nagorkin, I. L. Pyrikov, M. P. Toporkov

MODELING AND QUALITY MANAGEMENT OF A SUPERFICIAL LAYER OF DETAILS WITH APPLICATION OF MODERN MEANS OF TOOL MAINTENANCE AND COMPUTER TECHNOLOGIES

In article questions of modeling and quality management of a blanket of details on the modernized equipment are considered. The method of express diagnostics of technological systems, including tools and software of measurement of parameters of quality and operational properties of a superficial layer of machine components is considered.

Key words: equipment modernization, software, surface treatment, structural model, laser scanning, matching device, structure of computer-aided system

1. Введение

Современный подход к технологическому обеспечению надёжности деталей машин в плане их качества поверхности и эксплуатационных свойств базируется на применении эффективных технологических систем механической обработки, которые могут быть как универсальными, так и мехатронными. В случае наличия технологических систем морально устаревших, но физически работоспособных весьма актуальными являются их модернизация на основе современных компьютеризированных систем, приводов главного движения, подач и управления, которые позволяют наряду с процессом моделирования обработки включать их в состав виртуальных предприятий.

Любая технологическая система имеет свои индивидуальные особенности в обеспечении качества обрабатываемой поверхности, которые характеризуются сроком её эксплуатации, качеством планового технического обслуживания и инструментального обеспечения, квалификацией персонала и др. В связи с этим актуальны вопросы диагностики технологических систем по параметрам качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей.

В статье рассматриваются подходы к решению перечисленных технологических задач.

2. Основное содержание и результаты работы

Для обработки поверхностей с закономерным изменением качества, включающего как геометрические и физико-механические параметры, так и формирование мик-

рорельефов с заданной топографией, целесообразно использовать современное оборудование, оснащённое компьютеризированной системой ЧПУ типа CNC или модернизированное. Реализация отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием (ОУО ППД) для формирования поверхности с закономерным изменением качества при наличии соответствующего оборудования требует разработки или использования соответствующих программ обработки [1, 2, 3]. Как правило, для их составления применяется метод параметрического программирования, который максимально использует вычислительные возможности микро-ЭВМ, встроенной в устройство ЧПУ типа CNC. При этом механические устройства станка работают аналогично графопостроителю с той разницей, что в этом случае выходом является не чертёж, а обработанная деталь или её поверхность.

Во всех программах предусмотрена возможность управления величиной подачи и перемещением Z , то есть силой воздействия индентора на поверхность. Таким образом, реализуется возможность управления законами плотности обработки, степенью и глубиной наклёпа по поверхности, то есть её адаптацией в процессе обработки к переменным условиям эксплуатации с целью обеспечения постоянства показателей эксплуатационных свойств.

Технологическое обеспечение закономерно изменяющегося качества поверхности деталей машин тесно связано со сменой поколений металлорежущих станков, которая существенно меняет структуру, архитектуру и математическое обеспечение систем ЧПУ. Причины состоят в увеличении разнообразия функций оборудования, росте привлекательности систем ЧПУ типа PCNC в связи с множеством их преимуществ. Многолетний опыт использования предприятиями промышленного оборудования показывает, что моральное старение в 90% случаев относится, прежде всего, к электрической и электронной частям, а именно – к электродвигателям, электроприводам, датчикам и системам числового программного управления. Механическая часть станков (станина, суппорты, шпиндельные бабки, ходовые винты и прочее) может быть при этом вполне работоспособной. Поэтому, если предприятие заинтересовано в действительно эффективном и вместе с тем экономичном вложении средств, то оптимальным вариантом решения проблемы является – модернизация. В современных условиях такой подход оказывается экономически выгодным в сравнении с приобретением нового оборудования.

