

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article\_5bb4b1f9ed2366.33601200

Д.И. Петрешин, д.т.н.,

В.А. Хандожко, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: unti@tu-bryansk.ru

## Автоматизированное обеспечение качества поверхности и контактной жесткости деталей машин\*

*Одним из путей в обеспечении и повышении качества механической обработки является адаптивное управление режимами технологической операции. Для функционирования адаптивной системы управления необходимо иметь математическую модель. Не для всех обрабатываемых материалов и условий обработки имеются такие модели. В условиях производства данная проблема может решаться за счет использования самообучающейся технологической системы. Интеграция самообучающейся системы в автоматизированную систему научных исследований позволит с заданной точностью обеспечивать требуемое эксплуатационное свойство.*

**Ключевые слова:** адаптивное управление; самообучающаяся технологическая система; механическая обработка; контактная жесткость; параметры качества поверхностного слоя.

D.I. Petreshin, Dr. Sc. Tech.,

V.A. Khandozhko, Can. Sc. Tech.

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

## Automated quality support of surface and contact rigidity in machinery

*One of the ways to ensure and increase machining quality is an adaptive mode control of a technological operation. It is necessary to have a simulator for adaptive control system functioning. There are such simulators not for all materials under machining and working conditions. Under production conditions such a problem can be solved at the expense of self-correcting technological system use. The integration of a self-correcting system into an automated system of scientific investigations will allow ensuring required operation properties with a specified accuracy.*

**Keywords:** adaptive control; self-correcting technological system; machining; contact rigidity; surface layer quality parameters.

Современное промышленное производство характеризуется разнообразием используемых конструкционных материалов и частой сменой номенклатуры выпускаемых деталей, к которым предъявляются жесткие требования по качеству функциональных поверхностей. Изменение жесткости станка, износ инструмента, разброс припуска и твердости заготовок приводят к рассеянию параметров качества обработанных поверхностей. Кроме того, для ряда ответственных изделий требуется технологически обеспечивать закономерное изменение параметров качества рабочей поверхности трения на различных ее участках. Одним из путей в обеспечении и

повышении качества механической обработки является адаптивное управление режимами технологической операции.

В современном машиностроении актуальными являются вопросы эффективного использования технологического оборудования с ЧПУ. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ ограничивается наличием «жесткой» управляющей программы, устанавливающей заданные режимы обработки. В «жесткой» системе не учитываются особенности обработки конкретной детали. Поэтому оснащение станков с ЧПУ адаптивной системой управления позволяет значительно расширить их технологические возможности.

Для функционирования адаптивной системы управления параметрами качества поверхностного слоя необходимо иметь математическую модель, связывающую

\*Статья подготовлена по результатам научных исследований, проведенных в Брянском государственном техническом университете под руководством д.т.н., проф. А.Г. Сулова – ученика д.т.н., проф. Э.В. Рыжова.

выходные параметры управляемого процесса с входными. В настоящее время существуют теоретические и эмпирические зависимости, которые позволяют предсказывать параметры качества обработанной поверхности после механической обработки.

Теоретические уравнения носят общий характер и практически не имеют ограничений, но они не учитывают случайные факторы и имеют большую погрешность.

Эмпирические зависимости имеют узкое конкретное применение, они достаточно точно предсказывают выходные параметры процесса в заданных условиях проведения эксперимента. Как показывает анализ, не для всех обрабатываемых материалов и условий обработки имеются такие зависимости.

Задача существенно осложняется при обработке новых материалов, при использовании новых инструментальных материалов, при внедрении новых технологических процессов, т.е. когда справочные данные по ним отсутствуют или не адекватны реальным условиям. В связи с этим появляется необходимость в проведении дополнительных экспериментальных исследований, что в условиях современного производства невыгодно. Данная проблема может быть устранена путем обучения или самообучения системы в процессе управления технологической системой и в использовании накапливаемой информации [1, 2].

Работа самообучающейся технологической системы заключается в получении математических моделей, связывающих параметры качества поверхности с условиями обработки, и использовании полученной модели для управления технологической системой по любому из параметров качества. Исходя из этого, в состав самообучающейся технологической системы должны входить внешнее вычислительное устройство, двунаправленный канал связи с устройством ЧПУ технологической системой, датчики для контроля выходных параметров процесса резания, а также программное и алгоритмическое обеспечение.

