

УДК 621.9

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-36-50

В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, Л.Г. Вайнер

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассматриваются основы методологии определения параметрической надежности технологических систем (ТС) металлообработки по обеспечению параметров качества обрабатываемых поверхностей деталей машин, включающие теоретические предпосылки, экспериментальные исследования и применяемые методы анализа данных на основе физико-статистического и имитационного моделирования. С единых методологических позиций рас-

крываются сущность каждого из блоков предлагаемой схемы диагностики ТС по указанному критерию. Особое внимание уделяется выбору ТС, организации, проведению и анализу результатов эксперимента.

**Ключевые слова:** модели, параметры, качество, диагностика, задание, имитационное моделирование.

V.P. Fedorov, M.N. Nagorkin, L.G. Vainer

## METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DIAGNOSTICS OF METALWORKING TECHNOLOGICAL SYSTEMS ACCORDING TO PARAMETRIC RELIABILITY OF ENSURING A GIVEN QUALITY OF THE TREATED SURFACES

The paper presents the results of research justifying the need for diagnostics of metalworking technological systems on the reliability of ensuring the quality parameters of the surfaces of machine parts during machining. The fundamentals of the methodology of its implementation have been developed. Theoretical models of forming the quality parameters of parts surfaces during machining are considered and refined. This characterizes the scientific novelty of the results obtained. Circuitries for the construction of experimental control systems when conducting bench tests of machined surfaces of parts in conditions close to operational are of practical value. Circuitries are developed and computerized systems based on them for measuring the quality parameters of machined parts surfaces,

including the working area of the technological system, are implemented. Recommendations on the rational choice of technological systems and the use of simulation methods in the study of parametric reliability of technological systems are presented. Mathematical and software analysis and processing of experimental results are developed and tested. These results will serve as a foundation for further development of research in the field of parametric reliability of technological systems, improving the quality of domestic engineering products and increasing their competitiveness at the world market.

**Key words:** models, parameters, quality, diagnostics, task, simulation modeling.

### Введение

Одним из главных показателей машиностроительной продукции, является качество – способность удовлетворять запросы потребителя на всех этапах её жизненного цикла. Качество продукции – это комплексное свойство, включающее совокупность показателей, регламентированных рядом стандартов (ГОСТы, раздел 4 – система показателей качества продукции и др.). Одним из важнейших показателей качества

является надёжность, определяющая эффективность функционирования технических систем. В связи с этим, обеспечение надёжности технических объектов – одна из актуальнейших проблем современного машиностроения.

Надёжность изделия в целом и отдельной детали в частности закладывается при проектировании и расчёте (задача конструктора) и обеспечивается при изготов-

лении (задача технолога), а реализуется при эксплуатации, когда на её показатели дополнительное влияние оказывают условия эксплуатации, режимы работы, принятые системы ремонта и обслуживания. Таким образом, в обеспечении качества и надежности машин и механизмов определяющую роль играет конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП). Задачи конструктора и технолога имеют следующие цели.

1. Задача конструктора. Помимо сведений, предусмотренных ЕСКД, в конструкторской технической документации конструктор должен назначить: а) требуемые номинальные значения одного или нескольких параметров эксплуатационных свойств (ПЭС) изделия (детали) с допустимыми интервалами их варьирования и минимально допустимую вероятность  $P_{min}$  выполнения этих требований; б) один или несколько интервальных значений параметров качества поверхностного слоя (ПКПС) детали (шероховатость, макроот-

клонения, волнистость, физико-механические свойства и др.) с максимально допустимыми диапазонами их варьирования и минимально допустимыми вероятностями  $P_{min}$  выполнения этих требований, обеспечивающих заданные ПЭС функциональной поверхности детали.

2. Задача технолога. В рамках разработки технологического процесса обработки детали, выполняемой в соответствии с требованиями ЕСТД, технолог определяет технологическую систему (ТС) для выполнения чистовых и финишных операций обработки деталей, которые, в основном, позволяют окончательно обеспечить показатели качества поверхности, и назначает условия обработки, обеспечивающие требуемые параметры  $Y_j(t)$  обрабатываемой поверхности (ПКПС или ПЭС) в допустимых интервалах с заданной или более высокой вероятностью  $P_j(t)$  выполнения заданий технической документации по обеспечению  $j$ -того параметра:

$$P\{E_{ij} \leq Y_j(t) \leq E_{sj}\} = P_j(t) \geq [P_{min}]. \quad (1)$$

Если требуется обеспечить одновременно  $m$  параметров, то (ГОСТ 27.202-83):

$$P\{E_{i1} \leq Y_1(t) \leq E_{s1}; E_{i2} \leq Y_2(t) \leq E_{s2}; \dots; E_{im} \leq Y_m(t) \leq E_{sm}\} = P(t). \quad (2)$$

Здесь  $E_{ij}$ ,  $E_{sj1}$  – допустимые нижнее и верхнее предельные отклонения значений  $i$ -го параметра качества;  $Y_j(t)$  – значения  $j$ -го параметра в рассматриваемый момент времени  $t$ .

Технологические задачи могут решаться на основе применения аналитических зависимостей, учитывающих взаимосвязь между входными факторами и выходными параметрами рассматриваемых технологических систем, которые получены в результате анализа физических процессов, протекающих в ТС, и их физико-аналитических и физико-статистических моделей, полученных методами планирования эксперимента, множественного корреляционно-регрессионного анализа и др. [1, 2, 3].

Таким образом, функциональные взаимосвязи параметров ТС можно описать зависимостями:

$$\bar{Y}_1 = F_1\{\bar{X}_1\}, \quad (3)$$

$$\bar{Y}_2 = F_2\{\bar{X}_2, \bar{Y}_1\}, \quad (4)$$

или

$$\bar{Y}_2 = F_3\{\bar{X}_1, \bar{X}_2\}, \quad (5)$$

где  $\bar{Y}_1$  – множество выходных параметров ТС (ПКПС);  $\bar{X}_1$  – множество входных факторов ТС, учитывающих условия обработки деталей, включая режимы обработки, факторы технологического наследования и т.п.;  $\bar{Y}_2$  – множество выходных параметров, определяющих ПЭС обработанных в ТС деталей;  $\bar{X}_2$  – множество факторов, учитывающих реальные условия эксплуатации обработанной детали (величина контактной нагрузки на поверхность детали, скорость относительного скольжения поверхностей соединений и др.).

В процессе КТПП при выборе различных методов обработки деталей могут использоваться зависимости (3–5), которые имеются в научной и справочной литературе, но нередко они могут оказаться не-

актуальными для проектируемых технологических операций, что объясняется следующими причинами.

1. Обычно в моделях формирования ПКПС и ПЭС обрабатываемых в ТС деталей не учитывается фактор времени эксплуатации ТС, то есть не учитывается влияние её реального физического состояния на процесс формирования параметров качества. Поэтому, возможно, адекватность таких моделей для ТС с длительным функционированием будет неизвестна, что не позволяет оценить вариацию обеспечиваемого в процесс обработки параметра качества.