Для модернизации оборудования приемлемым вариантом является использование обычного ПК в качестве программного УЧПУ. Данный способ находит всё большее применение, как на небольших предприятиях, так и производителями станков. Основной проблемой при создании программного УЧПУ является отсутствие специализированного пульта управления станком и необходимость защиты ПК для работы в промышленных условиях. В основном программное УЧПУ используют для управления шаговыми двигателями (рис. 1), так как управление осуществляется через имеющийся порт LPT. Модернизацию приводов подач легко осуществить путём установки силового шагового привода, что требует минимальных конструктивных доработок, касающихся сопряжения валов силовых ШД и редукторов приводов подач.

В качестве программного обеспечения целесообразно использовать программный контроллер EMC2. EMC (the Enhanced Machine Controller) – это система программ для управления станками, роботами и другим технологическим оборудованием. с бесплатным программным обеспечением и открытым исходным кодом. EMC включает в себя: графический интерфейс пользователя; интерпретатор M/G-кодов (стандарт RS-274NGC); систему контроля перемещений реального времени с режимом "look-ahead"; возможность работы с датчиками ОС, сервоприводами, шаговыми приводами и иным

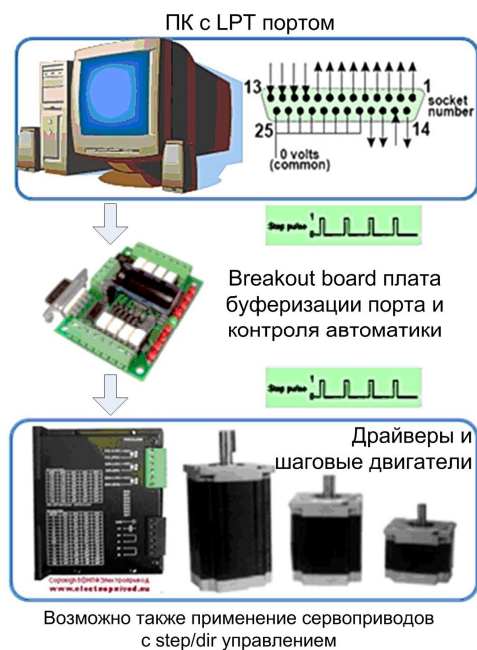


Рис. 1. Варианты работы программных ЧПУ

оборудованием; возможность быстрого создания уникальной конфигурации для станка; программный контроллер электроавтоматики (PLC) с возможностью графической настройки в виде релейно-контактных схем (ladder diagram). EMC2 включает в себя несколько программ облегчающих процесс адаптации, настройки и диагностики состояния оборудования, среди них программный осциллограф HALscope, логический анализатор HAL Meter, конфигуратор лестничных диаграмм программного логического контроллера (ПЛК) Classicladder и пошаговый конфигуратор (мастер создания профиля) оборудования Step Configurator. Например, система управления станка с ЧПУ модели 6P13Ф3 ("Контур" 2ПТ-71/3, код программирования "БЦК-5") имеет следующие недостатки: интерполятор относится к классу 2,5D; программоноситель-перфолента; отсутствует память для хранения управляющих программ (УП); шаговые приводы с гидроусилителем (ШД-5Д – гидроусилитель "ЭНИМС") требуют наличия мощной гидростанции (7,5 кВт); необходимость наличия устройств для подготовки перфоленты с УП. В связи с этим была осуществлена реконструкция путём замены СЧПУ "Контур 2ПТ-71/3" на программный контроллер EMC2 и шагового привода с гидроусилителем на силовой гибридный шаговый привод (СШГП). В состав СШГП входят гибридные шаговые двигатели FL110STH201-8004A ($M_{кр} = 28 \text{ Н}\cdot\text{м}$) и драйверы SMD-78 (НПО "Электропривод") В блоке SMD-78 используются дифференциальные входы для повышения помехоустойчивости и гибкости интерфейса. Блок обеспечивает два режима управления ШД: от внешнего источника и от компьютера через LPT-порт. При модернизации станка использована оригинальная плата буферизации порта и контроля электроавтоматики.