Структурная схема самообучающейся технологической системы управления параметрами качества поверхностного слоя деталей машин приведена в [1, 2].

В состав системы входят следующие элементы: технологическая система (ТС); датчик, измеряющий главную составляющую силы резания  $P_z$  (Д  $P_z$ ), датчик, измеряющий теку-

щую температуру в зоне резания (Д  $T$ ), датчик, контролирующий параметр шероховатости  $Ra$  (Д  $Ra$ ); контроллер сопряжения (КС) датчиков с ПЭВМ и ПЭВМ с устройством ЧПУ; устройство числового программного управления (УЧПУ) класс PCNC, обеспечивающее управление ТС за счет изменения подачи  $s$  и скорости резания  $v$ .

В состав контроллера сопряжения входят элементы, преобразующие аналоговый сигнал, поступающий с датчиков, в цифровой и передающие его в ПЭВМ. Вычисленная величина поправки  $U=(v, s)$  передается от ПЭВМ контроллеру сопряжения и далее в УЧПУ.

В самообучающейся технологической системе предусмотрены два режима работы «Самообучение» и «Работа». Режим «Самообучение» предназначен для определения параметров математической модели и сохранения результата самообучения в базе данных системы. Для параметрической идентификации математической модели в самообучающейся технологической системе проводится активный эксперимент непосредственно на рабочем месте. Полученные в ходе эксперимента данные обрабатываются программным обеспечением и определяются параметры математической модели, которые запоминаются в базе данных системы вместе с исходными данными. Исходными данными для самообучения системы являются: геометрия режущей части инструмента, материал режущей части инструмента, материал обрабатываемой заготовки и его твердость, обеспечиваемый параметр качества поверхностного слоя, величина допуска на обеспечиваемый параметр качества.

Во время проведения эксперимента самообучающаяся технологическая система автоматически определяет значения параметра шероховатости  $Ra$  прямым методом измерения. Значения поверхностной микротвердости и поверхностных остаточных напряжений определяются косвенным методом – на основе измерений главной составляющей силы резания  $P_z$  и температуры в зоне резания. Кроме вышеперечисленных параметров качества самообучающаяся технологическая система имеет возможность определения величины комплексного параметра  $S_x$ . Параметр  $S_x$  используется для комплексной оценки качества поверхностей трения и включает параметры шероховатости, волнистости, макроотклонения, степень наклепа поверхностного слоя и поверхностные остаточные напряжения [3]:

$$C_x = \frac{(RaWzH \max)^{1/6}}{tm^{3/2}(1000 \cdot Sm)^{1/2} \left( \frac{H\mu \max}{H\mu_{ish}} \right)^{2/3} \left( \frac{\sigma_b - \sigma_{ost}}{\sigma_a} \right)^{ty}}$$

где  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;  $Wz$  – средняя высота волн, мкм;  $H\max$  – максимальное макроотклонение, мкм;  $tm$  – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, %;  $Sm$  – средний шаг неровностей профиля, мм;  $H\mu_{max}$  – максимальная поверхностная микротвердость, формируемая при механической обработке, МПа;  $H\mu_{ish}$  – исходная микротвердость материала, МПа;  $\sigma_b$  – временное сопротивление разрушению, МПа;  $\sigma_a$  – действующее значение амплитудного напряжения на поверхности трения, МПа;  $\sigma_{ost}$  – поверхностные остаточные напряжения, сформированные после механической обработки, МПа;  $ty$  – параметр фрикционной усталости при упругом контакте.

Режим «Работа» (адаптивное управление) используется для обеспечения заданного значения параметра качества поверхностного слоя или комплексного параметра  $C_x$ . Во время механической обработки неизбежно присутствуют возмущающие факторы  $F=(\Delta t, \Delta HB, \Delta j, h_3...)$  (колебание припуска, твердости, изменение жесткости технологической системы, износ режущего инструмента и др.), под воздействием которых параметры качества обработанной поверхности могут выйти за пределы допуска.