2. Физико-статистическое моделирование процессов формирования ПКПС и ПЭС деталей в ТС осуществляется экспериментально на конкретном оборудовании с характерными только для него техническими показателями, определяющими собственный «технологический почерк». В связи с этим применение таких моделей и полученных на их основе рекомендаций для других аналогичных ТС, имеющих свои технические характеристики, не позволит обеспечить точных прогнозов по выполнению заданий в проектируемых ТС.

3. В технической документации на технологическое оборудование отсутствует информация о параметрической надёжности ТС по показателям качества поверхностей обрабатываемых деталей. Это связано с тем, что она определяется фактора-

ми, учитывающих вид инструмента, типы приспособлений, конструктивные особенности обрабатываемой заготовки и др., что в совокупности с оборудованием и составляет ТС.

Таким образом, зависимости (3–5) носят вероятностный характер, так как значительная часть входящих в них параметров являются случайными величинами.

Для решения задачи обеспечения требуемых значений параметров качества обрабатываемой поверхности (ПКПС или ПЭС) с заданной вероятностью выполнения заданий требуется диагностика ТС (ДТС) с определением ее параметрической надёжности. Рекомендуется проводить: 1) приемную диагностику ТС для оборудования, вводимого в эксплуатацию; 2) периодическую плановую диагностику ТС для требуемых условий эксплуатации, позволяющую учесть реальное физическое состояние ТС и уточнить её текущую параметрическую надёжность.

Предлагается общая методология проведения ДТС по надёжности обеспечения ПКПС и ПЭС поверхностей деталей машин (рис. 1). Методология включает наличие двух этапов исследования: построение и анализ моделей формирования ПКПС или ПЭС (этап I) и расчёт показателей параметрической надёжности ТС (этап II) [4 – 8].

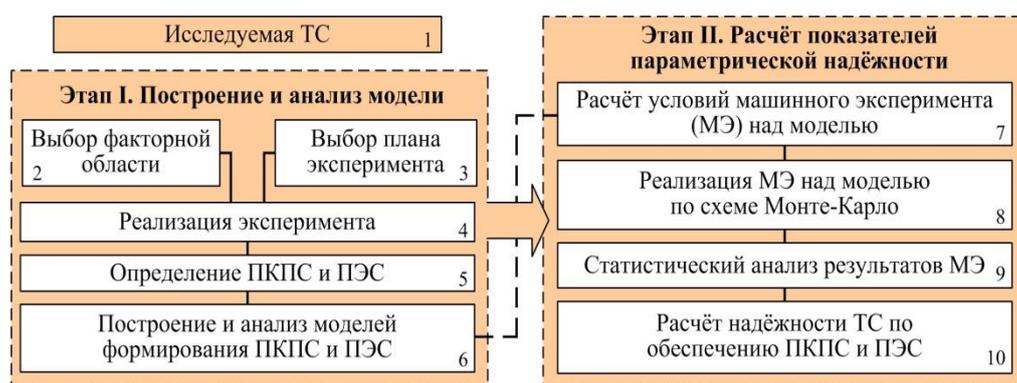


Рис. 1. Схема общей методологии определения параметрической надёжности ТС обработки деталей

Установлено, что с достаточной точностью для количественного анализа результатов формирования ПКПС или ПЭС при обработке деталей в ТС можно с успе-

хом использовать полиномиальные (аддитивные) модели (6) или модели в виде функции Кобба-Дугласа (мультипликативная модель) (7):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \tag{6}$$

$$Y_i = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_k^{\beta_k}. \tag{7}$$

где  $Y_i$  –  $i$ -ый параметр качества поверхностного слоя детали после обработки;  $\beta_0$ ,  $\beta_i$  – истинные значения коэффициентов регрессии, являющиеся случайными нормально-распределенными величинами с математическими ожиданиями  $M\{\beta_0\} = b_0$  и  $M\{\beta_i\} = b_i$  ( $b_0, b_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) – коэффициенты регрессии, получаемые при обработке результатов эксперимента) и среднеквадратическими отклонениями  $S\{\beta_0\}$ ,  $S\{\beta_i\}$  ( $i = 1, \dots, k$ ;  $k$  – число факторов);

Модели (6), (7) представляют собой приближённое описание взаимосвязей входных и выходных факторов ТС. Их недостаток – низкая точность и отсутствие адекватного отклика на изменяющиеся условия процессов, моделируемых при определении технологических возможностей ТС. Модели (6) и (7) рекомендуется использовать для исследований устойчиво протекающих процессов.

В исследованиях надёжности различных ТС распространены случаи нелинейных зависимостей между факторами обработки и исследуемыми параметрами при наличии линейных зависимостей между их логарифмами. Типичными являются примеры, представленные на рис. 2 [7]. Случайными переменными  $\bar{Y}$  являются: 1) величина  $\eta$  относительной опорной длины

микропрофиля поверхности; 2) величина  $Y_k$  контактных деформаций в стыке поверхностей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  под действием нормальной нагрузки  $Q$ ; 3) величина линейного износа  $h$  поверхности  $\Pi$  детали 1 при её скольжении по поверхности детали 2 со скоростью  $V$  под действием нагрузки  $Q$ . К независимым переменным  $x$  относятся: 1) относительное расстояние  $\varepsilon$  от линии выступов до рассматриваемого уровня профиля шероховатости; 2) номинальное давление  $q$  в стыке контактирующих поверхностей деталей; 3) длина  $L$  пройденного пути в процессе трения скольжения соединений.

Все графические зависимости, характеризующие взаимосвязи переменных  $\bar{Y}$  и  $x$  для рассматриваемых случаев можно аппроксимировать кривой (рис. 2), являющейся случайной функцией независимых переменных в виде уравнения регрессии для среднего значения (8):

$$\bar{Y} = b_0 X^{b_1}. \tag{8}$$

Линеаризация уравнения (8) логарифмированием позволяет получить линейную функцию (9), соответствующую модели (6):

$$\ln \bar{Y} = \ln b_0 + b_1 \ln X. \tag{9}$$

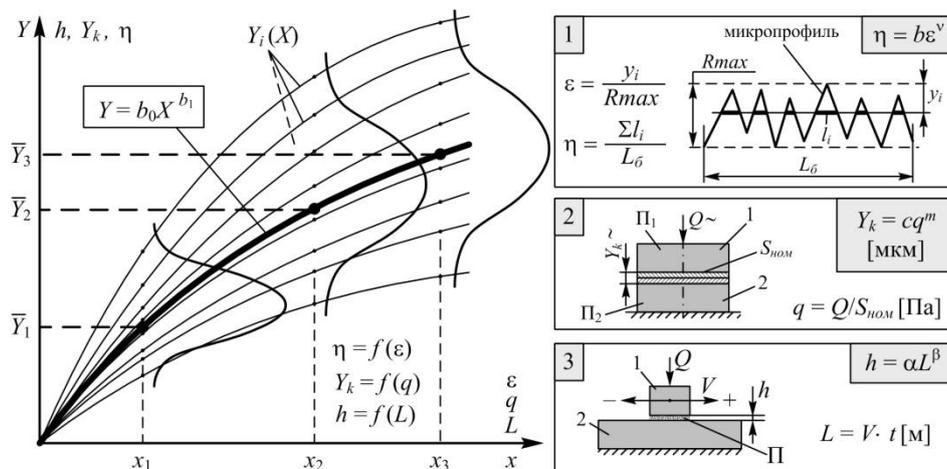


Рис. 2. Инвариантность аппроксимации степенными функциями некоторых свойств поверхности и процессов различной физической природы в технологических исследованиях: 1 – относительная опорная длина профиля; 2 – контактная податливость стыка под действием нагрузки; 3 – величины линейного износа

Обработывая экспериментальные данные для логарифмов результатов и факторов, получаем (9), а после потенцирования модель в виде (7).