Такая модернизация станка 6P13Ф3 реализована на кафедре "Технология машиностроения" Брянского государственного технического университета и позволила избавиться от гидростанции и стойки ЧПУ "Координата 2ПТ-71"*. Были приобретены три силовых шаговых электропривода и персональный компьютер (100 т. руб. в ценах 2009 г.). При, несомненно, резком повышении технологической гибкости оборудования отпала необходимость использования гидростанции Г48-44 (общая мощность 8,6 кВт, ёмкость – 200 л. масла), трубопроводов для масла, гидроусилителей, стойки с ЧПУ "Контур 2ПТ-71/3", что даёт экономию занимаемой площади, электроэнергии и др.. Реализованная в процессе модернизации станка 6P13Ф3 система (EMC2 + силовой ШП), наряду с программированием с клавиатуры ПК, позволяет осуществлять программирование с помощью САМ-систем, которые избавляют технолога-программиста от необходимости проведения математических вычислений, обеспечивают его типовыми функциями, автоматизирующими ту или иную обработку.

Из возможных пакетов программного обеспечения EdgeCam, MasterCam и Adem

* Работа проводилась при непосредственном участии инж. А. А. Малкина

используется пакет Adem, который, наряду с другими функциями, на основе моделей DEM CAM решает широчайший спектр задач по формированию управляющих программ (УП) для фрезерной и других видов обработки. Он находится в одном ряду с наиболее передовыми системами подобного класса.

Обработка заготовки на станке после такой модернизации осуществляется в результате последовательной реализации следующих этапов: 1) подготовка чертежа детали; 2) импорт в САМ-модуль; 3) создание твердотельной модели; 4) создание переходов; 5) задание места обработки переходов; 6) выбор инструмента и режимов; 7) расчет траектории движения инструмента; 8) расчет полной траектории движения инструмента; 9) конвертация языка САМ-модуля в язык СЧПУ станка; 10) коррекция УП после пробных прогонов; 11) загрузка и верификация УП в системе ЧПУ станка (EMC2); 12) тестовая обработка детали.

Трехмерная визуализация позволяет осуществлять предварительное моделирование процесса обработки, что важно при решении задач инженерии поверхности. Открытость программного обеспечения EMC2 дает возможность использования модернизированного на его основе оборудования в составе виртуальных предприятий.

Кроме этого улучшились следующие характеристики: максимальная потребляемая мощность приводов подачи снизилась с 10 кВт до 3-х кВт, также снизилась потребляемая мощность системы ЧПУ; повысился общий КПД системы управления; уменьшился общий шум за счёт отсутствия гидростанции; увеличился диапазон рабочих подач; улучшилась динамика перемещения осей (повысилось ускорение); повысилась безопасность работы за счёт программных ограничений перемещений и программного анализа УП перед её выполнением.

После проведения модернизации появились новые технологические возможности: возможность синхронного перемещения осей со шпинделем (подача на оборот) за счёт использования датчика оборотов шпинделя; возможность компенсации радиуса инструмента и его длины; возможность ручного программирования; возможность визуализации отработки УП и отображения траекторий перемещений виртуального станка для отладки программ и получения навыков работы с ПО; возможность использования встроенных САМ модулей для построения 3D профилей из растрового изображения, с последующим экспортом в виде управляющей программы EMC; возможность использования встроенных САМ модулей прямого импорта 2D dxf чертежей из САД систем и преобразования в управляющую программу с заданием основных технологических параметров; возможность использования внешних САМ модулей, таких как Mastercam, Adem. Это обеспечивает решение следующих задач: подготовку чертежа в САД системе; создание твердотельной модели в САМ (Adem), проектирование технологии обработки детали и создание управляющей программы в виде G-кодов; загрузку программы обработки детали в EMC2, настройка привязки осей к системе координат детали; обработку модели детали; возможность плавного изменения подачи инструмента во время отработки управляющих программ.

В результате такой модернизации можно решать самые разнообразные технологические задачи обработки деталей машин, в частности, задачи инженерии поверхностей по обеспечению закономерного изменения их качества методами ОУО ППД. При этом на одном рабочем месте решаются задачи моделирования поверхностей, разработки и отладки управляющей программы и обработки функциональной поверхности детали. Примеры визуализации реальной обработки поверхностей при создании на них топографии с синусоидальными регулярными микрорельефами показаны на рис. 2.