В этом случае при адаптивном управлении технологической системой по заданному параметру качества вносятся необходимые коррективы в ход процесса обработки за счет изменения величины подачи и скорости резания, используя соответствующие законы управления. Так при обеспечении заданного параметра шероховатости  $Ra$  используется закон управления подачей  $s$  при неизменной скорости резания  $v$ :

$$\left. \begin{aligned} Ra_{izm} &\geq Ra_{zad} + \Delta Ra_{zad} \\ Ra_{izm} &\leq Ra_{zad} - \Delta Ra_{zad} \\ v &= const \\ CV &= \frac{Ra_{izm}}{s^{xr}} \\ s(Ra_{izm}) &= \left( \frac{Ra_{zad}}{CV} \right)^{\frac{1}{xr}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $Ra_{izm}$  – измеренное значение параметра шероховатости обработанной поверхности;  $Ra_{zad}$  – заданное значение параметра шероховатости, которое необходимо обеспечить;  $\Delta Ra_{zad}$  – допуск на обеспечиваемый параметр;  $s(Ra_{izm})$  – скорректированная величина продольной подачи;  $CV = C_r V^{yr}$ ;  $xr, yr$ ,

$C_r$  – коэффициенты модели, полученные при самообучении;  $s$  – первоначально установленная величина подачи, мм/об; и закон управления скоростью резания  $v$  при неизменной подаче  $s$ :

$$\left. \begin{aligned} Ra_{izm} &\geq Ra_{zad} + \Delta Ra_{zad} \\ Ra_{izm} &\leq Ra_{zad} - \Delta Ra_{zad} \\ s &= const \\ CS &= \frac{Ra_{izm}}{v^{yr}} \\ v(Ra_{izm}) &= \left( \frac{Ra_{zad}}{CS} \right)^{\frac{1}{yr}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $v(Ra_{izm})$  – скорректированная величина скорости резания;  $CS = C_r s^{xr}$ ;  $xr, yr, C_r$  – коэффициенты модели, полученные при самообучении;  $v$  – первоначально установленная величина скорости резания м/мин.

Аналогичные законы управления используются и для обеспечения заданных значений физико-механического параметра и комплексного параметра  $C_x$  [4].

При адаптивном управлении обеспечивается один из выбранных параметров качества поверхностного слоя: параметр шероховатости  $Ra$ , поверхностная микротвердость или поверхностные остаточные напряжения. Для одновременного обеспечения параметров шероховатости  $Ra$ , поверхностной микротвердости и поверхностных остаточных напряжений, в том числе и произвольного их сочетания, следует использовать комплексный параметр качества  $C_x$ .

В разработанной самообучающейся технологической системе имеется возможность интеграции в состав автоматизированной систе-

мы научных исследований (АСНИ) контактная жесткость [5].

Контактная жесткость зависит от геометрических характеристик качества поверхности (макроотклонения, волнистости, шероховатости) и физико-механических свойств поверхностного слоя (микротвердости, остаточных напряжений) сопрягаемых деталей машин [3, 6, 7]. Контактная жесткость сказывается на точности работы приборов, на точности установки деталей в приспособлениях, на станках, на точности обработки и сборки деталей, т.е. на качестве машиностроительных изделий. Она играет большую роль при определении фактической площади касания, знание которой необходимо для расчета сил трения, оценки влияния предварительной обработки поверхностей на износ деталей, подбора износостойких пар трения, расчета прочности сопряжений с неподвижными посадками, расчета плотности соединений и т.д. [2].

Существует практика [3, 7] решения задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, и контактной жесткости в частности, в два этапа. На первом этапе по заданной величине контактной жесткости стыка определяются параметры качества контактирующих поверхностей. На втором – устанавливают условия обработки, обеспечивающие требуемые параметры качества этих поверхностей.

Однако последние пятнадцать лет развивается новое научное направление в технологии машиностроения – одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, которое основывается на объединении и автоматизированном решении задач конструктора и

технолога для определения оптимальных условий обработки деталей на стадии конструкторско-технологической подготовки производства [7, 8, 9].

Для реализации автоматизированного технологического обеспечения рассматриваемого эксплуатационного свойства необходимы соответствующее алгоритмическое обеспечение и математические зависимости, отражающие взаимосвязь контактной жесткости с условиями механической обработки различных видов поверхностей деталей машин. Причем при качественном совпадении результатов, приводимых разными исследователями, их количественные оценки контактной жесткости значительно отличаются. В большей степени это связано с методикой измерения контактной жесткости поверхностей деталей машин.

Серийное оборудование для указанных измерений, на сегодняшний момент, не выпускается, а методически процесс измерения регламентируется только нормалью МР42-82, разработанной д.т.н., проф. А.Г. Суловым [10]. В соответствии с требованиями нормали [10] была реализована установка для измерения контактной жесткости в виде (АСНИ) контактной жесткости (рис. 1) [5].