Для построения моделей формирования параметров качества детали в ТС, анализа их адекватности и статистической значимости выбранных факторов предлагается проводить экспериментальные испытания ТС, базирующиеся на методах теории планирования эксперимента и корреляционно-регрессионного анализа [1–3].

Проведение эксперимента целесообразно осуществлять на основе комплексного подхода к исследованию ТС, сущность которого состоит в том, что ПКПС рас-

сматриваются во взаимосвязи с условиями эксплуатации обработанной детали (рис. 3). На первом этапе исследований после постановки задачи и определения ТС обработки осуществляют планирование активного эксперимента. При этом назначаются входные факторы  $M_i$  ТС:  $M_1$  – ПКПС детали, полученные на предварительных этапах обработки (ПК<sub>1</sub>) или режимы обработки на предварительных этапах, как факторы технологической наследственности, влияющие на формирование параметров качества поверхности (ПК<sub>2</sub>);  $M_2$  – конструктивные характеристики инструмента;  $M_3$  – условия и режимы обработки деталей в ТС.

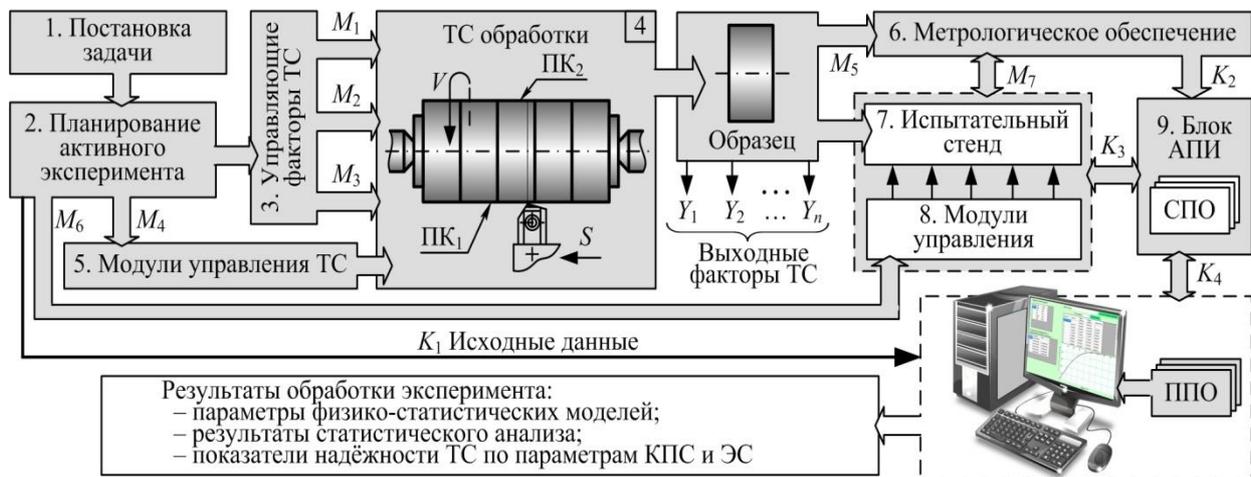


Рис. 3. Схема экспериментальных исследований технологических возможностей ТС металлообработки по обеспечению ПКПС и ПЭС поверхностей деталей

При выборе входных факторов ТС устанавливаются диапазоны их значений или другие виды вариаций с целью определения границ факторного пространства эксперимента. Этот вопрос решается на основе анализа априорной информации, опроса экспертов, экспериментально, интуитивно и др.

Для исследования ПЭС обработанных поверхностей деталей применяются испытательные стенды 7, управление которыми, а также передача данных экспериментов, осуществляются через компьютер с помощью средств аппаратно-программного интерфейса (АПИ).

Управление модулями 5 и 8 осуществляется в соответствии с планом эксперимента 2 автоматически или вручную за

счет введения элементов множеств  $M_4$  и  $M_6$ .

Если исследуется ТС с компьютерной системой ЧПУ, то осуществляется автоматизированная диагностика ТС программным способом (рис. 4) [5, 9 – 12]. Этот процесс включает четыре этапа:

1. На I-м этапе (рис. 4) определяется план эксперимента для диагностики ТС и необходимое число факторов обработки. Уровни варьирования факторов назначаются для каждого конкретного случая.

2. На II-м этапе в автоматизированном режиме проводится обработка поверхности образца. Возможно исследование двух последовательных ТС. В первой ТС1 в процессе предварительной обработки образцов обеспечиваются верхние (+) и нижние (–) уровни значений ПКПС. Обра-

ботка проводится в ТС с компьютерным ЧПУ, что позволяет проводить ее с применением параметрического программирования [5, 6]. Окончательная обработка образца осуществляется в ТС2 путем дальнейшей программной реализации плана обработки.

3. На III-м этапе осуществляются измерения ПКПС и ПЭС поверхностей обра-

ботанных образцов с применением компьютеризированных информационно-измерительных систем.

4. На IV-м этапе обработки результатов измерений с помощью специального программного обеспечения получают модели формирования ПКПС и ПЭС при обработке поверхностей деталей.



Рис. 4. Автоматизация диагностики ТС программным методом: I – этап планирования; II – этап обработки поверхностей деталей; III – этап измерения ПКПС и ПЭС; IV – этап обработки результатов ДТС

При исследовании и измерении ПЭС поверхностей обработанных деталей необходимо учитывать следующие факторы:

1) перечень измеряемых показателей эксплуатационных свойств определяется в зависимости от функционального назначения детали (износостойкость, контактная жёсткость, ударная выносливость и др.);

2) практически отсутствуют нормативные документы, регламентирующие способы определения и виды показателей большинства эксплуатационных свойств поверхностей. Имеются стандарты испытаний на надёжность, нормали (контактная жёсткость) или указания рекомендательного характера;

3) за исключением испытаний на выносливость практически отсутствуют стандартизованные методы и установки для определения эксплуатационных свойств поверхностей деталей.

Поэтому необходима разработка программ и методов автоматизированных испытаний поверхностей деталей по параметрам ЭС, которые можно проводить в рабочих зонах ТС (или рядом), а также унифицировать такие методы, которые позволят

использовать полученные результаты для сравнительной оценки и ранжирования исследуемых ТС по критериям, характеризующим технологические возможности обеспечения требуемых ПЭС.