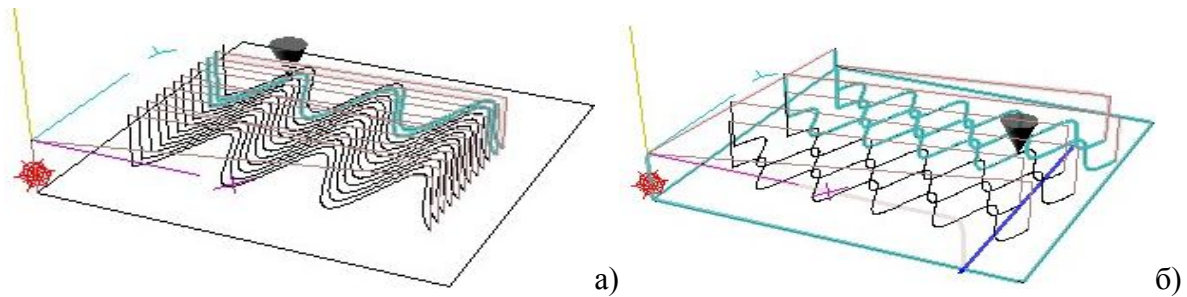


Рис. 2. Визуализация обработки поверхностей на экране монитора в системе EMC2 при создании топографии на основе непересекающихся (а) и пересекающихся (б) синусоидальных регулярных рельефов

Существующая настоятельная необходимость обеспечения требуемого закона изменения КПС или ЭС по обрабатываемой поверхности при современном развитии технологических систем (ТС) можно надёжно и эффективно обеспечить компьютерным управлением [4].

В этом случае, программа управления ТС формируется на основе исходных данных. Комплексный упрощённый подход к решению данной задачи показан в виде блок-схемы (рис. 3), включающий конструкторские и технологические аспекты для достижения конечной цели.