Созданная АСНИ предназначена для измерения контактной жесткости плоских, наружных и внутренних цилиндрических поверхностей обработанных с шероховатостью от  $Ra = 0,1$  мкм до  $Ra = 3,2$  мкм и микротвердости образцов от 100 до 550 НВ. При этом контактная жесткость рабочей поверхности может определяться с учетом только шероховатости или шероховатости и волнистости, как при первой, так и при повторной нагрузках [5].

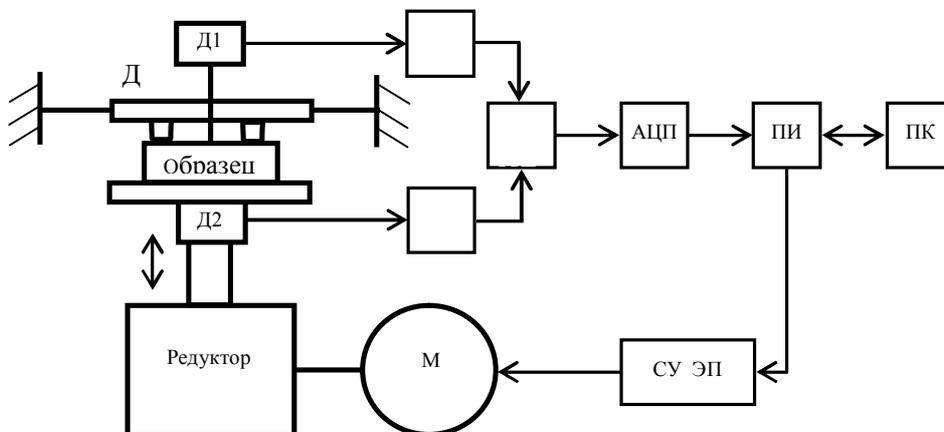


Рис. 1. Схема автоматизированной системы научных исследований контактной жесткости:

М – электродвигатель; Д1 – индуктивный датчик измерения контактной деформации; Д2 – датчик для измерения нагрузки; ДИ – держатель индентров; У1 и У2 – электронные усилители сигналов с датчиков; ЭК – электронный коммутатор; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПИ – преобразователь интерфейса; ПК – персональный компьютер АСНИ

Перед измерениями в зависимости от формы исследуемой поверхности (плоская, наружная или внутренняя цилиндрическая) и вида контроля (с учетом только шероховатости или шероховатости и волнистости) выбирается соответствующая конфигурация инденторов и схема их расположения [7, 8].

Затем, исходя из заданных параметров  $Ra$  и твердости исследуемых образцов, назначаются минимальная и максимальная нагрузка. При этом необходимо, чтобы исследуемый образец был изготовлен из того же материала и теми же технологическими методами, что и реальная деталь.

Исследуемый образец помещается на предметный столик нагрузочного устройства и проводится предварительное контактирование инденторов с образцом для устранения посторонних упругих деформаций и люфтов, не связанных с деформациями в контакте. Затем в автоматическом режиме происходит шестикратное нагружение–разгружение образца и определение математических зависимостей, отражающих взаимосвязь контактной жесткости с условиями механической обработки поверхностей деталей машин, например вида [6]:

– торцевое чистовое точение при первом нагружении:

$$j_1 = C_{j1} s^{x1} v^{y1} HB^{z1} ; \quad (3)$$

– торцевое чистовое точение при повторном нагружении:

$$j_{повт} = C_{jp} s^{x2} v^{y2} HB^{z2} , \quad (4)$$

где  $j_1$  – величина контактной жесткости при первом нагружении, МПа/мкм;  $j_{повт}$  – величина контактной жесткости при повторном нагружении, МПа/мкм;  $s$  – величина подачи, мм/об;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $HB$  – твердость материала по Бринелю, МПа;  $C_{j1}$ ,  $C_{jp}$ ,  $x1$ ,  $y1$ ,  $z1$ ,  $x2$ ,  $y2$ ,  $z2$  – коэффициенты модели.

Таким образом, алгоритмическое, математическое и программное обеспечение разработанной АСНИ позволяет одноступенчато решать задачу технологического обеспечения контактной жесткости деталей машин и их соединений. В качестве целевой функции в алгоритме АСНИ используется минимум технологической себестоимости.

