

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.24-33.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.24-33.

Научная статья
УДК 621.9+681.532
doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-33

Автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин

**Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.
Дмитрий Иванович Петрешин², д.т.н.
Михаил Геннадьевич Шалыгин³, д.т.н.
Виктор Александрович Хандожко⁴, к.т.н.**

^{1, 2, 3, 4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия
¹naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>
²dipetreshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9472-2167>
³migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>
⁴vichandozhko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

Аннотация. В статье изложены два направления автоматизированного технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин (износостойкости, контактной жесткости и др.). Первое направление – традиционное, двухступенчатое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин: первая ступень – определение параметров качества рабочих поверхностей деталей, определяющих требуемые значения эксплуатационных свойств; вторая ступень – технологическое обеспечение параметров качества рабочих поверхностей деталей машин. Второе новое направление – одноступенчатое автоматизированное технологическое обеспечение непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин активно развиваемое последние 25 лет в Брянском государственном техническом университете. Оно основано на базе теоретических и экспериментальных зависимостей взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин непосредственно с режимами обработки их рабочих поверхностей. Для получения экспериментальных зависимостей разработаны различные автоматизированные системы научных исследований. Приведен пример такой автоматизированной системы исследования контактной жесткости. Для технологического обеспечения высокой точности требуемых параметров качества обрабатываемых поверхностей и их эксплуатационных свойств разработаны адаптивные системы управления, используемые на различных станках. При обработке новых материалов и отсутствии теоретических и экспериментальных данных возможно применение самообучающихся технологических систем. Приведен пример такой системы для токарного станка. Все эти разработки позволяют подойти к созданию станков с искусственным интеллектом.

Ключевые слова: качество поверхности, эксплуатационные свойства, технологическое обеспечение, адаптивные системы, самообучающиеся станки

Для цитирования: Суслов А.Г., Петрешин Д.И., Шалыгин М.Г., Хандожко В.А. Автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 24–33. doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-33

Automated technological support and improvement of the operational properties of machine parts

Anatoly G. Suslov¹, D.Eng.

Dmitry I. Petreshin², D. Eng.

Mikhail G. Shalygin³, D. Eng.

Viktor A. Khandozhko⁴, Ph.D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹naukatm@yandex.ru

²dipetreshin@yandex.ru

³migshalygin@yandex.ru

⁴vichandozhko@gmail.com

Abstract. The article outlines two directions of automated engineering support for the operational properties of machine parts (wear resistance, contact stiffness, etc.). The first direction is a traditional one. It's a two-stage provision of the operational properties of machine parts: in the first stage it is the dimensioning of working surfaces quality of the part that determines the required values of operational properties; in the second stage it is technological provision of quality parameters for the working surfaces of machine parts. The second new direction is a single – stage automated engineering support for the current operational properties of machine parts, which has been actively developed over the past 25 years at the Bryansk State Technical University. It is based on the theoretical and experimental dependences of the relationship between the operational properties of machine parts directly with the processing modes of their working surfaces. Various automated systems of scientific research have been developed to obtain experimental dependencies. An example of such an automated system for studying contact stiffness is given. Adaptive control systems used on various machines for high-performance engineering support aimed at obtaining the required quality parameters of the treated surfaces and their operational properties have been developed. When processing new materials and taking into account the absence of theoretical and experimental data, it is possible to use self-learning technological systems. An example of such a system used for a lathe, is given. All these developments contribute to the creation of the machines with artificial intelligence.

Keywords: surface quality, operational properties, engineering support, adaptive systems, self-learning machines

For citation: Suslov A.G., Petreshin D.I., Shalygin M.G., Khandozhko V.A. Automated technological support and improvement of the operational properties of machine parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 24–33. doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-33

Один из основных показателей качества изделий машиностроения – надежность, которая определяется рядом эксплуатационных свойств их деталей: статическая и усталостная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д. [1]. Поэтому автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин является развитием науки по технологическому обеспечению качества изделий машиностроения и автоматизированной ее реализации на практике.