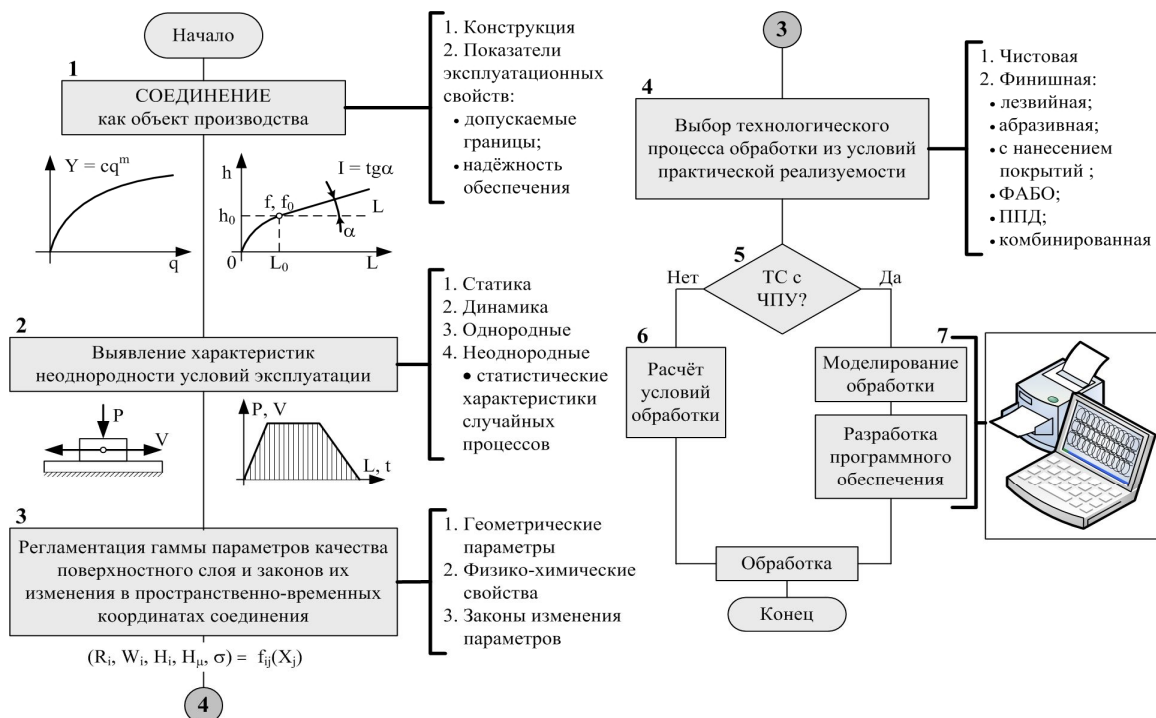


Рис. 3. Структурная модель программного обеспечения качества поверхностей деталей машин, работающих в нестационарных условиях эксплуатации

Принципиальное отличие предлагаемой модели от традиционных заключается в содержании блоков 2 и 3, а также во введении блока 7. Эти изменения являются ключевыми в решении задачи технологического обеспечения постоянства характеристик ЭС функциональных поверхностей деталей машин при нестационарных (переменных в

функции координат поверхности) условиях эксплуатации.

Большое разнообразие методов обработки и связанных с ними параметров качества может быть значительно сокращено, если принять во внимание тот факт, что основное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин оказывают операции чистовой и финишной, в частности отделочно-упрочняющей обработки. Особенно это актуально для деталей, работающих в условиях повышенного износа, таких, например, как направляющие металлорежущих станков.

Для обеспечения требуемых режимов обработки, к которым, в первую очередь, например, при обработке ППД на станках с ЧПУ относятся скорость обработки, значение силового воздействия индентора на поверхность, подача, траектория движения инструмента, технологическая система должна обладать высокой степенью технологической гибкости, то есть иметь возможность в короткий срок изменять режимы обработки в пределах перехода, обеспечивая полученный в блоке 3 (рис. 3) закон изменения параметров качества в пространственной области [5].

На параметры качества поверхностного слоя (ПКПС) или эксплуатационных свойств (ПЭС) поверхности детали решающее воздействие также оказывают операции чистовой, финишной и отделочно-упрочняющей обработки. Предлагаемая идеология может быть реализована практически для любого технологического метода обработки (чистовое и тонкое фрезерование, шлифование, методы ППД и др.).

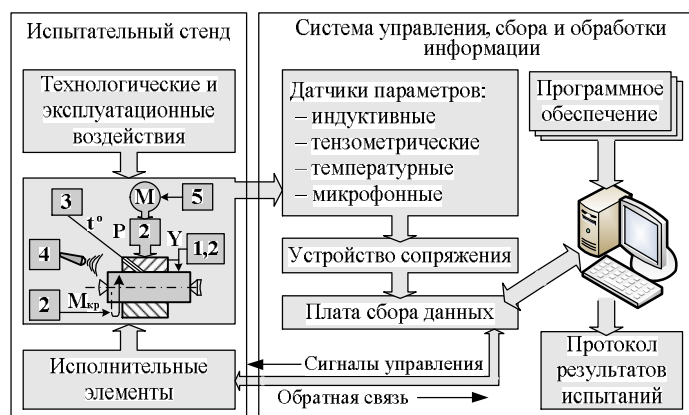


Рис. 4. Типовая структура автоматизированной системы для исследования эксплуатационных свойств соединений деталей машин: 1, 2, 3, 4 – индуктивные, тензометрические, температурные и микрофонные датчики; 5 – исполнительные элементы приводов устройств моделирования внешних воздействий

включает устройство сопряжения датчиков с платой сбора данных, адаптированное к условиям измерений различных параметров качества поверхности и её эксплуатационных свойств (для исследования износостойкости цилиндрических соединений (рис. 4).

