

УДК 621:658.011.56

DOI: 10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484

**А.Г. Суслов, д.т.н.,
В.П. Федоров, д.т.н.,
М.Н. Нагоркин, к.т.н.
И.Л. Пыриков, к.т.н.**

(ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: mootechmash@mail.ru; nagorkin_mn@mail.ru

Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин

Рассмотрены основы комплексного подхода к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин. Данный подход применим, как на этапе научных исследований, так и в условиях экспериментально-технологических лабораторий промышленных предприятий. Он охватывает вопросы планирования, метрологического, математического и инструментального обеспечения исследований.

Ключевые слова: технология; качество поверхности; технологические системы; метрологическое обеспечение; планирование эксперимента; диагностика; параметрическая надёжность.

**A.G. Suslov, Dr. Sc. Tech.,
V.P. Fedorov, Dr. Sc. Tech.,
M.N. Nagorkin, Can. Sc. Tech.,
I.L. Pyrikov, Can. Sc. Tech.**

(FSBEI HE Bryansk State Technical University, 7, October 50-th Anniversary Boulevard, Bryansk, 241035)

Complex approach to experimental investigations of metal-working technological systems to ensure parameters of quality and operation properties of machinery surfaces

Fundamentals of the complex approach to the experimental investigations of metal-working technological systems to ensure parameters of quality and operation properties of machinery surfaces are considered. The approach mentioned above is applicable both at the stage of scientific researches and under conditions of experimental-technological laboratories of manufacturing enterprises. It embraces the matters of planning, and also metrological, mathematical and instrumental support of investigations.

Keywords: technology; surface quality; technological systems; metrological systems; experiment planning; diagnostics; parametric reliability.

В Брянской научной технологической школе, основы которой были заложены заслуженным деятелем науки и техники РФ, доктором технических наук, профессором Э.В. Рыжовым, и получившей дальнейшее развитие, бла-

годаря работам его учеников, на протяжении ряда лет развивается научное направление по обеспечению параметров качества поверхностного слоя (КПС) и эксплуатационных свойств (ЭС) поверхностей и соединений де-

талей машин [1, 2, 4].

В этом направлении исследуются возможности технологического обеспечения параметров КПС и ЭС поверхностей и соединений деталей машин в разных технологических

системах (ТС) различной физической природы с единых методологических позиций, которые составляют основу универсального комплексного подхода к экспериментальным исследованиям ТС (рис. 1).

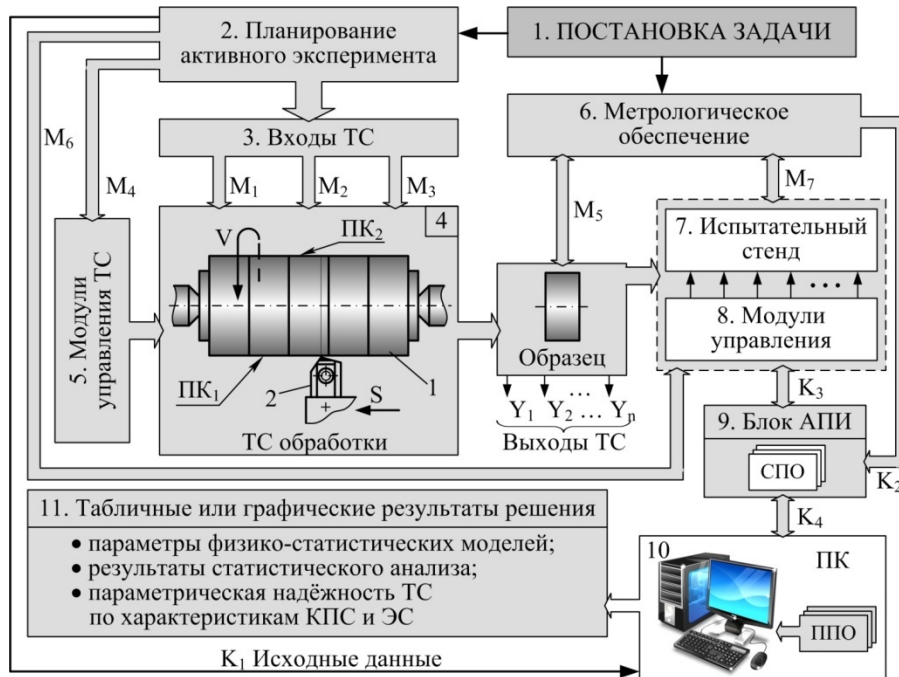


Рис 1. Структурная схема комплексного подхода к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин

Сущность такого подхода состоит в том, что КПС рассматривается во взаимосвязи с реальными условиями эксплуатации обрабатываемой поверхности детали и получении соответствующих физико-статистических моделей, пригодных для использования при технологической подготовке производства.

К начальному этапу исследований относится (см. рис.1) постановка задачи **1**, определяющая ТС обработки **4**, планирование активного эксперимента **2** и состав метрологического обеспечения **6**. При планировании эксперимента **2** выбираются входные факторы ТС **3** в виде множеств M_i : M_1 – параметры качества поверхности после предварительной обработки PK_1 или режимы предварительной обработки, которые задаются с целью исследования влияния технологической наследственности на формирование параметров качества поверхности PK_2 в процессе обработки; M_2 – геометрические или другие параметры инструмента; M_3 – режимы и другие условия обработки в ТС **4**.

Наряду с выбором факторов, регламентируются их пределы варьирования, определяющие исследуемую область факторного пространст-

ва. Этот вопрос, если он не оговорён в постановке задачи **1**, решается экспериментально или путём анализа априорной информации об исследуемой ТС.

В состав структурной схемы входят также испытательные стенды **7** для исследования ЭС поверхностей деталей, аппаратно-программный интерфейс (АПИ) **9**, компьютер **10**, а также программные или ручные модули **5** управления ТС и испытательными стендами **8**. Управление модулями **5** и **8** осуществляется автоматически или вручную путём введения элементов множеств M_4 и M_6 , сформированными в соответствии с планом эксперимента **2**.