В настоящее время при конструкторско-технологической подготовке производства осуществляется двухступенчатая система обеспечения качества деталей машин.

На стадии конструкторской подготовки производства производится выбор материалов деталей, и определяются точность размеров и параметры качества их поверхностных слоев [2]. Это осуществляется в автоматизированном режиме с использованием программ, базирующихся на теоретических и экспериментальных данных взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин с физико-механическими свойствами их материалов, точностью размеров и качеством поверхностного слоя.

Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с параметрами качества их поверхностного слоя приведена в табл. 1.

1. Параметры, определяющие эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений

1. Parameters determining the operational properties of machine parts and their connection joints

Эксплуатационные свойства		Контактная жесткость:		Износостойкость	Герметичность соединений	Усталостная прочность	Коррозионная стойкость
		первое нагружение	повторное нагружение				
Свойства материалов	σ_b	0	0	+	0	+	0
	σ_T	+	+	+	-	+*	+*
	E	+	-	+	-*	+	0
	HB	+	-	+	-	-*	0
Размер и его точность	d, l, B	+*	+*	+*	-*	+*	0
	T	-*	-*	-	-*	0	0
Параметры качества поверхностного слоя	H_{max}	-*	-	-	-	0	0
	H_p	-*	-	-*	-*	0	0
	W_z	-	-*	-	-	0	-
	W_p	*-	-	-*	-*	0	-
	Sm_{II}	-	-	+	-	0	+
	Ra, Rz	-	-	-	-	-	-*
	R_{max}	-	-	-	-	-*	-
	R_p	-*	-*	-*	-*	+	-
	tp	+*	+*	+*	+*	-	+
	Sm	+	+*	+*	-*	+*	+*
	s	0	0	+	-	0	+*
	R_{max}	0	0	-	-	0	-*
	Sm	0	0	+	-	+*	+*
	$\sigma_{ост}$	+*	-	+*	-	+*	+*
	$h_{\sigma 0}$	0	0	0	0	+*	+
	$H_{\mu 0}$	+*	-	+*	-	+*	+
	h_{μ}	0	0	0	0	+*	+
	ε	-*	-*	+*	0	+*	-*
l_3	-*	-*	-*	0	-*	+*	
ρ_D	-*	-*	-*	0	-*	-*	

Примечание. Обозначение «+» и «-» показывают, что увеличение и уменьшение этих параметров вызывает соответственно улучшение или ухудшение данного эксплуатационного свойства: «*» – параметр оказывает основное влияние на данное эксплуатационное свойство; «0» – параметр не влияет на данное эксплуатационное свойство.

Численные значения параметров качества поверхностного слоя определяются по теоретическим или эмпирическим уравнениям, описывающим взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с – в период приработки:

$$I_h = \frac{1,2Ra^{2/3}}{n_{\sigma} \cdot \lambda \cdot Sm \cdot tm^{3/2}} \left(\frac{\rho}{H_{\mu\sigma}} \right)^{7/6} \sqrt{15\pi(2\pi \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3} \cdot \left[1 + \frac{2\pi \cdot H_{\mu\sigma} (1-\mu^2)^2}{E} \right]}; \quad (1)$$

– в период нормального изнашивания:

$$I_h = \frac{1,2\rho^{7/6}}{n_{\sigma} \cdot \lambda \cdot tm^{3/2} \cdot H_{\mu\sigma}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)^2 (2\pi \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3}}{Sm \cdot E}}, \quad (2)$$

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_b - \sigma_o}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (3)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; n_{σ} – число циклов; Sm – средний шаг неровностей профиля, мм, мм; tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; ρ – радиус скругления режущей кромки; $H_{\mu\sigma}$ – микротвердость материала, МПа; Wz – средняя высота волн, мкм; $H\max$ – максимальное макроотклонение, мкм; E – приведенный модуль упругости; σ_b – предел прочности; σ_a – действующее значение амплитудного напряжения в поверхностном слое.