При невозможности реализации исследований ПЭС в рабочей зоне ТС необходимо применение компьютеризированных испытательных стендов, построенных по модульному принципу [5, 13]. Например, при диагностике износостойкости поверхностей деталей соединений трения скольжения в автоматизированной системе исследований ЭС (рис. 5) основными модулями являются: модуль привода относительного скольжения, модуль нагрузки на соединение, измерительный модуль. Подобные системы включают средства аппаратно-программного интерфейса, адаптированные к условиям измерений различных ПЭС, которые должны устойчиво работать с различными типами датчиков регистрации и преобразования первичной информации, передавая её в управляющий модуль (компьютер) с минимальными искажениями.

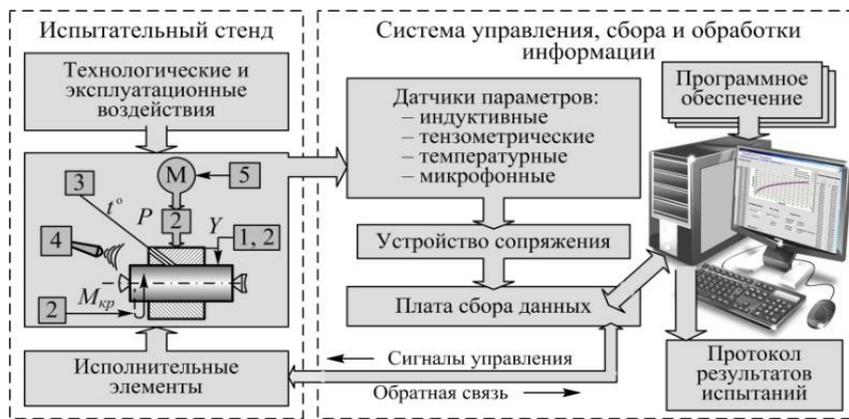


Рис. 5. Структура автоматизированной системы исследования ЭС поверхностей деталей соединений трения скольжения: 1, 2, 3, 4 – индуктивные, тензометрические, температурные и микрофонные датчики; 5 – исполнительные элементы приводов устройств моделирования эксплуатационных воздействий на поверхности трибоэлементов

Для управления модулями испытательных стендов целесообразно применять унифицированные приводы управления на базе силовых шаговых приводов (СШП) и программируемых контроллеров (например, шаговый сервопривод) [5, 13]. Управляющее воздействие от сервопривода передается через редуктор на исполнительный элемент модуля, что обеспечивает требуемый вид эксплуатационного воздействия на поверхности деталей. Такой привод позволяет в процессе испытаний моделировать различные законы изменения скоростей относительного скольжения поверхностей деталей соединений при вращательном или возвратно-поступательном движении; приложение статических или динамических нагрузок на соединение и т.п.

Получение или уточнение моделей формирования ПКПС или ПЭС при различных видах обработки поверхностей и заданных условиях эксплуатации осуществляется после обработки информации, полученной в процессе обработки, испытаний и измерений. В соответствии с предложенной на рис. 3 схемой экспериментальных исследований передача информации осуществляется по следующим каналам:  $K_1$  – исходные данные планируемого активного эксперимента;  $K_2$  – результаты измерений ПКПС или ПЭС от устройств автономного действия (измерительные бло-

ки профилометров, микроскопов и др.);  $K_3$  – измерительные сигналы от испытательных стендов, снятые с измерительных датчиков (индуктивных, тензометрических, температурных и др.);  $K_4$  – передача информации через средства АПИ.

Надёжность и точность результатов измерений в процессе диагностики ТС программным способом определяют блоки сопряжения управляющего компьютера с датчиками измерительных систем или испытательных стендов. Они реализуются в виде технических средств аппаратно-программного интерфейса (АПИ) [5, 13]. В Брянском государственном техническом университете были разработаны различные модели средств АПИ, различного функционального назначения. Разработаны АПИ без оперативной памяти (АПИ-1) и со встроенной оперативной памятью (АПИ-2).

Средства АПИ-1 (рис. 6) для передачи информации об исследуемом процессе в ходе эксперимента требуют постоянной связи с ПК. Они применяются при проведении быстро протекающих экспериментов (измерение геометрических параметров качества поверхностей деталей, определение контактных сближений контактирующих поверхностей под нагрузкой и др.). В нем предусмотрено подключение тензометрических и индуктивных датчиков, а также датчиков температуры (термопар).

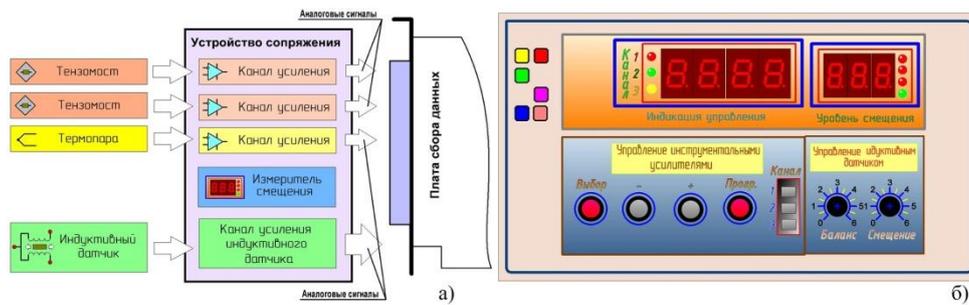
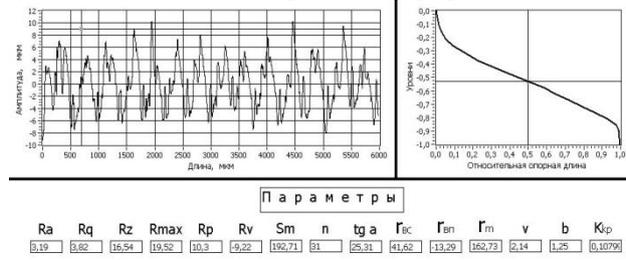


Рис. 6. а - блок-схема работы; б - лицевая панель устройства сопряжения АПИ-1

Разработанные средства АПИ-2 (рис. 7) наследует ряд возможностей АПИ-1, но имеет принципиальные отличия. В частности, можно автономно управлять балансировкой и работой приводов датчиков измерительных систем (например, профилографов). Блоки АПИ-2 оснащены мини-дисплеями, на которых отображается ин-



Рис. 7. Измерение шероховатости поверхности вала в рабочей зоне ТС под управлением блока АПИ и результаты измерений



На втором этапе ДТС (рис. 1), после получения моделей формирования ПКПС или ПЭС рассчитываются показатели параметрической надежности ТС. Расчет осуществляется методом имитационного моделирования методом статистических испытаний (Монте-Карло). Для этого необходимо:

- 1) определить условия проведения машинного эксперимента (МЭ) над моделями (6) или (7) для получения массивов данных по формированию ПКПС или ПЭС (рис. 1, блок 7);
- 2) реализовать МЭ в выбранной области факторного пространства (рис. 1, блок 8), используя соответствующие алгоритмы и программное обеспечение, и провести анализ результатов МЭ для определения вероятностных характеристик формирования выходных параметров моделируемой ТС (рис. 1, блок 9);
- 3) определить показатели параметри-

формация о режимах и результатах измерений, которые сохраняются в ячейках памяти. Передача данных в компьютер осуществляется через порт USB. Программное обеспечение АПИ-2 позволяет изменять и дополнять алгоритм расчета измеряемых параметров качества на основе полученной с датчиков измерения информации.