В структурной схеме действуют следующие основные каналы передачи информации: K_1 – исходные данные активного эксперимента в ПК (**10**); K_2 – результаты измерений параметров качества устройствами автономного действия (измерительные блоки профилометров, микроскопов и др.); K_3 – измерительные сигналы, снятые с датчиков (индуктивных, тензометрических, температурных и др.), встроенных в испытательные стенды; K_4 – обмен информацией между АПИ и ПК.

Выходом ТС (4) являются параметры КПС обработанной поверхности (ПК₂) Y_1, Y_2, \dots, Y_n , которые после измерения передаются в 6 в виде множества $M_5 = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$. Аналогично измеряются в 7 и передаются в 6 параметры ЭС поверхности или соединения (множество M_7), элементом которого она является.

Одним из ключевых элементов структурной схемы является АПИ (9), который осуществляет связь между реальными физическими подсистемами экспериментальных исследований и их виртуальными моделями в виде алгоритмов, программного обеспечения и др. Разработаны АПИ следующих типов [3, 5 – 10]:

- не имеющие оперативной памяти (АПИ-1);
- имеющие встроенную оперативную память (АПИ-2, АПИ-3).

АПИ первой группы (АПИ-1) требуют постоянной связи с ПК для передачи оперативной информации об исследуемом процессе в ходе всего эксперимента. Такие системы могут применяться в случаях быстро протекающих экспериментов (исследование контактных сближений контактирующих поверхностей под нагрузкой, измерение геометрических параметров поверхностей деталей в лабораторных условиях и др.).

АПИ второй группы [6, 7, 8] имеют встроенную память, что исключает необходимость постоянной связи экспериментальных блоков с ПК. Блоки АПИ имеют специальное программное обеспечение (СПО).

Обработка экспериментальных данных на ПК с помощью прикладного программного обеспечения (ППО) позволяет получить табличные или графические результаты решения поставленной задачи 11.

В основе активного эксперимента над ТС лежит матрица планирования, формируемая в 2 (см. рис. 1) и во многом определяющая качество результатов исследований и их экономичность. Её вид и размер (количество опытов N) зависят, в первую очередь, от требуемого вида получаемой физико-статистической модели исследуемого процесса, количества исследуемых факторов и др.

Известно [1, 2, 3], что модели функций технологических процессов с достаточной для практических целей точностью можно представить в виде полиномиальной (аддитивной) модели:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \quad (1)$$

где Y_i – i -й параметр качества поверхностного

слоя или эксплуатационных свойств детали после обработки; X_i – i -й фактор технологического процесса; β_0, β_i – истинные значения коэффициентов регрессии.

Аддитивные модели вида (1) строятся из предположения линейной связи между функцией Y_i и аргументами X_i . Такие случаи в технологии обработки встречаются достаточно редко. Чаще приходится иметь дело с нелинейной зависимостью оцениваемых параметров относительно факторов обработки. Получение моделей таких зависимостей связано с вычислительными трудностями, так как они не допускают непосредственного применения обычного метода наименьших квадратов.

В практических исследованиях параметрической надёжности технологических систем весьма распространённой является степенная зависимость:

$$Y = k_0 X_1^{k_1} X_2^{k_2}, \quad (2)$$

где k_0, k_1, k_2, \dots – экспериментально определяемые коэффициенты.

Такие модели являются приближённой имитацией технологического процесса. Одним из их недостатков является неудовлетворительная точность и отсутствие адекватного отклика на изменяющиеся условия протекания моделируемого процесса. Таким образом, модели (1) и (2) можно использовать при исследовании устойчиво протекающих процессов, т.е. когда нет оснований ожидать каких-то непредвиденных возмущений в ТС.

Как отмечалось выше, общим в структурах экспериментальных исследований ТС является наличие устройств согласования ТС и испытательных модулей с ПК с целью обеспечения функций управления, измерения, сбора, передачи и обработки оперативной информации. Это обеспечивается аппаратно-программными интерфейсами (АПИ), которые можно применять в системах диагностики и измерений параметров процессов различной физической природы.

Устройство АПИ-1 (рис. 2) [10] способно работать в различных компьютеризированных системах сбора и обработки информации, в частности при использовании платы сбора данных PCI-1202L (Signal, г. Москва) и специального программного обеспечения. Канал усиления для тензодатчиков и термопары (рис. 2) создан на базе инструментального усилителя (ИУ) AD8550. Запрограммированные величины (коэффициент усиления, сме-

щение) 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. В АПИ-1 отсутствуют ячейки памяти и требуется постоянная связь с ПК посредством коммуникационной линии, длина которой может составлять 100 м и более.

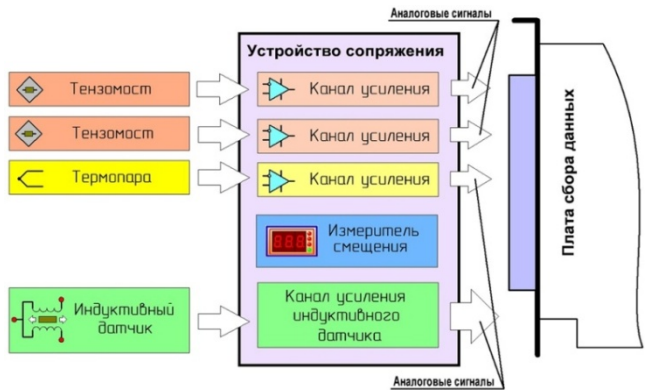


Рис. 2. Аппаратно-программный интерфейс АПИ-1: блок-схема

Канал усиления для индуктивного датчика (рис. 2) 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 компьютером. 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. На лицевой панели (рис. 2) размещены элементы настройки, управления и информации о ходе процесса измерения.

Устройство АПИ-2 также является многоцелевым, так как в нём предусмотрена возможность подключения индуктивных и тензометрических измерительных систем, а также датчиков температуры. Это актуально при проведении диагностики технологических систем по обеспечению эксплуатационных свойств поверхностей деталей в процессе обработки (параметры износостойкости, контактной жёсткости и др.).