Например, исследования износостойкости соединений могут осуществляться при условиях закономерно изменяемой нагрузки от привода 5 (рис. 4) для статических и динамических нагружений, законы изменения которых могут задаваться программным методом от ПК. Аналогично могут быть реализованы нестационарные нагрузки и скорости относительного скольжения трибоэлементов, включая программируемую случайную компо-

Решение задач управления формированием требуемых эксплуатационных свойств соединений деталей машин, которое затруднено без испытаний на специализированных экспериментальных установках, моделирующих реальные условия эксплуатации в настоящее время актуально. Задача получения или уточнения информации технологического характера конкретных ПКПС или ПЭС при различных видах обработки поверхностей и заданных условиях эксплуатации решается путём соответствующей обработки потоков информации, полученных в процессе определённо спланированных испытаний.

Наиболее эффективны компьютеризированные стенды, типовая структура которых обязательно

ненту.

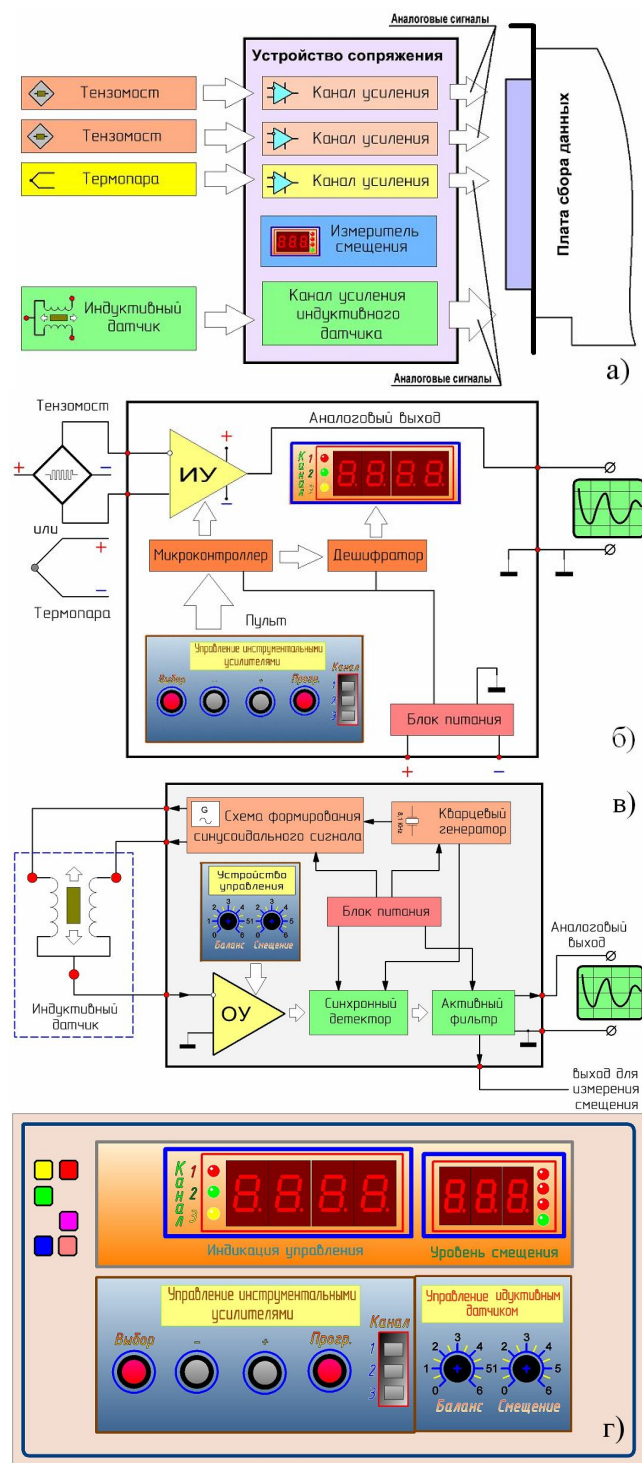


Рис. 5. Программируемое устройство согласования: а – блок-схема; б, в – каналы усиления; г – лицевая панель устройства согласования

Эта система должна устойчиво и надёжно работать с различными типами датчиков, что обеспечивается программируемым устройством сопряжения, блок-схема которого (рис. 5а) включает два канала усиления для тензометрических измерений, которые широко применяются в триботехнологических исследованиях плоских и цилиндрических исследованиях пар трения, при исследовании контактной жёсткости соединений и др. Предусмотрены также каналы усиления для термопары и индуктивного датчика, которые широко применяются при исследовании геометрических параметров качества поверхностей и при измерении микроперемещений*.