ческой надёжности формирования ПКПС или ПЭС детали в исследуемой ТС (рис. 1, блок 10) и сделать соответствующие выводы о её работоспособности в текущий момент.

Успешное решение такой задачи базируется на следующих теоретических положениях.

На рис. 8 представлена схема изменения параметров качества поверхностей деталей в процессе обработки. Выполнение технологического процесса осуществляется  $q$  ТС.

В качестве входных факторов  $Y_{ei}$  рассматриваются ПКПС, полученные на предыдущих этапах обработки, в качестве управляющих факторов  $X_{qj}$  – условия обработки. Параметры качества, полученные после окончательной обработки, являются выходными факторами  $Y_{qi}$ .

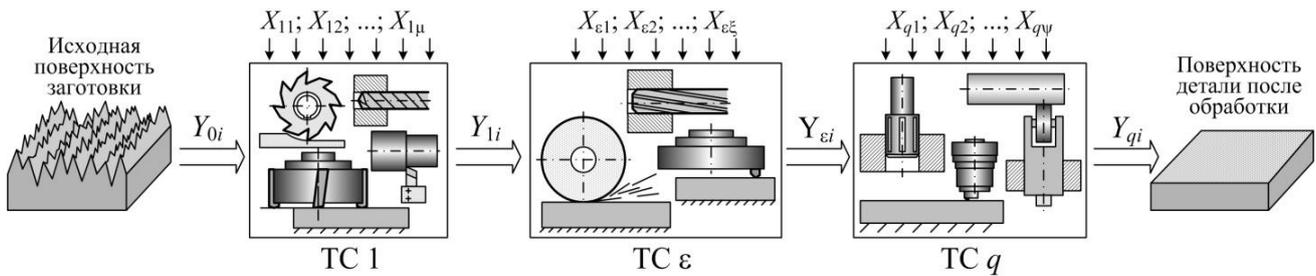


Рис. 8. Схема изменения параметров качества поверхностей деталей в процессе обработки

Эта схема соответствует модели формирования показателей надёжности техпроцесса, представленной на рис. 9 [14, 15].

В процессе обработки обеспечивается  $m$  значений параметров качества поверхности детали. Каждый параметр качества  $Y_{qi}$ , где  $i = 1 \dots m$ , должен соответствовать зависимости:

$$Y_i = \bar{Y}_i \pm \delta_i \bar{Y}_i. \quad (10)$$

где  $\bar{Y}_i$  – среднее значение  $i$ -го параметра качества;  $\delta_i$  – допустимое относительное отклонение параметра качества (регламентируются в технической документации).

Технологический процесс считается безотказным, если после  $q$ -й операции вероятность  $P_{qi}(t)$  выхода любого из параметров  $\bar{Y}_i$  за пределы допуска  $\delta$  в течение заданного времени является минимальной.

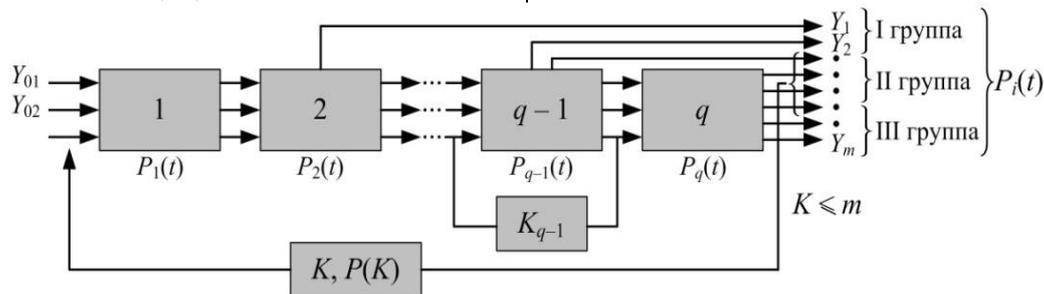


Рис. 9. Модель формирования показателей надёжности технологического процесса

Технологический процесс формирования параметров качества  $Y_{qi}$  представлен в виде прямой последовательности технологических операций. Но вероятность  $P_i(t)$  выполнения задания по обеспечению требуемых значений параметров качества не равна произведению вероятностей  $P_{ji}(t)$  выполнения задания каждой операцией (рис. 9):

$$P_i(t) \neq \prod_{j=1}^q P_{ji}(t) \quad (11)$$

Это обосновано следующими причинами [14, 15].

1. Окончательное формирование параметров качества происходит на чистовых и финишных операциях, а значения параметров качества, контролируемых на предыдущих операциях, изменяются на следующих операциях и их значение не играет существенной роли. Некоторые пара-

метры качества, контролируемые на промежуточных операциях, переходят в разряд выходных параметров техпроцесса (рис. 9, I группа). Исключением обычно являются показатели свойств материала детали, которые рассматриваются как входные параметры технологического процесса, но и значительно определяют его окончательные результаты.

2. Так как на этапах выполнения финишных операций происходит окончательное формирование показателей качества деталей, то большинство их выходных параметров  $Y_i$  определяют параметрическую надёжность технологического процесса (рис. 9, II группа).

3. На значения некоторых выходных параметров  $Y_i$  технологического процесса влияют результаты предыдущих технологических операций, что связано с технологической наследственностью (рис. 9, III

группа).

Параметрическая надежность отдельно взятой ТС определяется как вероятность выполнения задания для параметра

$$P\{Y_i \in (\bar{Y}_i \pm \delta \bar{Y}_i)\} \geq P_{min}, (i = 1 \dots m, 0 < \delta < 1). \quad (12)$$

Если условие (12) не выполняется, то ТС не имеет достаточной параметрической надежности и является неработоспособной по обеспечению требуемых ПКПС обрабатываемой детали.

Переход ТС из работоспособного состояния в неработоспособное (ГОСТ 27.004-85) рассматривается в связи с возникновением отказов по параметрам качества, которые являются постепенными в зависимости от времени, а поэтому могут быть с определенной вероятностью про-

гнозируемы и учтены. В качестве моделей формирования постепенных отказов ТС приняты процессы с линейным и экспоненциальным изменением во времени регламентируемого параметра качества  $Y$  (рис. 10), которые являются распространенными и типичными. В случае, представленном на рис. 10а, регламентируемый параметр  $Y$  в начальный момент эксплуатации ТС ( $t = 0$ ) имеет математическое ожидание  $Y_0$  и среднее квадратическое отклонение (СКО)  $\sigma_0$  [16].