Основной отличительной особенностью АПИ-2 является наличие четырех ячеек оперативной памяти, содержимое которых выводится на мини-дисплей в виде графиков регистрируемых величин исследуемого процесса. Их дальнейшая обработка осуществляется с помощью виртуальных приборов (ВП), как непосредственно в процессе измерения, так и со сдвигом во времени после передачи содержимого ячеек памяти АПИ-2 в ПК через USB-порт.

На основе применения АПИ-2 разработана мобильная система измерения параметров шероховатости и волнистости поверхностей (рис. 3) [6, 7].

В её состав входят: индуктивный датчик (ИД) с приводом (в данном случае от профилометра мод. 170622); аппаратно-программный интерфейс АПИ-2, управляющий балансировкой и работой привода датчика в соответствии с рекомендациями соответствующих нормативов и стандартов; ПК с ВП, представляющим собой специальное программное обеспечение.

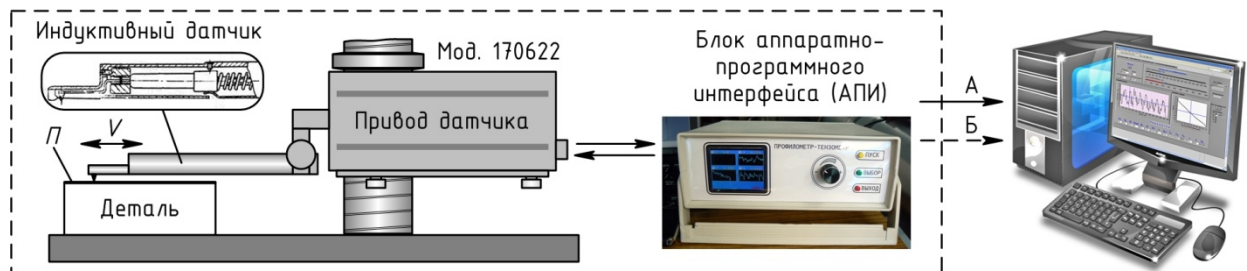


Рис. 3. Схема мобильной системы измерения геометрических параметров качества поверхностей на основе применения приборов обработки и анализа случайных сигналов

АПИ-2 обеспечивает работу системы в двух | режимах: 1) режим А – передачи сигнала, сни-

маемого ИД с поверхности детали в ПК непосредственно в процессе измерения через порт USB; 2) режим Б – удалённая работа регистрирующей системы профилометра (ИД + привод) под управлением АПИ-2 с регистрацией данных в его памяти. Дальнейшая обработка осуществляется с помощью ВП после передачи содержимого памяти АПИ-2 в ПК через USB-порт.

ВП имеет 4 окна пользователя, обеспечивающих выбор всех необходимых параметров измерительного процесса: 1) запись данных измерений в файл; 2) расчет параметров; 3) спектральный анализ; 4) гистограмма распределения ординат и корреляционная функция обеспечивает расчёт параметров шероховатости в пределах базовой длины.

Окно пользователя «Расчет параметров» является ключевым в плане выбора представленных в нем исходных данных. В нем предусматривается выбор участка профилограммы для расчёта параметров, выбор типа цифрового фильтра и его характеристик при необходимости расчёта параметров W_i волнистости поверхности, которые принимаются аналогичными параметрам шероховатости. В центральной части окна выведены графики выбранного участка профилограммы и относительной опорной длины профиля, по которому с помощью курсора можно определить относительную опорную длину профиля t_p на любом уровне p (%).

При расчёте гистограмм можно варьировать число интервалов, а в протоколе выво-

дятся значения средней величины, стандартного отклонения, дисперсии, моды, асимметрии, эксцесса и центрального момента профиля поверхности. Корреляционная функция рассчитывается в одной из трёх модификаций (выбираются исследователем): смещённая, несмещённая и без нормализации.

Устройство АПИ-3 отличается от устройства АПИ-2 наличием восьми ячеек памяти, что позволяет вдвое увеличить время его работы в автономном режиме (без связи с ПК). В остальном их различия незначительны. Устройства АПИ-2 и АПИ-3 позволяют реализовать процессы измерения параметров непосредственно в рабочей зоне ТС (см. рис. 3).

Тарировка систем во всех случаях проводилась с использованием эталонов шероховатости № П-112 ($Ra = 0,058$ мкм) и № 8-41 ($Ra = 0,74$ мкм). Погрешность измерений составляет не более 3...5 %. Содержание рабочего протокола измерений формируется исследователем, который может включить в него любые результаты, имеющиеся в окнах ВП.

Для исследования структуры и микроанализа поверхности разработана система микроструктурного анализа (рис. 4) на базе применения отечественных микроскопов: металлографических МИМ-10 и МЕТАМ РВ, МБС-2, ПМТ-3М и др., позволяющих регистрировать увеличенный фрагмент поверхности детали или образца; цифровой видео- и фотоаппаратуры и ПК [3, 8].