В математические модели (3) и (4) входят управляющие факторы: величина подачи  $s$  и скорость резания  $v$ , с помощью которых можно управлять величиной контактной жесткости во время механической обработки. Однако во время механической обработки непосредственный контроль величины контактной жесткости невозможен. Поэтому для контроля величины контактной жесткости во время механической обработки, например при адаптивном управлении, необходимо использовать косвенный метод. Для этого можно использовать математическую модель вида:

$$j = C_j Pz^{xf} T^{yf} , \quad (5)$$

где  $j$  – величина контактной жесткости;  $C_j$ ,  $xf$ ,  $yf$  – коэффициенты модели;  $Pz$  – главная составляющая силы резания, Н;  $T$  – температура в зоне резания, °С.

Таким образом, модели (3) и (4) используются для управления величиной контактной жесткости при механической обработке, а модель вида (5) для косвенного определения величины контактной жесткости на основании измеренных во время обработки силы резания  $Pz$  и температуры  $T$  в зоне резания при механической обработке.

Математические модели вида (3) и (4) получают на АСНИ контактной жесткости. Для определения математической модели вида (5) совместно с АСНИ контактной жесткости необходимо использовать самообучающуюся технологическую систему.

Совместное использование АСНИ контактной жесткости и самообучающейся технологической системы (рис. 2) предполагает следующую последовательность действий (рис. 3). На основе исходных данных о величине требуемой контактной жесткости в АСНИ определяется, имеются ли для этих данных соответствующие математические модели, связывающие условия механической обработки с требуемой величиной контактной жесткости модели вида (3), (4) и величину контактной жесткости с выходными параметрами процесса резания моделью вида (5).

В случае если такие модели имеются, то параметры данных моделей передаются в самообучающуюся технологическую систему для технологического обеспечения контактной жесткости в режиме адаптивного управления при механической обработке.



Рис. 2. Схема взаимодействия АСНИ контактной жесткости и самообучающейся технологической системы управления

В том случае, когда математические модели для заданных исходных данных отсутствуют, АСНИ сообщает оператору о необходимости получить данные модели.

После этого с помощью самообучающейся технологической системы ставится активный эксперимент, причем материал образцов и их твердость должны быть такие же, как и для реальной детали. Полученные в ходе активного эксперимента результаты и обработанные образцы передаются в АСНИ для измерения контактной жесткости и определения математических моделей вида (1), (2) и (3). После успешного получения математических моделей их параметры

передаются в самообучающуюся технологическую систему для технологического обеспечения контактной жесткости в режиме адаптивного управления.