На стадии технологической подготовки производства осуществляется автоматизированное проектирование технологических процессов, заключающееся в выборе оптимальных технологических методов и режимов обработки, обеспечивающих с минимальной себестоимостью или максимальной производительностью требуемую точность и параметры качества рабочих поверхностей деталей машин [3].

параметрами качества их рабочих поверхностей. Так, теоретическое уравнение по расчету интенсивности изнашивания имеет следующий вид:

Последние 25 лет в Брянском государственном техническом университете развивается новое научное направление – одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. Оно базируется на получении теоретических и экспериментальных зависимостей различных эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин непосредственно от условий их обработки [4].

Теоретические уравнения могут быть получены на основе подстановки теоретических зависимостей параметров качества рабочих поверхностей деталей машин от режимов обработки в уравнения взаимосвязи эксплуатационных свойств с параметрами качества поверхностного слоя. Так, для износостойкости при шлифовании рабочих поверхностей трения получены следующие уравнения:

– в период приработки (при шлифовании):

$$I_h = \frac{6 \left(\frac{22,5 k_c t^{0,5}}{\rho_3^{0,25} \left(\frac{2,6 F c H V^2 k_B m q v_K (A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,67}}{n 1 \lambda \left(\frac{22,5 \rho_3^{0,75} k_c t^{0,5}}{\left(\frac{2,6 F c H V^2 k_B m q v_K (A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,5}} \times \sqrt{\left(\frac{6,28 H \mu_{исх} (1 - \mu^2) (\sigma_T + (\sigma_B + 0,01 \sigma_B \Psi_K - \sigma_T) EXP(-0,0015 T_{нс}))}{E \sigma_T} + 1 \right)} \times (6,28 H \max_{исх} W \beta^{u-1})^{0,165} \left(\frac{P \sigma_T}{H \mu_{исх} (\sigma_T + (\sigma_B + 0,01 \sigma_B \Psi_K - \sigma_T) EXP(-0,0015 T_{нс}))} \right)^{1,167}; \quad (4)$$

– в период нормального изнашивания (при шлифовании):

$$I_h = \frac{0,028}{n 1 \lambda \left(\frac{H \mu_{исх} (\sigma_T + (\sigma_B + 0,01 \sigma_B \Psi_K - \sigma_T) EXP(-0,0015 T_{нс}))}{\sigma_T} \right)} \times \sqrt{\frac{3000 (1 - \mu^2) \left(\frac{141,4 H \max_{исх} W \beta^{u-1} k_c t^{0,5}}{\rho_3^{0,25} \left(\frac{2,6 F c H V^2 k_B m q v_K (A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,33}}{E \left(\frac{22,5 \rho_3^{0,75} k_c t^{0,5}}{\left(\frac{2,6 F c H V^2 k_B m q v_K (A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,5}}}, \quad (5)$$

где ρ_3 – среднее значение радиуса скругления вершин абразивных зерен; t – глубина шлифования; k_c – коэффициент, учитывающий влияние смазочно-охлаждающего технологического средства на параметр Ra ; k_B – коэффициент учитывающий влияние колебаний рабочей поверхности круга относительно обрабатываемой поверхности (в большинстве случаев $k_B = 0,65 \dots 0,85$); m – коэффициент, учитывающий фактическое число зерен на рабочей поверхности круга; v_K – скорость вращения круга; v_3 – скорость вращения (перемещения) заготовки; $A = D_K$ – для плоского шлифования

периферией круга; $A = (D_3 D_K) / (D_3 \pm D_K)$ – для круглого наружного «+» и внутреннего «-» шлифования периферией круга; D_3, D_K – диаметр заготовки и круга соответственно; q – коэффициент, учитывающий микрорельеф вершин абразивных зерен; N – зернистость шлифовального круга; V – объемное содержание зерен в круге; Fc – параметр, учитывающий разновысотность вершин зерен на рабочей поверхности круга; H – число контактов рассматриваемого участка поверхности заготовки с кругом; W – высота волнистости обрабатываемой поверхности после одного рабочего хода инструмента;

β – коэффициент, характеризующий процесс изменения волнистости поверхности при выжигании шлифовальным кругом ($\beta = 0,8...0,9$); u – коэффициент, учитывающий процесс выжигания абразивным инструментом обрабатываемой поверхности; ψ_k – относительное сужение поперечного сечения образца из материала заготовки перед его разрывом при испытаниях на растяжение; $T_{нс}$ – температура нагрева поверхностного слоя при шлифовании.