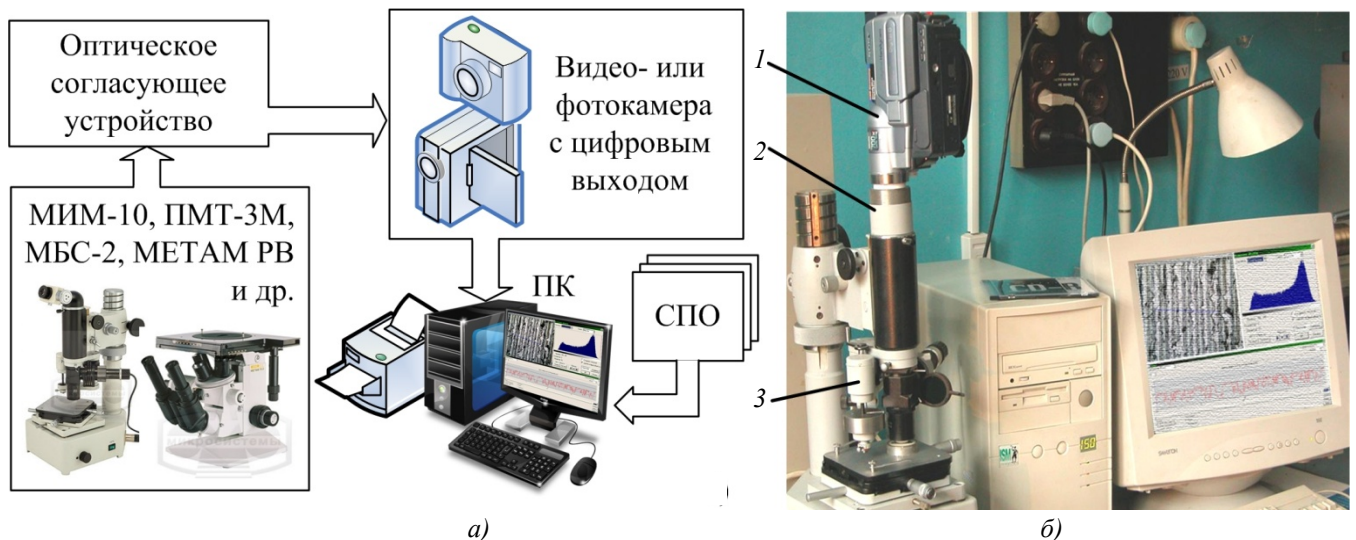


Рис. 4. Компьютеризированная система микроструктурного анализа поверхностей деталей:

а – блок-схема системы; б – общий вид; 1 – цифровая видеокамера; 2 – оптическое согласующее устройство; 3 – микровердомер

Система построена по модульному принципу и имеет открытое программное обеспе-

чение. Изображение через оптическое согласующее устройство передаётся на цифровую

фото- или видеокамеру, которая запоминает его и передаёт на ПК для детального исследования и анализа с помощью специального программного обеспечения (например, Image Score). Видеокамера, наряду с дискретной (режим «Фото»), обеспечивает непрерывную регистрацию процесса (режим «Видео») с возможностью его фиксации в требуемые программируемые моменты времени. Это важно при исследовании кинетики процессов на поверхности в результате физических (склерометры и др.) и химических (нанесение плёнок, исследование коррозии и др.) воздействий.

При анализе структуры поверхности можно использовать пакет программ Image Score Color (и др.), его отдельные элементы или другие редакторы обработки изображений, которые позволяют получить различные характеристики поверхности (профиль яркости, гистограмму её распределения, 3D-модели поверхности и т.д. [3, 8]).

Модернизация физически работоспособных отечественных измерительных устройств на базе компьютеризации, по примерам рис. 3 и 5, способствует решению задачи импортозамещения в области метрологического обеспечения технологических исследований.

Испытательные стенды представляют собой автоматизированные системы для исследования параметров ЭС соединений деталей машин в ходе эксперимента (рис. 5).

Наиболее эффективны компьютеризированные стенды, типовая структура которых обязательно включает устройство сопряжения датчиков с платой сбора данных, адаптированное к условиям измерений различных

ПКПС и ПЭС (для исследования износостойкости цилиндрических соединений (рис. 5, а)).

Это устройство надёжно работает с различными типами датчиков – средствами регистрации и преобразования первичной информации, передавая её с минимальными помехами и искажениями при достаточном усилении. Если диагностику ТС по параметрам ЭС в рабочей зоне или по комплексным показателям осуществить не представляется возможным, то численные значения параметров ЭС определяются по результатам стендовых испытаний. Как показывает практика, во многих случаях возникает необходимость проектирования и создания специальных испытательных стендов (ИС), условия испытания соединений в которых подобны или воспроизводят реальные условия эксплуатации.

С целью унификации ИС, их следует создавать по модульному принципу. В этом случае при исследовании, например, износостойкости основными модулями являются: модуль привода относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, модуль нагрузки на соединение, измерительный модуль.

Аналогичные модули используются при диагностике ТС и по другим эксплуатационным свойствам. Это диктует целесообразность применения унифицированных приводов управления указанными модулями. С этой целью предлагается автоматизированный привод управления модулями (рис. 5, б), основу которого составляет силовой шаговый привод (СПШ), в котором шаговый двигатель и программируемый контроллер конструктивно могут составлять одно целое (например, сервопривод шаговый типа СПШ 10).

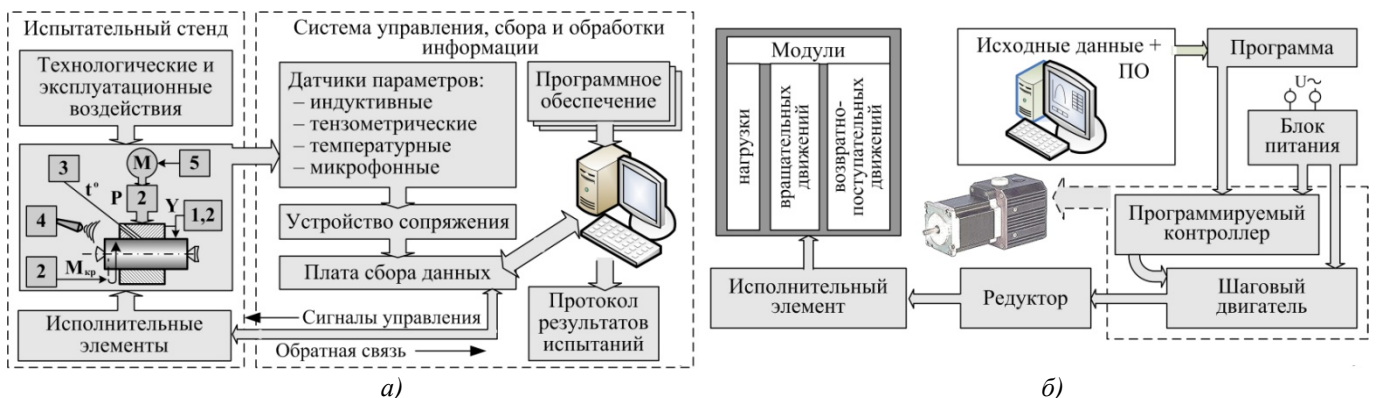


Рис. 5. Структура автоматизированной системы для исследования параметров ЭС соединений деталей машин (а) и автоматизированного привода управления модулями испытательных стендов при диагностике ТС по параметрам ЭС поверхностей деталей (б): 1, 2, 3, 4 – индуктивные, тензометрические, температурные и микрофонные датчики; 5 – исполнительные элементы приводов устройств моделирования воздействий

программного контроллера (ЕМС 2 или др.) и вводится в энергонезависимую память контроллера (контроллер СПШ 10 имеет 8 банков программ). От СПШ механическое воздействие через редуктор передаётся на исполнительный элемент одного из модулей ИС.