Устройство способно работать в различных компьютеризированных системах сбора и обработки информации, в частности при использовании платы сбора данных PCI-1202L ("Signal", г. Москва) и программной среды LabView. Канал усиления для тензодатчиков и термопары (рис. 5а) создан на базе инструментального усилителя (ИУ) AD8550 (Analog Devices). Величины коэффициента усиления K_y и смещения C_m задаются с пульта управления. Там же запускается программа микропроцессора (МП) для генерации кодов. Запрограммированные величины K_y и C_m индицируются в цифровом виде, а индикатор смещения показывает его фактическую величину для возможной коррекции, которая реализуется автоподстройкой. Это обеспечивает минимальный "дрейф нуля" канала. Реализована диагностика состояния датчиков во время работы. Длина коммуникационной линии может составлять до 100 м и более.

* Работа проводилась при непосредственном участии инж. В. В. Третьякова

Канал усиления для индуктивного датчика (рис. 5б) реализован по структурной схеме, аналогичной схеме профилометра 170622 ("Калибр", г. Москва) с использованием современной элементной базы.

Измерительный сигнал снимается непосредственно с индуктивного датчика, что повышает точность и достоверность измерений. Это особенно важно при исследовании геометрических параметров качества с использованием отечественных профилометров-профилографов. В этом случае используются только два их функциональных узла – индуктивный датчик и мотопривод, который управляется от компьютера. Такая схема измерений позволяет проводить параллельно несколько видов анализа микропрофиля, например стандартный (ГОСТ 2786-73) и корреляционно-спектральный. Это особенно важно при исследовании его характеристик в процессе нормальной эксплуатации.

Перспективными и востребованными, особенно в области нанотехнологий, являются методы электронной микроскопии и лазерного сканирования поверхностей. Ядром предлагаемой системы исследования поверхностей методом лазерного сканирования (рис. 6) является лазерная головка (например, KSS-210). Остальные элементы и их параметры могут варьироваться в зависимости от конкретных задач исследований.

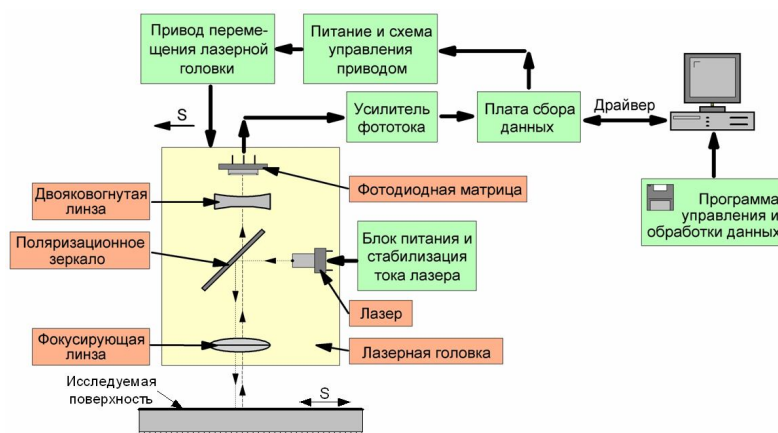


Рис. 6. Функциональная схема системы исследования поверхностей методом лазерного сканирования

В соответствии с этой схемой реализована действующая физическая модель системы на базе шасси профилографа мод. 201 (Калибр, г. Москва). Сравнение сигнала лазерного сканирования поверхностей с сигналами соответствующих профилограмм (рис. 7) показывает хорошее совпадение шаговых характеристик t . Что касается высотных параметров, то с помощью данной системы их определение является проблематичным, так как имеет место отражение лазерного луча на наклонных участках профиля поверхности, углы наклона которых характеризуются величиной выходного сигнала V системы измерения. Отображение реального микропрофиля шероховатости в этом случае возможно путём разработки специальных схем измерения и программной реализации соответствующих алгоритмов обработки.