Наряду с методом подстановки можно получать теоретические уравнения с использованием энергетического подхода к идентичности формирования качества поверхностного слоя деталей, как при их обработке, так и при эксплуатации. Для интенсивности изнашивания уравнение имеет следующий вид:

– чистовое круглое врезное шлифование:
сталь 12ХН3А (58...63 HRCэ):

$$I_h = 1,65 \cdot 10^{-7} I^{0,314} v_3^{0,254} s_p^{0,318}, \quad (6)$$

где I – зернистость шлифовального круга (25...40); v_3 – скорость вращения заготовки (20...40 м/мин); s_p – поперечная (радиальная) подача (0,001...0,005 мм/об).

Для получения экспериментальных зависимостей разработаны различные автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) эксплуатационных свойств деталей машин. Общий вид АСНИ контактной жесткости представлен на рис. 1.



Рис. 1. АСНИ контактной жесткости деталей машин:

1 – комплектный электропривод; 2 – электродвигатель; 3 – винтовой механизм; 4 – индентор; 5 – образец; 6 – датчик перемещения; 7 – датчик силы; 8 – преобразователь А; 9 – преобразователь Б; 10 – аналого-цифровые преобразователи (АЦП); 11 – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); 12 – персональная ЭВМ; 13 – программное обеспечение (ПО)

Fig. 1. ARS for studying a contact stiffness of machine parts:

1 – electric drive package; 2 – electric motor; 3 – screw mechanism; 4 – indenter; 5 – sample; 6 – displacement sensor; 7 – force sensor; 8 – converter A; 9 – converter B; 10 – analog-digital converters (ADCs); 11 – digital-to-analog converter (DAC); 12 – personal computer; 13 – software

Для обеспечения работы АСНИ контактной жесткости используется программное обеспечение 13, которое регистрирует измерения в реальном масштабе времени и выводит

их результаты на дисплее ПЭВМ 12 в виде графиков и численных значений, что позволяет визуально контролировать ход измерений (рис. 2).