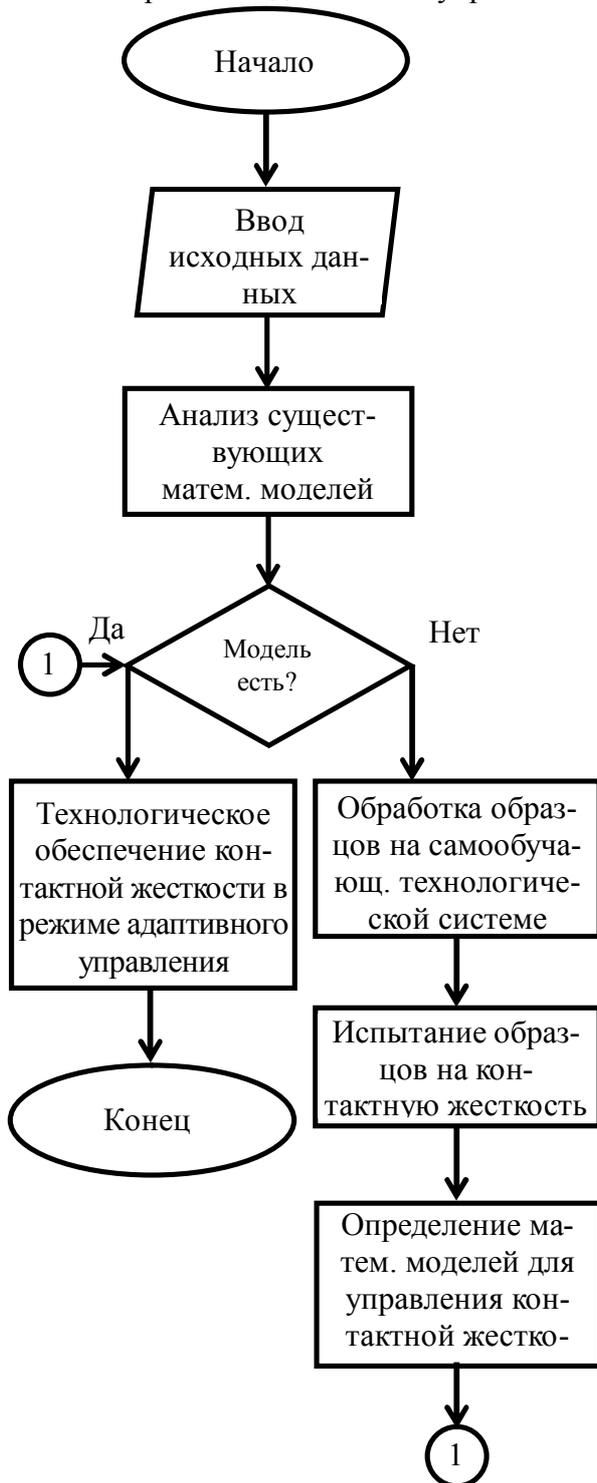


Рис. 3. Алгоритм совместного функционирования самообучающейся технологической системы с АСНИ контактной жесткости

Совместное использование самообучающейся технологической системы с АСНИ контактной жесткости позволяет с заданной точностью обеспечивать требуемое значение контактной жесткости деталей машины.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петрешин, Д.И. Технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. – 2012. – № 9(15). – С. 25-27.
2. Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И. Автоматизированное обеспечение параметров качества поверхностей, получаемых механической обработкой // *Вестник машиностроения*. – 2013. – № 4. – С. 54-58.
3. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
4. Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И. Определение закона управления для адаптивной технологической системы при обеспечении заданных параметров качества поверхностного слоя деталей машин при механической обработке // *СТИН*. – 2010. – №1. – С. 30-36.
5. Суслов, А.Г., Захаров, А.Е., Петрешин, Д.И., Финатов, Д.Н., Степа, А.П., Хандожко, В.А. Автоматизированная система нормализованного определения несущей способности поверхностных слоев деталей машин // *Справочник. Инженерный журнал (приложение)*. – 2003. – №9. – С. 21-24.
6. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение. 1987 – 208 с.
7. *Инженерия поверхности деталей/* А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
8. Медведев, Д.М., Хандожко, В.А. Автоматизированное технологическое обеспечение контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2015. – № 2 (46). – С. 40-49.
9. Суслов, А.Г., Медведев, Д.М. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин // *СТИН*. – 2010. – № 8. – С. 22-25.
10. *Метод определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков: методические рекомендации*. – М.: ВНИИМАШ, 1982.

## REFERENCES

1. Petreshin, D.I. Technological support of machinery surface quality parameters under conditions of ambiguity // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No. 9(15). – pp. 25-27.
2. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Automated support of quality parameters in surfaces obtained by machining // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2013. – No. 4. – pp. 54-58.
3. Suslov, A.G. Machinery Surface Layer Quality. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
4. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Definition of management law for adaptive technological system at specified parameter assurance for machinery surface layer at machining // *STIN*. – 2010. – No.1. – pp. 30-36.
5. Suslov, A.G., Zakharov, A.E., Petreshin, D.I., Finatov, D.N., Stepa, A.P., Khandozhko, V.A. Automated system for normalized definition of carrying capacity of machinery surface layers // *Reference Book, Engineering Journal (Appendix)*. – 2003. – No. 9. – pp. 21-24.
6. Suslov, A.G. *Technological Support of Machinery Surface Layer State Parameters*. – M.: Mechanical Engineering. 1987 – pp. 208.
7. *Parts Surface Engineering/* A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
8. Medvedev, D.M., Khandozhko, V.A. Automated technological support of contact rigidity in grinded surfaces of machinery and their joints // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2015. – No.2. (46). – pp. 40-49.
9. Suslov, A.G., Medvedev, D.M. Single-stage technological support of wear-resistance in machinery cylindrical surfaces // *STIN*. – 2010. – No. 8. – pp. 22-25.
10. *Method for Normal Contact Rigidity Definition in Fixed Joints: methodical recommendations*. – M.: ARRIMACH, 1982.

Рецензент д.т.н. Ю.Л. Чигиринский