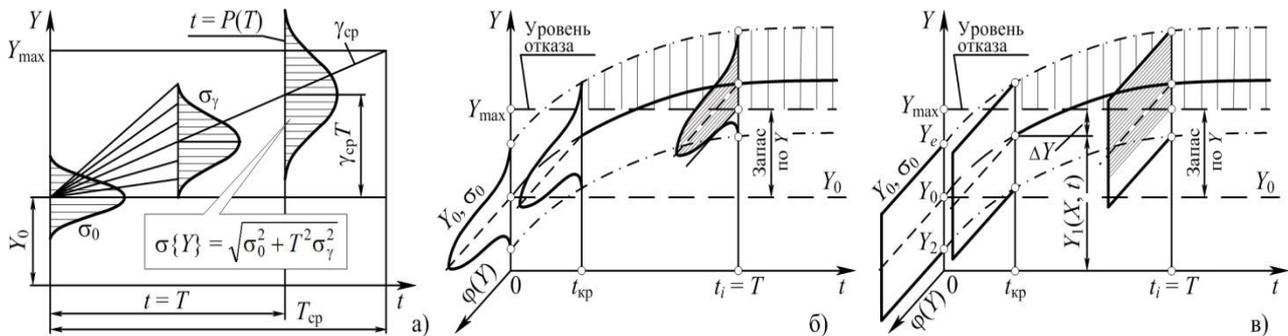


Рис. 10. Модели формирования постепенного отказа ТС при: а - линейном, б - экспоненциальном и в - равномерном изменениях параметра качества детали  $Y$

В случае нормального распределения случайных аргументов  $Y_0$  и скорости  $\gamma$  в любой момент времени  $t = T$  показатель качества  $Y$  будет иметь также нормальное распределение с параметрами:

$$M\{Y\} = Y_0 + \gamma_{cp}T, \quad (13)$$

$$\sigma\{Y\} = \sqrt{\sigma_0^2 + T^2\sigma_\gamma^2}, \quad (14)$$

где  $\sigma_\gamma$  – СКО скорости. Вероятность безотказного функционирования ТС ( $Y \leq Y_{max}$ ) в течение времени  $t = T$  определяется соотношением:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{Y_{max} - Y_0 - \gamma_{cp}T}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right], \quad (15)$$

$$Y(X, t) = Y_0(X) \exp [a(X)t^{b(x)}]. \quad (16)$$

Для упрощения модели (рис. 10 б), вместо нормального введено равномерное распределение параметра  $Y$  и принято допущение, что величина  $\sigma\{Y\}$  во времени не изменяется и для любого момента времени равна значению  $\sigma_0$  (рис. 10 в). С целью совпадения среднего значения начального распределения  $Y_0$  с началом экспоненты при  $t = 0$  введены нормированный верхний  $a(X)$  и нижний  $b(X)$  пределы равномерного распределения, которые являются случайными величинами, зависящими от факторов обработки  $X$ . Критическое время  $t_{kp}$  функционирования ТС (рис. 10в) определяется по зависимости

$$t_{kp} \leq \left\{ \left( \frac{1}{a(X)} \right) \ln \left[ \frac{Y_0(X)}{Y_{max} - Y_0} \right] \right\}^{1/b(x)}. \quad (17)$$

Если  $t > t_{кр} = T$ , вероятность безотказной работы ТС определяется в соответствии с выражением

$$P(t) = 0,5 + \frac{Y_0(X)}{2\Delta Y} \left\{ \exp \left[ a(X) t^{b(X)} \right] - \frac{Y_{max}}{Y_0(X)} \right\} \quad (18)$$

Параметры  $a(X)$  и  $b(X)$  определяются экспериментально с учетом фактора времени методом наименьших квадратов.

При наложении двухстороннего ограничения на регламентируемый пара-

$$P(t) = \Phi \left[ \frac{Y_{max} - Y_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right] + \Phi \left[ \frac{Y_{max} + \gamma_{cp} T - Y_{min}}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right] \quad (19)$$

Таким образом, рассмотренные модели позволяют оценить показатели параметрической надежности ТС по обеспечению регламентируемых параметров качества поверхностей деталей, причем в расчетные зависимости входит целый ряд статистических характеристик закона распределения  $Y$ , которые зависят от конкретной ТС и условий обработки.

Для всех перечисленных процедур, включая построение и анализ моделей (6)

метр качества  $Y$  и его линейном законе изменения во времени вероятность безотказной работы ТС определяется зависимостью:

и (7), разработано соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение.

Если в моделях (6) и (7) случайными величинами являются только коэффициенты  $\beta_0$  и  $\beta_i$ , то с учётом свойств математического ожидания  $M\{Y_{i0}\}$  и дисперсии  $S^2\{Y_{i0}\}$  для определения их оценок можно использовать аналитические зависимости (20, 21) для моделей типа (6) или (22, 23) для моделей типа (7):

$$M\{Y_{i0}\} = M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i M\{\beta_i\}, \quad (20)$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = S^2\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i^2 S^2\{\beta_i\}, \quad (21)$$

$$M\{Y_{i0}\} = \exp \left( \ln M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k \ln X_i M\{\beta_i\} \right), \quad (22)$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = \exp \left( \ln(S^2\{\beta_0\}) + \sum_{i=1}^k (\ln X_i)^2 S^2\{\beta_i\} \right). \quad (23)$$

Если в моделях (6) и (7) случайным являются хотя бы один из факторов обработки  $X_i$ , то для определения  $M\{Y_{i0}\}$  и  $S^2\{Y_{i0}\}$  аналитические зависимости найти не удастся.

Их можно определить путем статистической обработки массива данных  $Y_{iN}$  объёма  $N$ , который получается после проведения машинного эксперимента над моделями.

Для оценки вероятностных характеристик ПКПС в случае использования модели (7), что наиболее часто встречается на практике, при проведении МЭ необходимо вычисление  $N$  значений функции  $Y_i$  в соот-

ветствии с законом распределения параметров модели.

Например, если распределение  $Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_k; b_0, \dots, b_k; S\{\beta_0\}, S\{\beta_1\}, \dots, S\{\beta_k\})$  является нормальным, то значения параметров  $Y_i$  рассчитываются по зависимости:

$$Y_i = b_0 \prod_{j=1}^k X_j^{RND N_i(b_j, S\{\beta_i\})}, \quad (24)$$

где  $X_j$  – значения  $j$ -того фактора обработки в ТС ( $j = 1, \dots, k$ ), которые могут быть как постоянными, так и случайными величинами с любым законом распределения и соответствующими ему вероятностными

характеристиками;  $(RNDN_i(b_i, S\{\beta_i\}))$  – показатель степени  $\beta_j$  в виде нормально распределенного случайного числа с математическим ожиданием  $M\{\beta_j\} = b_1$  и нормальным отклонением  $S\{\beta_j\}$

На следующем этапе рассчитывается вероятность  $P$  выполнения задания по

$$P\{Y_{imin} < Y_i < Y_{imax}\} = \Phi\left(\frac{Y_{imax} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right) - \Phi\left(\frac{Y_{imin} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right), \quad (25)$$

$$P\{Y_i < Y_{imax}\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{Y_{imax} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right). \quad (26)$$

Необходимо понимать, что все модели и базы данных по обеспечению ПКПС или ПЭС, построенные на основе их анализа, рекомендации и выводы, приводимые в справочной и научной литературе, относятся к эксплуатации какой-то частной ТС в момент времени  $t = 0$ . Это совсем не означает что результаты обработки в идентичной ТС (хотя вероятность полной идентичности ТС крайне мала) будет в полной мере соответствовать рассмотренным выше рекомендациям. С большой долей вероятности следует ожидать существенных отклонений. Это еще раз подчеркивает необходимость проведения плановой ДТС.