Такой компьютеризированный привод при высокой мобильности обладает широкими возможностями моделирования внешних воздействий на диагностируемое соединение: реализация различных законов изменения скоростей относительного скольжения трибоэлементов как при вращательном, так и при возвратно-поступательном движении; приложение как статических, так и динамических нагрузок на соединение. Последнее особенно важно при диагностике ТС по параметрам контактной жёсткости соединений обрабатываемых поверхностей.

Технологическим системам, как и всем техническим системам вообще, свойственны различные виды отказов. В соответствии с ГОСТ 27.004-85 для технологических систем характерны параметрические отказы, отказы по параметрам качества продукции, функциональные отказы и др. Одним из основных показателей надёжности технологического процесса в целом является надёжность отдельных операций по регламентируемым параметрам качества, т.е. их параметрическая надёжность. Это особенно касается чистовых и финишных операций, так как они являются определяющими в формировании окончательного качества обработанной поверхности детали.

Методы оценки надёжности технологических систем по параметрам качества изготавливаемой продукции в отраслях машиностроения регламентированы ГОСТ 27.202-83.

Одним из критериев отказа ТС является выход одного из регламентируемых показателей качества обрабатываемой детали, указанных в конструкторской и технологической документации, за допустимые пределы.

Важнейшим показателем безотказности ТС по i -му параметру качества является вероятность выполнения задания, которая определяется на основе выражения

$$P\{E_{ij} \leq y_j(t) \leq E_{sj}\} \leq P_f(t). \quad (3)$$

Вероятность обеспечения ТС одновременно всех m параметров определяется следующим образом:

$$P\{E_{i1} \leq y_1(t) \leq E_{s1}; E_{i2} \leq y_2(t) \leq E_{s2}; \dots; E_{im} \leq y_m(t) \leq E_{sm}\} = P(t), \quad (4)$$

где E_{ij}, E_{sj1} – нижнее и верхнее предельные отклонения для i -го параметра, установленные нормативно-технической документацией соответственно; $y_j(t)$ – значения j -го параметра в момент t . При этом наработка T может измеряться в единицах времени, циклах функционирования или в единицах изготовленной продукции.

Таким образом, целями расчёта параметрической надёжности ТС может быть:

1. Определение надёжности выполнения задания по одному показателю качества. Задача сводится к расчёту вероятности того, что изготавливаемая продукция по одному определённому параметру будет соответствовать требованиям конструкторско-технологической документации;

2. Определение надёжности выполнения задания по группе или всей совокупности нормируемых показателей качества. Задача сводится к расчёту вероятности того, что технологический процесс обеспечит изготовление продукции в соответствии с требованиями её технической документации по показателям качества изготавливаемой продукции;

3. Расчёт вероятности выполнения задания по параметрам производительности. В этом случае вероятность выполнения задания рассчитывается только по параметрам производительности. Показатели качества изготавливаемой продукции не рассматриваются в предположении, что все они будут обеспечены.

При оценке надёжности ТС по параметрам качества за критерий отказа следует принимать выход за заданный уровень только тех параметров, значения которых регламентированы конструкторско-технологической документацией (ГОСТ 27.203-83).

Если в моделях (1) и (2) случайными величинами являются только коэффициенты β_0 и β_i, k_0 и k_i , то с учётом свойств математического ожидания и дисперсии случайной величины можно получить следующие выражения для оценок $M\{Y_{i0}\}$ и $S^2\{Y_{i0}\}$:

– для моделей вида (1):

$$M\{Y_{i0}\} = M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i M\{\beta_i\}, \quad (8)$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = S^2\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i^2 S^2\{\beta_i\}, \quad (9)$$

– для моделей вида (2):

$$M\{Y_{i0}\} = \exp(\ln M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k \ln X_i \cdot M\{\beta_i\}), \quad (5)$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = \exp(\ln(S^2\{\beta_0\}) + \sum_{i=1}^k (\ln X_i)^2 \cdot S^2\{\beta_i\}). \quad (6)$$

Если же в моделях (1) и (2) случайными являются один или несколько факторов обработки X_i , то для оценок $M\{Y_{i0}\}$ и $S^2\{Y_{i0}\}$ аналитические выражения найти не удастся. Их определение связано с обработкой массива данных Y_{iN} , полученных в результате машинного эксперимента (МЭ) путем N прогонов соответствующих имитационных моделей по схеме Монте-Карло.

Таким образом, в структуре определения параметрической надёжности ТС (рис. 6) можно выделить два этапа:

- построение и анализ имитационных моделей формирования параметров качества обрабатываемых деталей в рассматриваемой ТС (блоки 2 – 8);
- расчёт показателей параметрической надёжности ТС (блоки 9 – 10).