3. Заключение

Подходы изложенные в статье позволяют выбирать пути технологического обеспечения параметров качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей машин как в универсальных, так и в модернизированных на основе компьютеризации технологических системах. Вопросы модернизации физически рабо-

тоспособного металлообрабатывающего оборудования рассмотрены на конкретном примере с характеристикой применяемых технических и программных средств. Учитывая важность и необходимость диагностики технологических систем по параметрам качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей, дана общая схема экспресс-диагностики и рассмотрены основные инструментальные средства, касающиеся программируемых устройств согласования автоматизированных систем исследования с компьютером, включающие использование тензометрических, и индуктивных датчиков, а также средств лазерного сканирования поверхностей.

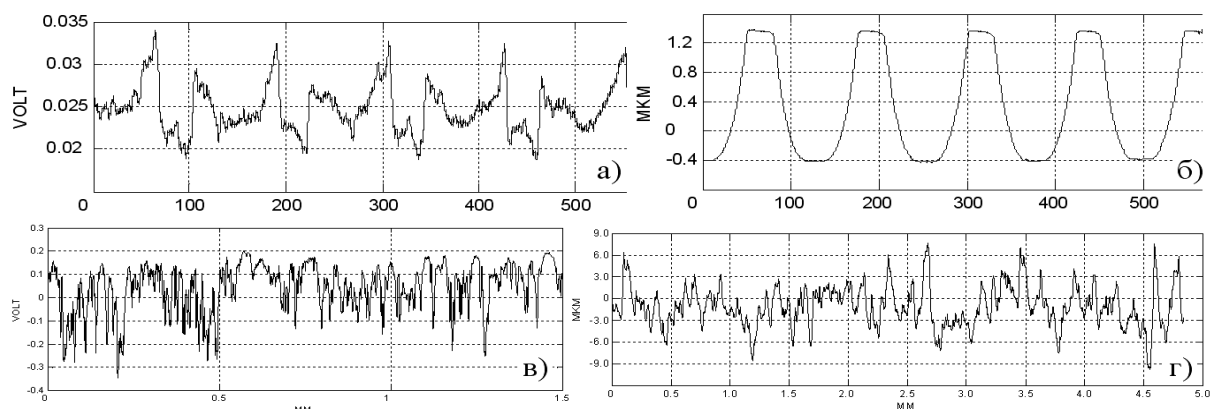


Рис. 7. Результаты исследования профиля поверхностей: а) лазерное сканирование эталона шероховатости ($R_{\max} = 6 \text{ мкм}$); б) профилограмма эталона шероховатости; в) лазерное сканирование шлифованной поверхности; г) профилограмма шлифованной поверхности

ЛИТЕРАТУРА

1. Фёдоров В. П. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием деталей машин с закономерным изменением качества поверхностных слоев / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Вестник Брянского государственного технического университета – Брянск: БГТУ, – № 1(29), 2011. – С. 22 – 31.
2. Фёдоров В. П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки [Текст]+[Электронный ресурс]: монография / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва. – Брянск: БГТУ, 2012. – 192 с.
3. Федоров В. П. Принципы и средства технологического обеспечения заданных законов распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали / Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки. Коллективная монография. / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин и др.; Под ред. А. В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – С 173–220.
4. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А. Г. Сулова – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
5. Фёдоров В. П. Технологические и метрологические аспекты адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации в процессе изготовления / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Справочник Инженерный журнал № 10, 2009. Приложение № 10. – С. 8–15.

Поступила в редколлегию 21.01.2016 г.