Окончательные результаты расчетов (25, 26) определяют параметрическую надёжность ТС во время проведения ДТС и по ним принимается решение о возможности дальнейшей активной эксплуатации или необходимости проведения техниче-

обеспечению требуемых параметров качества  $Y_i$  поверхности детали в заданном интервале с использованием зависимостей (25) при двухстороннем ( $Y_{imin} < Y_i < Y_{imax}$ ) или (26) при одностороннем ( $Y_{imax}$ ) ограничениях на регламентируемый параметр:

ского обслуживания ТС вне зависимости от момента проведения ДТС.

Для проведения необходимых расчетов разработано программное обеспечение, позволяющее строить физико-статистические модели (6) или (7) и методом имитационного моделирования определять вероятность выполнения задания ТС по обеспечению требуемых ПКПС или ПЭС [5, 6].

В процессе работы с программой (рис. 11) задаются исходные данные: значения входных факторов  $X_i$  исследуемой ТС, число измерений значений выходных параметров в процессе проведения экспериментов и результаты измерений. Для выбранного вида модели ((6) или (7)) формирования параметра качества рассчитываются коэффициенты регрессии, проверяется их значимости по  $t$ -критерию Стьюдента, оценивается адекватность модели по  $F$ -критерию Фишера.

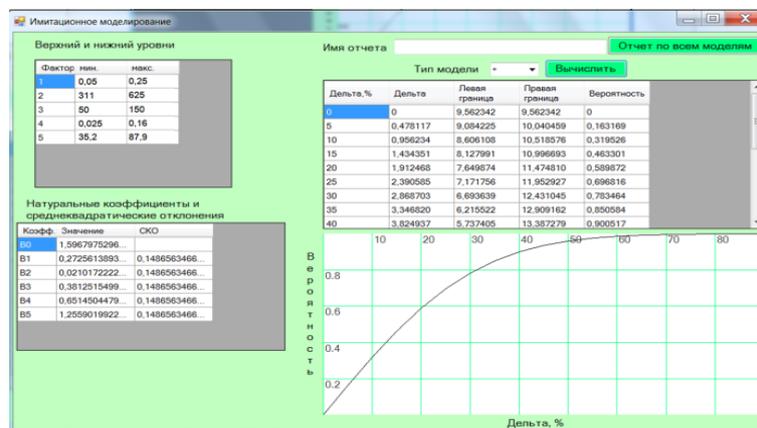


Рис. 11. Окно результатов расчёта вероятности выполнения задания технологической системой

После запуска операции «Имитационное моделирование» рассчитывается вероятность  $P_i$  формирования значения  $Y_i$  в  $\delta$  %-х интервалах с построением соответствующих графиков. Пользователь может

### Заключение

Результаты проведенных комплексных исследований логически и теоретически доказывают необходимость проведения диагностики ТС металлообработки по параметрической надежности обеспечения регламентируемых параметров качества функциональных поверхностей деталей машин в процессе обработки. Разработаны основы методологии её реализации. Обобщение приведенных результатов исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Уточнены теоретические модели формирования параметров качества поверхностей деталей в процессе обработки с учетом фактора времени.

2. Разработаны методологические основы диагностики ТС по надежности обеспечения ПКПС обрабатываемых деталей.

3. Представлены схемы систем управления экспериментом при проведении (в случае необходимости) стендовых испытаний обработанных поверхностей образцов в условиях, близким к эксплуата-

ционным. задавать различные фиксированные значения входных или выходных факторов: для  $X_i$  – минимальные, максимальные, средние значения; для  $Y_i$  – минимальные или максимальные значения.

ционным.

4. Разработаны и реализованы компьютеризированные системы измерения параметров качества, в частности, шероховатости обрабатываемых поверхностей, в том числе в рабочей зоне технологической системы.

5. Даны рекомендации по рациональному выбору технологических систем и применению методов статистического и имитационного моделирования при исследовании параметрической надежности ТС:

6. Разработано и апробировано математическое и программное обеспечение анализа и обработки результатов эксперимента.

Практическая реализация результатов исследований может послужить фундаментом для дальнейшего развития исследований в области параметрической надежности ТС, повышению качества отечественной продукции машиностроения и росту её конкурентоспособности на мировом рынке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыжов, Э. В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – Москва : 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. Суслова. – Москва : Машиностроение, 2006. – 447 с. – ISBN 5-217-03308-8.
3. **Инженерия поверхностей деталей** / Колл. авт. ; под ред. А.Г. Суслова. – Москва : Машиностроение, 2008. – 320 с. – ISBN 978-5-217-03427-7.
4. **Fyodorov, V. P.** Determination of parametric reliability of machining technological systems by simulation technique. / V. P. Fyodorov, M. N. Nagorkin, A. V. Totai / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 124 (2016) 012053. – DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012053.
5. **Параметрическая надёжность технологических систем лезвийной и упрочняющей обработки инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов по геометрическим параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей деталей** / М. Н. Нагоркин, В. П. Федоров, В. В. Нагоркина, Е. В. Ковалева // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты; Том VII. : коллективная монография ; под ред. А. В. Киричека. – Москва : Спектр, 2016. – С. 506–688. – DOI:10.14489/4442-0118-3
6. **Нагоркин, М. Н.** Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов: монография / М. Н. Нагоркин ; под ред. А. В. Киричека. – М. : Спектр, 2017. – 304 с. – DOI:10.14489/4442-0132-9.