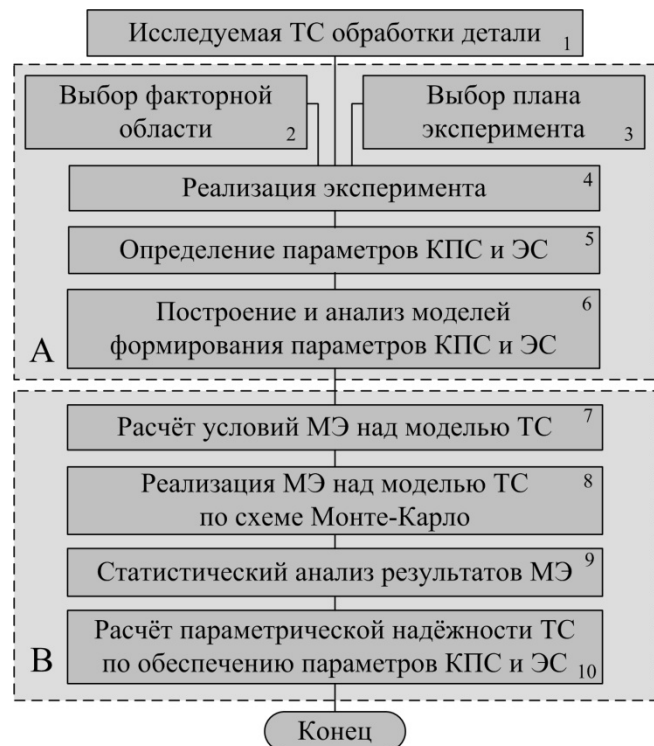


Рис. 6. Блок-схема определения параметрической надёжности ТС по обеспечению параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин

Детально этапы определения параметрической надёжности ТС рассмотрены в работе [3]. Далее (рис. 7) определяется вероятность выполнения задания по зависимостям (7), (8). В случае двухстороннего ограничения на параметр Y_i используется зависимость (7), а в случае одностороннего – (8).

$$P\{Y_{i\min} < Y_i < Y_{i\max}\} = \Phi\left(\frac{Y_{i\max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right) - \Phi\left(\frac{Y_{i\min} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right); \quad (7)$$

$$P\{Y_i < Y_{i\max}\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{Y_{i\max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right). \quad (8)$$

При исследовании параметрической надёжности ТС, в том числе методом имитационного моделирования на статистических моделях, следует иметь в виду, что моделируется только «прошлое», т.е. при этом используются данные, полученные экспериментально на этапе получения имитационных моделей. Следовательно, чтобы прогноз, сделанный на основе имитационного моделирования или другим способом, оправдался, необходимо предположить, что основная форма распределения параметров технологического процесса во времени остаётся неизменной, и его особенности, относящиеся к определённому промежутку времени, будут повторяться. Такие допущения следует принять для нормально функционирующего технологического процесса. На случаи внезапных отказов ТС результаты исследований параметрической надёжности не распространяются.

Каждая ТС имеет свои особенности в плане формирования обрабатываемой поверхности и её показателей качества. Эти особенности определяются не только технологической сущностью системы и происходящими в ней физическими процессами взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, но и физическим состоянием самой ТС, обусловленной продолжительностью и условиями эксплуатации, качеством технологического обслуживания, износом и другими факторами. В связи с этим, рекомендации и модели формирования параметров КПС и ЭС для тех или иных методов обработки, имеющиеся в научной и справочной литературе, могут оказаться неактуальными для конкретной ТС в конкретных условиях и требовать уточнения.

При этом возникает необходимость технической диагностики ТС по параметрам КПС и ЭС обрабатываемых поверхностей для каждой единицы оборудования, входящего в технологический цикл, даже если они являются ТС одной и той же модели. Чтобы справиться с таким объёмом диагностики и обеспечить её высокое качество и эффективность, необходима автоматизация этого процесса, предусматривающая применение стандартизированной

ванных или унифицированных измерительных средств и современных информационных тех-

нологий.

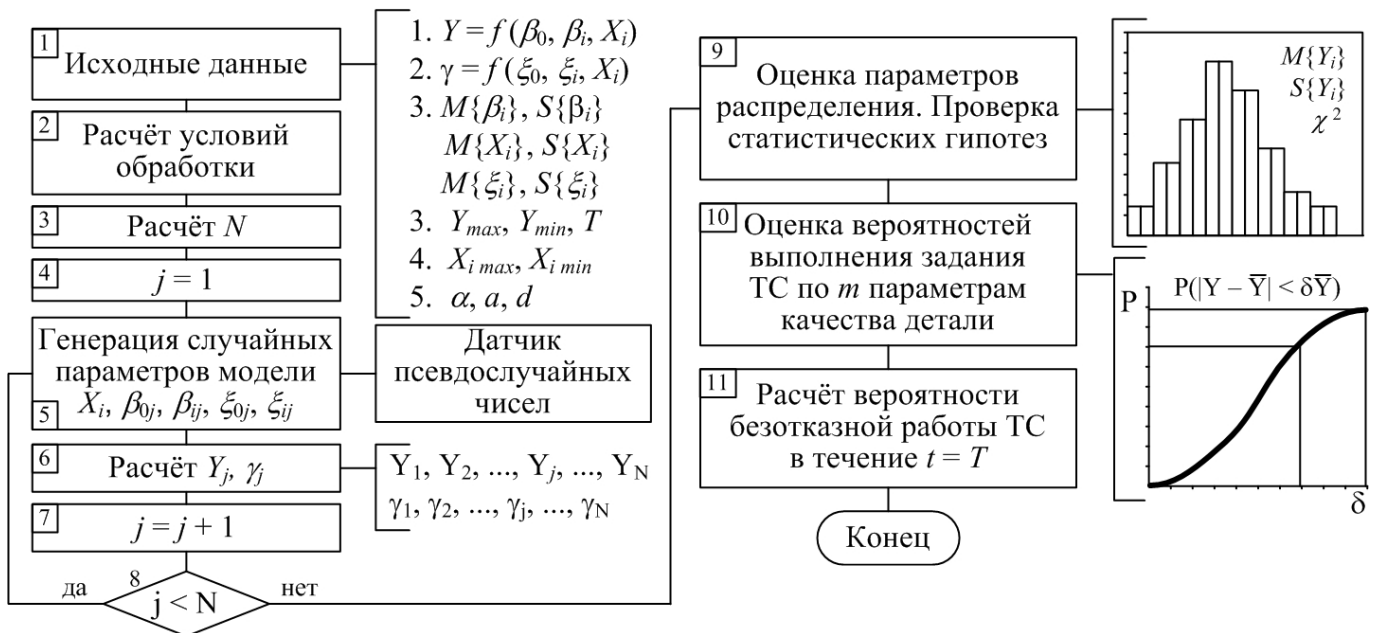


Рис. 7. Блок-схема расчёта надёжности ТС по параметрам качества деталей с применением метода статистических испытаний (Монте-Карло)

Процесс автоматизированной диагностики ТС (ДТС) предполагает (рис. 8):

- автоматизацию обработки поверхностей деталей в соответствии с заданным планом (блоки А, В);
- измерение параметров КПС (С1 И С2) и ЭС (С3) с применением информационно-измерительных систем (ИИС) на базе компьютера ПК2 (блок С);

– общее управление процессом ДТС, обработку и статистический анализ результатов диагностики с выдачей соответствующих протоколов расчета (блок D).