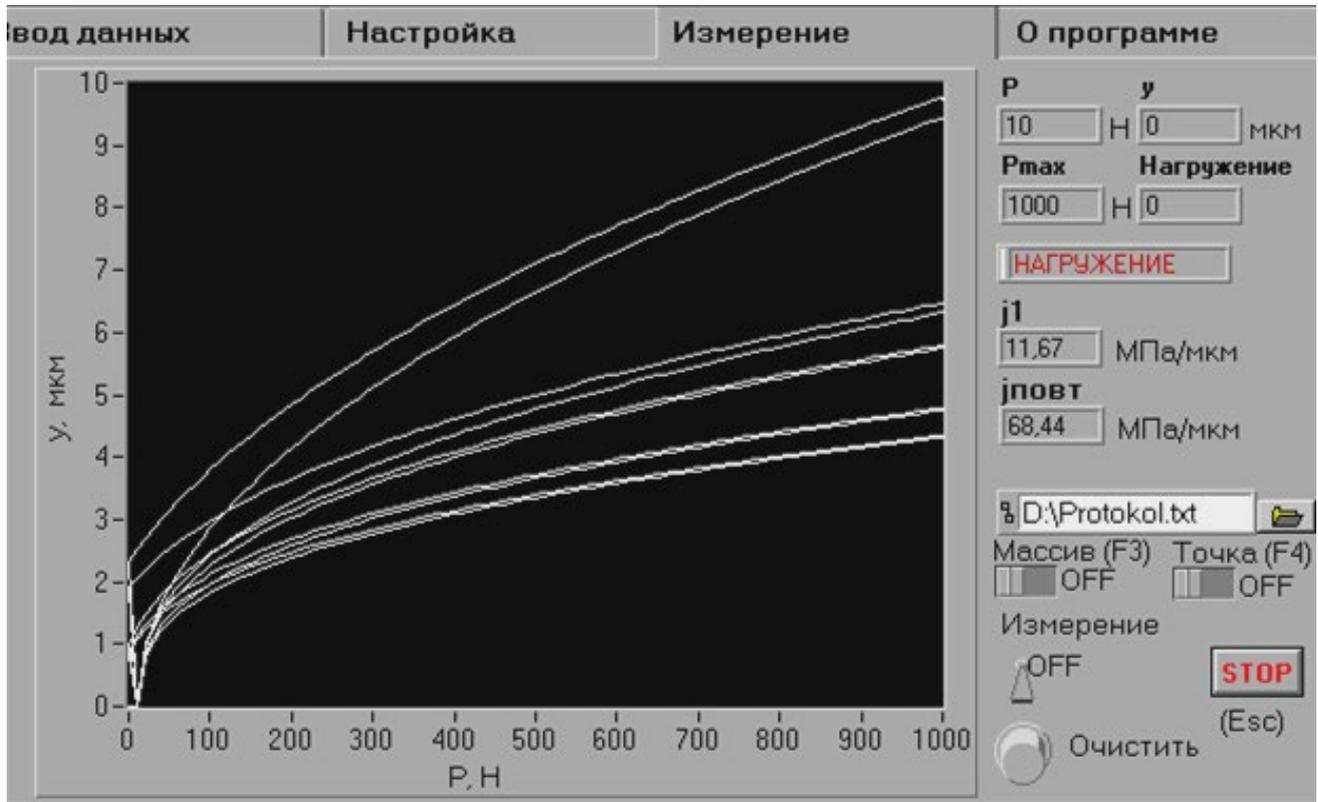


Рис. 2. Программное обеспечение АСНИ контактной жесткости

Fig. 2. Software ARS for studying a contact stiffness

Используя полученные теоретические и эмпирические уравнения, по разработанной программе рассчитываются режимы для различных методов обработки, обеспечивающие требуемые параметры качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин.

Эмпирические уравнения взаимосвязи контактной жесткости плоских поверхностей с условиями их обработки получены с использованием полнофакторного эксперимента 2^n , где n – число факторов. Для проведения эксперимента предварительно были подготовлены образцы с соответствующей твердостью НВ и обработанные на соответствующей подаче S_0 и скорости резания v .

Эксперименты по определению контактной жесткости при первом и повторном нагружениях проводились в автоматизированном режиме с помощью АСНИ (см. рис. 1). Результаты экспериментов обрабатывались с помощью разработанного программного обеспечения для определения коэффициентов мультипликативной модели.

Полученные с помощью АСНИ зависимости контактной жесткости от условий обработки:

– для давления 1 МПа имеют вид:

$$j_1 = 0,008 \cdot S_0^{-0,5} \cdot v^{0,1} \cdot \text{НВ}^{-0,02}, \quad (7)$$

$$j_{\text{повт}} = 2 \cdot S_0^{-0,16} \cdot v^{0,03} \cdot \text{НВ}^{-0,66}; \quad (8)$$

– для давления 10 МПа зависимости имеют вид:

$$j_1 = 0,031 \cdot S_0^{-0,53} \cdot v^{0,12} \cdot HB^{-0,02}, \quad (9)$$

$$j_{\text{повт}} = 7,8 \cdot S_0^{-0,162} \cdot v^{-0,06} \cdot HB^{-0,65}. \quad (10)$$

Аналогичные эмпирические зависимости контактной жесткости непосредственно от режимов обработки на данной АСНИ получены также и для других методов механической обработки плоских наружных и внутренних поверхностей вращения.

Учитывая возможные колебания исходных параметров качества и твердости материалов при изготовлении ответственных деталей, могут быть использованы разработанные системы адаптивного управления режимами, гарантирующие получение эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей в заданных пределах.