7. **Суслов А. Г.** Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 10. – С. 3–13. – DOI: 10.30987/article\_5bb4b1f9abbc54.46761484.
8. **Федоров, В. П.** Диагностика технологических систем по надежности обеспечения заданных параметров качества обрабатываемых поверхностей деталей / В. П. Федоров, А. Г. Суслов, М. Н. Нагоркин // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – № 1 (103). – С. 15–24. – DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-1-15-24
9. **Фёдоров В. П.** Автоматизация диагностики технологических систем по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета – 2012. – № 1 (33). – С. 85–94. – ISSN 1999-8775.
10. **Nagorkin, M. N.** Automation of technological system diagnostics by parameters of quality of surfaces of machined parts / M. N. Nagorkin, V. P. Fyodorov, E. V. Kovalyova // Lecture notes in mechanical engineering. Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering (ICIE 2018). – Pp. 1535–1545. – DOI: org/10.1007/978-3-319-95630-5\_164.
11. **Vainer, L. G.** Vibroacoustic diagnostics of bidirectional end milling / L. G. Vainer, F. S. Sabirov, A. V. Rivkin // Russian engineering research. 2015, vol. 35, No. 6, – pp. 458-461. – DOI: 10.3103/S1068798X15060179.
12. **Вайнер, Л. Г.** Измерение и диагностика параметров торцешлифовальной обработки // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2019. - №2. - С. 35–42. – ISSN 1996-3440.
13. **Моделирование и управление качеством поверхностного слоя деталей с применением современных средств инструментального обеспечения и компьютерных технологий** / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков, М. П. Топорков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 2 (53). – С. 138–147. – ISSN 2073-3216.
14. **Проников, А. С.** Надёжность машин / А. С. Проников. – Москва : Машиностроение, 1978. – 592 с.
15. **Проников, А. С.** Параметрическая надёжность машин / А. С. Проников. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с. – ISBN 5-7038-1996-2.
16. **Фёдоров, В. П.** Проблемы исследования и повышения надёжности технологического обеспечения качества деталей машин / В. П. Фёдоров // Трение и износ – 1997. – Том 18, № 3. – С. 349–360. – ISSN: 0202-4977.
1. **Rizhov, E.V.** Technological support of operational properties of machine parts. / E.V. Rizhov, A.G. Suslov, V.P. Fyodorov. – Moscow : Mashinostroeniye, 1979. – 174 p.
2. **Technological support and improvement of operational properties of parts and their connections** / A.G. Suslov, V.P. Fyodorov, O.A. Gorlenko, et al ; edited by A.G. Suslov. – Moscow : Mashinostroeniye, 2006. – 447 p. – ISBN 5-217-03308-8.
3. **Engineering of parts surfaces** / Corporate author ; edited by A.G. Suslov. – Moscow : Mashinostroeniye, 2008. – 320 p. – ISBN 978-5-217-03427-7.
4. **Fyodorov, V. P.** Determination of parametric reliability of machining technological systems by simulation technique. / V. P. Fyodorov, M. N. Nagorkin, A. V. Totai / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 124 (2016) 012053. – DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012053.
5. **Parametric reliability of technological systems of blade and hardening machining with tools made of synthetic superhard materials according to geometric quality parameters and tribotechnical characteristics of the parts surfaces** / M.N. Nagorkin, V.P. Fyodorov, V.V. Nagorkina, E.V. Kovaleva // Advanced engineering technologies, equipment and tools; Vol. VII. : Multi-authored monograph ; edited by A.V. Kirichek. – Moscow : Spektr, 2016. – pp. 506–688. – DOI:10.14489/4442-0118-3
6. **Nagorkin, M.N.** Parametric reliability of technological systems for finishing and finishing-hardening surface treatment of machine parts with tools made of superhard synthetic materials: monograph / M.N. Nagorkin ; edited by A.V. Kirichek. – Moscow : Spektr, 2017. – 304 с. – DOI:10.14489/4442-0132-9.
7. **Integrated approach to experimental studies of technological systems of metalworking to ensure the quality parameters and operational properties of the surfaces of machine parts** / A.G. Suslov, V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin, I.L. Pirikov // Science Intensive Technologies in Engineering. – 2018. – no. 10. – pp. 3–13. – DOI: 10.30987/article\_5bb4b1f9abbc54.46761484.
8. **Fyodorov, V.P.** Diagnostics of technological systems for the reliability of ensuring the specified parameters of the quality of the machined surfaces of parts / V.P. Fyodorov, A.G. Suslov, M.N. Nagorkin // Science Intensive Technologies in Engineering. – 2020. – no. 1 (103). – pp. 15–24. – DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-1-15-24
9. **Fyodorov, V.P.** Automation of technological systems diagnostics according to the quality parameters of the surfaces of the processed parts / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin, I.L. Pirikov // Bulletin

- of Bryansk State Technical University – 2012. – no. 1 (33). – С. 85–94. – ISSN 1999-8775.
10. **Nagorkin, M. N.** Automation of technological system diagnostics by parameters of quality of surfaces of machined parts / M. N. Nagorkin, V.P. Fyodorov, E. V. Kovalyova // Lecture notes in mechanical engineering. Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering (ICIE 2018). – Pp. 1535–1545. – DOI: org/10.1007/978-3-319-95630-5\_164.
  11. **Vainer, L. G.** Vibroacoustic diagnostics of bidirectional end milling / L. G. Vainer, F. S. Sabirov, A. V. Rivkin // Russian engineering research. 2015, vol. 35, No. 6, – pp. 458–461. – DOI: 10.3103/S1068798X15060179.
  12. **Vainer, L. G.** Measurement and diagnostics of parameters of the end grinding // Vestnik Tikhookeanskogo Gosudarstvennogo Universiteta. – 2019. – no.2. - pp. 35–42. – ISSN 1996-3440.
  13. **Modeling and quality management of the surface layer of parts using modern tools and computer technologies** / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin, I.L. Pirikov, M.P. Toporkov // Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. – 2016. – no. 2 (53). – pp. 138–147. – ISSN 2073-3216.
  14. **Pronikov, A.S.** Reliability of machines / A.S. Pronikov. – Moscow : Mashinostroeniye, 1978. – 592 p.
  15. **Pronikov, A.S.** Parametric reliability of machines / A.S. Pronikov. – Moscow : Publishing House of Bauman University, 2002. – 560 p. – ISBN 5-7038-1996-2.
  16. **Fyodorov, V.P.** Problems of research and improvement of reliability of technological quality assurance of machine parts / V.P. Fyodorov // Trenie I Iznos – 1997. – vol. 18, no. 3. – pp. 349–360. – ISSN: 0202-4977.

Ссылка для цитирования:

*Федоров, В.П. методологические основы диагностики технологических систем металлообработки по параметрической надежности обеспечения заданного качества обрабатываемых поверхностей / В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, Л.Г. Вайнер // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 11. – С. 49 - 63 . DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-36-50.*

*Статья поступила в редакцию 24.09.21.*

*Рецензент: д.т.н., профессор,*

*зав. отделом ИМАШ РАН,*

*Албагачиев А.Ю.,*

*член редсовета журнала «Вестник БГТУ».*

*Статья принята к публикации 27.10.21.*

#### Сведения об авторах:

**Федоров Владимир Павлович**, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел. 8-980-315-77-09, e-mail: fedorvlad44@mail.ru.

**Нагоркин Максим Николаевич**, д.т.н., зав. кафедрой «Техносферная безопасность» Брянского

**Fedorov Vladimir Pavlovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Bryansk State Technical University, phone 8-980-315-77-09, e-mail: fedorvlad44@mail.ru.

**Nagorkin Maksim Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Technosphere

государственного технического университета, тел. 8-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru.

**Вайнер Леонид Григорьевич**, д.т.н., зав. кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» Тихоокеанского государственного университета, тел. 8-914-541-51-49, e-mail: lgvainer@mail.ru.

Safety at Bryansk State Technical University, phone 8-960-552-61-25, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru.

**Vainer Leonid Grigoryevich**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Internal Combustion Engines at Pacific National University, phone 8-914-541-51-49, e-mail: lgvainer@mail.ru.