Диагностику ТС целесообразно осуществлять путём реализации активного эксперимента программным способом, что даёт возможность получить физико-статистические модели формирования параметров КПС и ЭС в зависимости от условий обработки.

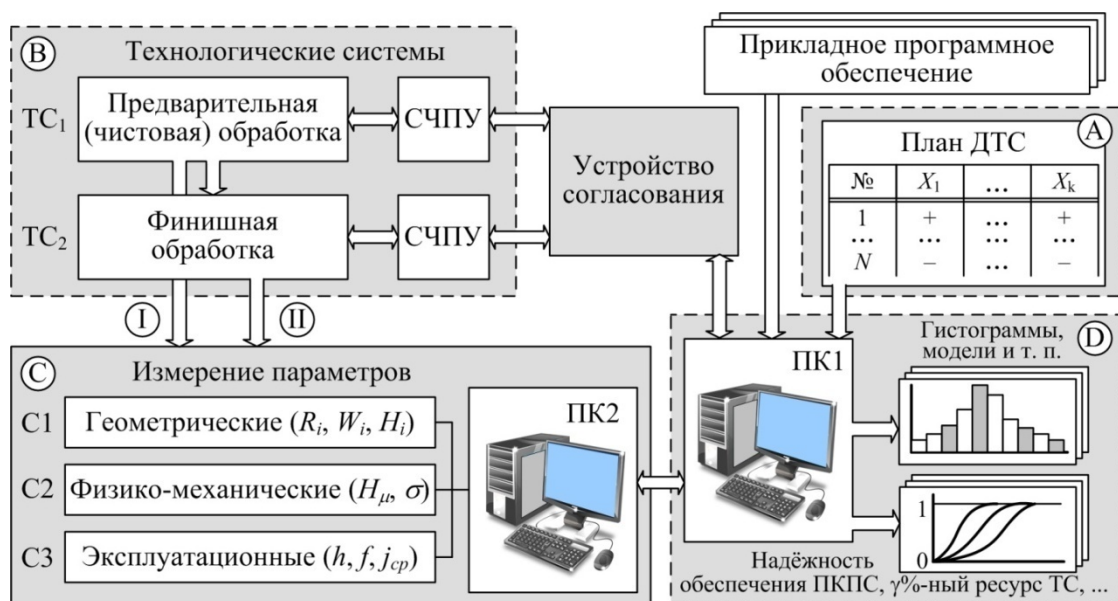


Рис. 8. Структура автоматизированной системы диагностики ТС программным способом на базе ПК:

А – блок планирования; В – блок обработки поверхности образцов-свидетелей;

С – измерительный блок; D – блок обработки результатов

Процесс ДТС осуществляется за несколько этапов (см. рис. 8).

1 этап – в блоке А формируется план эксперимента, который предполагает производить диагностику ТС при вариации необходимого числа факторов обработки, среди которых могут быть как количественные (режимы обработки, параметры качества поверхностей, полученные на предыдущей стадии обработки и др.), так и качественные (метод обработки, тип применяемого инструмента, тип СОТС и т.п.). Задаются факторы (X_i), допустимые границы факторного пространства ($x_{i \max}$, $x_{i \min}$), а также тип плана эксперимента в виде полного факторного эксперимента (ПФЭ), при небольшом числе факторов ($i \leq 4$) или дробного факторного эксперимента в виде полу- или четверть реплик от ПФЭ при большом числе факторов.

2 этап – в блоке В выполняется обработка поверхностей деталей в соответствии с планом ДТС оператором вручную или в автоматизированном режиме для ТС с ЧПУ. В этом случае режимы обработки в соответствии с выбранным планом передаются от ПК1 в соответствии с планом ДТС через устройство согласования в систему числового программного управления (СЧПУ) станка (ТС1 или ТС2), на котором ведется обработка. Если диагностируются ТС, то план ДТС задаётся непосредственно в управляющую ЭВМ, входящую в состав устройства. При использовании оборудования с ЧПУ, имеющим возможность смены инструмента, предварительная (чистовая) и финишная обработка могут осуществляться в одной рабочей зоне, т.е. ТС1 и ТС2 совмещены на одной и той же единице оборудования.

3 этап – в блоке С выполняется измерение параметров КПС (ПКПС) и ЭС (ПЭС) поверхностей образцов с применением рассмотренных ранее стационарных и мобильных измерительных систем. Параметры качества измеряются по двум каналам: I – после предварительной (чистовой) обработки; II – после финишной обработки. Такой подход позволяет уточнить влияние технологической наследственности на формирование ПКПС. Измеряются геометрические параметры качества (С1), физико-механические свойства (С2) и осуществляется диагностика обработанной поверхности по параметрам лимитирующих эксплуатационных свойств (чаще по износостойкости, контактной жёсткости) (С3).

Измерительные системы работают под управлением компьютера ПК2, который па-

раллельно осуществляет сортировку, оперативную обработку информации, создание баз данных и передачу результатов в ПК1 для дальнейшего анализа.

Подсистема измерения в целом и её отдельные компоненты могут использоваться автономно, что является их преимуществом перед специализированными измерительными комплексами.

4 этап – В блоке D осуществляется окончательная обработка результатов измерений, полученных в блоке С, и получение уточнённых физико-статистических моделей формирования требуемых ПКПС и ПЭС для конкретной ТС для диагностируемого этапа её жизненного цикла. Подсистема D управления, математической обработки данных и выдачи результатов диагностики со специальным математическим и программным обеспечением является ядром метода ДТС.