Система адаптивного управления [6] (рис. 3) предназначена для обеспечения требуемых параметров шероховатости Ra ,

поверхностных остаточных напряжений, поверхностной микротвердости и комплексного параметра качества поверхностного слоя Sx [7], что, в свою очередь, обеспечит получение требуемых эксплуатационных свойства деталей машин.

Алгоритм работы (А) системы реализуется в виде программного обеспечения записанного в память устройства управления, в качестве которого используется ПЭВМ. Исполнительным устройством системы является технологическая система (ТС), управляемая устройством ЧПУ. Связь ПЭВМ и УЧПУ осуществляется через контроллер сопряжения (КС), подключаемый к ПЭВМ по последовательному интерфейсу RS 232. Управляющими воздействиями U являются скорость резания v , величина подачи S и глубина резания t . Внешними возмущениями F являются изменение жесткости технологической системы Δj , износ инструмента $hз$, разброс припуска Δt и твердости заготовок ΔHB и другие факторы. Для работы системы адаптивного управления необходима исходная информация, вводимая оператором (ОП) перед началом работы.

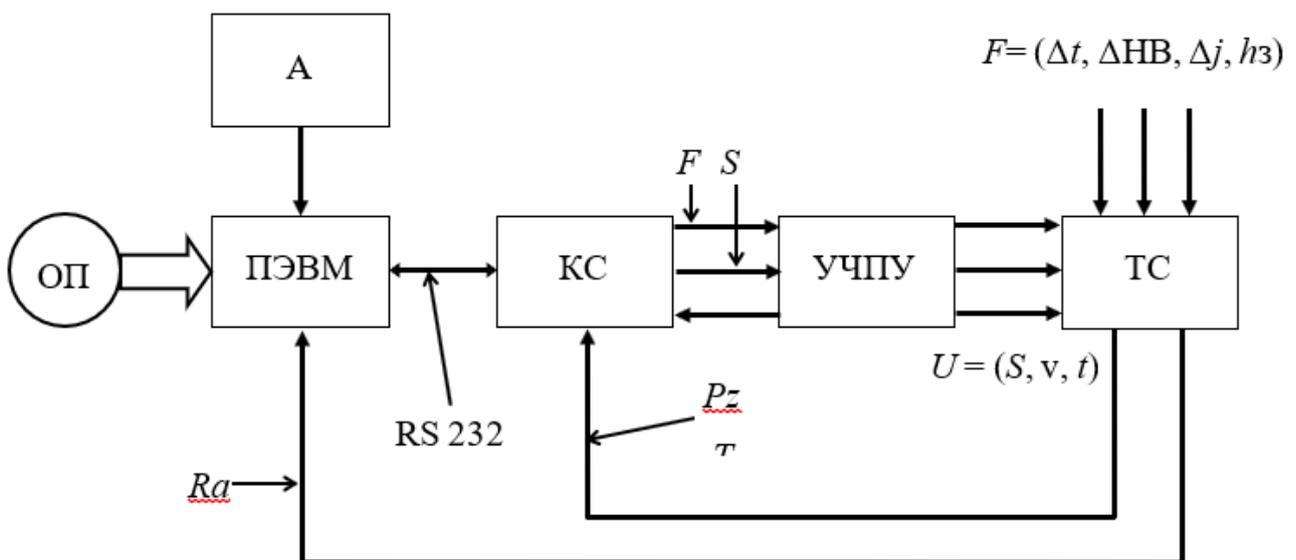


Рис. 3. Структура самообучающейся технологической системы управления

Fig. 3. Structure of the self-learning technological control system

Для определения физико-механических параметров обработанной поверхности используется косвенный метод, основанный на измерении во время обработки силы резания P_z и температуры T в зоне резания и вычислении на основе измерений физико-механических параметров качества обработанной поверхности. Сила резания P_z и температура T измеряются датчиками, установленными непосредственно вблизи зоны обработки. Параметр шероховатости Ra , обработанной поверхности, измеряется прямым методом с использованием лазерного датчика [8].