Выходные данные могут быть представлены в различной форме: в виде физико-статистических моделей формирования ПКПС в ходе обработки, в виде гистограмм и законов распределения ПКПС и ПЭС, в форме табличной базы данных по обеспечению ПКПС и данных по параметрической надёжности исследуемой ТС и др.

Результаты ДТС в виде моделей (1) и (2) уточняют имеющуюся в справочной и научной литературе информацию технологического характера по тому или иному методу обработки в плане обеспечения конкретных параметров качества, применительно к конкретной технологической системе, в которой непосредственно будет осуществляться обработка. Так как диагностика ТС проводится в суженной области факторного пространства, продиктованной условиями конкретного производства, адекватность полученных для неё в результате диагностики моделей, выше адекватности моделей, полученных в идеализированных лабораторных условиях.

Важность такого подхода особенно очевидна при разработке технологии производства деталей с повышенными требованиями к качеству функциональных поверхностей.

На основе реализации предложенного комплексного подхода к эксперименту в технологии машиностроения проведено множество исследований ТС (обработка резанием, отделочно-упрочняющая обработка методами ППД, комбинированные антифрикционные методы обработки и др.). Теоретически обоснована и реализована возможность программного обеспечения заданного закона изменения

ПКПС по обрабатываемой поверхности деталей машин, работающих в нестационарных условиях эксплуатации, с целью обеспечения их равномерной износостойкости [3].

Получены результаты в виде адекватных физико-статистических моделей формирования ПКСП (геометрические и физико-механические) и ПЭС (триботехнические характеристики поверхностей и соединений деталей, показатели коррозионной стойкости поверхностей и др.), графических и табличных баз данных по обеспечиваемым значениям ПКПС и ПЭС, и параметрической надёжности ТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжов, Э.В., Суслов, А.Г., Фёдоров, В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 174 с.
2. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение. 2006. – 447 с.
3. Нагоркин, М.Н. Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов: Монография / под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 304 с.
4. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
5. Аверченков, В.В., Фёдоров, В.П., Нагоркин, М.Н. Новые подходы к автоматизации технологических исследований на основе виртуальных измерительных комплексов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2005. – № 1(5). – С. 64-75.
6. Пыриков, И.Л., Третьяков, В.В., Федоров, В.П. Компьютеризированная система измерений параметров шероховатости и волнистости поверхностей деталей машин с использованием виртуальных приборов // Научные технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016)/ Матер. VIII междунар. научно-техн. конф. МАДИ. – 2016. – С. 187-189.
7. Нагоркин, М.Н., Пыриков, И.Л., Третьяков, В.В., Федоров, В.П. Диагностика технологических систем по качеству и эксплуатационным свойствам обрабатываемых поверхностей деталей машин с применением современных компьютерных технологий // Научные технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016) / Матер. VIII междунар. научно-техн. конф. МАДИ. 2016. С. 130-133.
8. Фёдоров, В.П., Нагоркин, М.Н., Пыриков, И.Л., Ивахненко, А.Г., Федяева, Г.А., Потапов, Л.А. Автоматизация диагностики технологических систем по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – № 1(33). – С. 85-94.

9. Фёдоров, В.П., Нагоркин, М.Н., Пыриков, И.Л. Технологические и метрологические аспекты адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации в процессе изготовления // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 10. – С. 8-15.

10. Фёдоров, В.П., Финатов, Д.Н., Хандожко, В.А. Автоматизированные системы научных исследований в инженерии поверхностей деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. – 2007. – № 3. – С. 18-22.

REFERENCES

1. Ryzhov, E.V., Syslov, A.G., Fyodorov, V.P. *Technological Support of Machinery Operation Properties*. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 174.
2. *Technological Support and Operation Properties Increase of Parts and Their Units* / A.G. Suslov, V.P. Fyodorov, O.A. Gorlenko [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering. 2006. – pp. 447.
3. Nagorkin, M.N. *Parametrical Reliability of Technological Systems for Machinery Finishing and Finish-Strengthening with Super-Hard Synthetic Tools*. Monograph / under the editorship of A.V. Kirichek. – М.: “Spectrum” Publishers, 2017. – pp. 304.
4. *Parts Surface Engineering* / authors’ group; under the editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
5. Averchenkov, V.V., Fyodorov, V.P., Nagorkin, M.N. New approaches to engineering investigation automation based on virtual measuring complexes // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2005. – No. 1(5). – pp. 64-75.
6. Pyrikov, I.L. Tretiyakov, V.V., Fyodorov, V.P. Computerized system for measuring roughness and corrugation of machinery surfaces using virtual devices // *Science Intensive Technologies at Current Stage of Mechanical Engineering Development (TM-2016)/ Proceedings of the VIII-th Inter. Scientific Pract. Conf. of MADI*. – 2016. – pp. 187-189.
7. Nagorkin, M.N. Pyrikov, I.L., Tretiyakov, V.V., Fyodorov, V.P. Diagnostics of technological systems on quality and operation properties machinery surfaces worked using updated computer technologies // *Science Intensive Technologies at Current Stage of Mechanical Engineering Development (TM-2016) / Proceedings of the VIII-th Inter. Scientific Tech. Conf. of MADI*. 2016. – pp. 130-133.
8. Fyodorov, V.P., Nagorkin, M.N., Pyrikov, I.L., Ivakhnenko, A.G., Fedyayeva, G.A., Potapov, L.A. Automation of technological system diagnostics on quality surface parameters in parts worked // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2012. – No. 1(33). – pp. 85-94.
9. Fyodorov, V.P., Nagorkin, M.N., Pyrikov, I.L. Technological and metrological aspects of machinery surface adaptation to uncommon operation conditions during manufacturing // *Reference Book. Engineering*. – 2009. – No. 10. – pp. 8-15.
10. Fyodorov, V.P., Finatov, D.N., Khandozhko, V.A. Automated systems of scientific researches in machinery surface engineering // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2007. – No.3. – pp. 18-32.

Рецензент д.т.н. Е.С. Киселев