При обработке деталей из новых и (в том числе) неметаллических материалов, для которых отсутствуют теоретические и эмпирические зависимости, а также справочные данные, используемых для технологического обеспечения требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей машин, целесообразно использовать разработанные самообучающиеся технологические системы.

Технологическая система включает в себя станок с ЧПУ и персональный компьютер, подключенный к системе управления станком. Составляется матрица планирования эксперимента с входными параметрами максимальных и минимальных режимов, используемых для чистовой обработки данного материала. Затем в соответствии с данной матрицей планирования на соответствующих режимах по программе производится обработка небольших участков поверхности (20 мм) и осуществляется автоматизированное измерение параметров шероховатости силы резания и температуры в зоне резания. По разработанной программе осуществляется обработка экспериментальных данных и получается эмпирическая зависимость параметров шероховатости, силы резания и температуры в зоне резания от режимов обработки.

По теоретической зависимости определяются значения соответствующего

эксплуатационного свойства для каждого эксперимента. В результате получается экспериментальное уравнение взаимосвязи эксплуатационного свойства с режимами обработки. По данному уравнению рассчитываются режимы чистовой обработки рабочей поверхности деталей, обеспечивающие требуемое значение эксплуатационного свойства. Дальнейшая чистовая обработка рабочей поверхности деталей производится на установленных оптимальных режимах резания. При этом, учитывая возможные колебания физико-механических свойств обрабатываемого материала партии деталей и исходных параметров качества поверхности, перед ее чистовой обработкой также используется активный контроль и адаптивная система корректировки режимов резания. Таким образом, появляется возможность создания станков с искусственным интеллектом, обеспечивающих требуемые значения эксплуатационных свойств деталей машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Машиностроение. Энциклопедия.** Ред. совет: К.В. Фролов и др. М.: Машиностроение. Надежность машин. Т. IV-3/ В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; под общ. ред. В.В. Клюева. 1998.
2. **Инженерия поверхности** деталей / Колл. авторов; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
3. **Справочник технолога** / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
4. **Фундаментальные основы** технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.
5. **Метод** определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков. Методические рекомендации. М.: ВНИИМАШ. 1982.
6. **Наукоемкие технологии** в машиностроении: [монография] / под ред. А. Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2012. 527 с.
7. **Сулов А.Г., Петрешин Д.И.** Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя S_x при механической

обработке // Научно-технические технологии в машиностроении. 2011. № 2 (02). С. 34–39.

8. **Петрешин Д.И.** Применение лазерного оптического датчика для измерения высотных параметров шероховатости поверхности деталей машин в самообучающейся адаптивной технологической системе // Контроль. Диагностика. 2009. № 11. С. 53–57.

REFERENCES

1. Mechanical engineering. Encyclopedia. Ed. council: K.V. Frolov et al. Moscow: Mechanical engineering. Reliability of machines. Vol. IV-3/ V.V. Klyuev, V.V. Bolotin, F.R. Sosnin, et al.; endorsed by V.V. Klyuev. 1998.

2. Surface engineering of parts / Joint authors; edited by A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering, 2008, 320 p.

3. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2019, pp. 800.

4. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering articles/ ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022, 552 p.

5. Method for definition of normal contact stiffness in fixed joints: Methodical Recommendations. Moscow: VNIIMASH, 1982.

6. Science-intensive technologies in mechanical engineering: [monograph] / edited by A. G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 527 p.

7. Suslov A.G., Petreshin D.I. Automated provision of the complex parameter of quality of the surface layer Cx during mechanical processing // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2011, no. 2 (02), pp. 34–39.

8. Petreshin D.I. Application of a laser optical sensor control for measurement of high-altitude parameters of machine parts surface roughness in self-learning adaptive technological system // Control. Diagnostics. 2009, no. 11, pp. 53–57.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 26.04.2024.

The article was submitted 02.04.2024; approved after reviewing 19.04.2024; assepted for publication 26.04.2024.