

УДК 681.5

М.В. Виноградов, Е.М. СамойловаСаратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
Саратов, Россия**ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШЛИФОВАНИЕМ**

На основе анализа динамики процесса предлагается метод цифрового автоматического управления шлифованием путем использования экспертных систем контроля и диагностирования параметров технологического процесса абразивной обработки с последующим принятием решения по изменению предварительных настроек в реальном времени с учетом результатов диагностирования. Для получения требуемых качественных показателей эффективной обработки необходимо осуществлять правку шлифовального круга в тот момент, когда его режущие свойства снижаются до критических. Использование нечеткой логики в алгоритме управления абразивной обработкой позволяет получить стратегию цифрового управления, подобную процессу ассоциативного мышления человека. Такая искусственно-интеллектуальная система позволяет в процессе цифрового управления использовать знания, хранящиеся в памяти, для реализации принятия решения с учетом исходных условий (логическое заключение). Использование контроллеров нечеткой логики для описания системы позволяет достаточно эффективно использовать знания экспертов вместо дифференциальных уравнений. При этом указанные приложения теории нечетких множеств выражаются с помощью лингвистических переменных естественным образом. В процессе управления шлифованием удобно использовать экспертные системы на основе нечетких регуляторов, которые подстраивают параметры регулятора прямого контура в зависимости от изменяющихся условий и используются в дополнительном контуре управления. В прямом контуре комбинированных систем цифрового оптимального управления используются обычные регуляторы. Эффективность системы цифрового управления и качество принимаемых решений можно существенно повысить применением экспертных систем. На основании анализа параметров качества технологического процесса удалось снизить расход инструмента при сохранении высокого качества изготавливаемой продукции и повысить производительность за счет обоснованного увеличения количества валов между правками. В ходе эксперимента количество обработанных валов между правками круга был увеличен более чем в два раза, что обеспечивало значительную экономию дорогостоящего инструмента при сохранении высокого качества обработки.

Ключевые слова: автоматизация, шлифование, правка шлифовального круга, контроль, диагностирование, экспертная система, нечеткая логика, цифровое управление.

M.V. Vinogradov, E.M. SamoilovaSaratov State Technical University named after Yu.A. Gagarina, Saratov,
Russian Federation**DIGITAL GRINDING CONTROL**

Based on the analysis of the dynamics of the process, the article proposes a method of digital automatic control of grinding by using expert systems for monitoring and diagnosing the parameters of the technological process of abrasive processing, followed by a decision to change the presets in real time, taking into account the results of diagnosis. To obtain the required quality indicators of effective

processing, it is necessary to edit the grinding wheel at a time when its cutting properties are reduced to critical. The use of fuzzy logic in the control algorithm of abrasive processing allows to obtain a digital control strategy, similar to the process of associative thinking of a person. Such an artificially intelligent system allows in the process of digital control to use the knowledge stored in memory for the implementation of decision - making taking into account the initial conditions (logical conclusion.)

The use of fuzzy logic controllers to describe the system makes it possible to use expert knowledge rather effectively instead of differential equations. These applications of the theory of fuzzy sets, in this case are expressed by means of linguistic variables in a natural way. In the process of grinding control, it is convenient to use expert systems based on fuzzy controllers, which adjust the parameters of the direct loop controller depending on changing conditions and are used in an additional control loop. Conventional regulators are used in the direct loop of combined digital optimal control systems. The effectiveness of the digital control system and the quality of decisions can be significantly improved by the use of expert systems. Based on the analysis of the parameters of the quality of the technological process, it was possible to reduce the consumption of the tool while maintaining the high quality of the manufactured products and increase productivity due to a reasonable increase in the number of shafts between edits. During the experiment, the number of processed shafts between edits of the circle was increased more than twice, which provided significant savings of expensive tools while maintaining high quality processing.

Keywords: automation, grinding, grinding wheel straightening, control, diagnostics, expert system, fuzzy logic, digital control.

Введение. В настоящее время существует достаточно большое количество работ по управлению процессами обработки малогабаритных валов с учетом большинства возмущающих факторов. В технологической системе основными возмущающими факторами являются динамические процессы. При шлифовании их можно оценить с помощью анализа амплитуды вибросигнала. Контроль уровня вибросигнала в процессе обработки позволяет производить оценку динамических характеристик станков в реальном времени. Управление процессом шлифования с учетом уровня вибросигнала позволяет достичь высоких показателей качества обработки [1–5, 17, 20].

Управление процессом шлифования. Процесс шлифования обладает крайне малой инерционностью по сравнению с процессом обработки лезвийным инструментом. Связь между силой резания при шлифовании и толщиной срезаемого с поверхности обрабатываемой детали слоя для некоторых задач управления можно считать безынерционной. Математическая модель в виде передаточной функции дает возможность выполнить анализ динамической системы станка [6–8, 21].

В данном случае модель динамической системы отражает взаимовлияние сил резания и воздействий системы управления. Учет влияния степени износа шлифовального круга на процесс шлифования позволяет повысить эффективность его использования.

На процесс шлифования оказывают влияние различные возмущающие воздействия, которые в передаточной функции динамической системы учитываются с помощью различных коэффициентов:

$$W_c(w) = k_{\text{рез}} \frac{T_d}{[T_{\text{и}}^2 \cdot w^2 + 2[\xi + k_{\text{рез}} \cdot T_d (h_d + h_{\text{и}}) T_{\text{и}} \cdot w + 1]] + k_{\text{ик}}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{рез}}$ – коэффициент жесткости процесса резания, ξ – коэффициент демпфирования конструкции станка, T_d , $T_{\text{и}}$ – постоянные времени шпинделя детали и инструмента соответственно, w – круговая частота, h_d , $h_{\text{и}}$ – коэффициенты, учитывающие неравномерность припуска заготовки (детали) и разбалансировку круга (инструмента), $k_{\text{ик}}$ – коэффициент износа шлифовального круга.

Передаточная функция позволяет получить амплитудно-частотную характеристику процесса резания и рассчитать запас устойчивости системы управления станком для определенных начальных условий. Очевидно, что наличие возмущающих воздействий меняет эти условия. Для снижения вероятности появления брака расчет ведется по худшему варианту, что предопределяет заниженную производительность процесса шлифования и повышенный износ круга за счет более частой его правки. Например, при обработке валов роторов электродвигателя допуск на овальность составляет 5 мкм при шероховатости $Rz = 4,5$ мкм. С учетом затупления круга его правку рекомендуется проводить после обработки 30 деталей. Если при этом встречается заготовка с повышенными припуском или биением, то длительность процесса её шлифования увеличивается, а указанные дефекты устраняются. Опытный оператор при этом ощущает увеличение вибраций узлов станка, слышит повышенный шум и наблюдает увеличение искрообразования. Указанные наблюдения дают основание полагать, что затупление круга при такой обработке происходит более интенсивно. Время обработки тоже выше. С другой стороны, отсутствие таких деталей в партии дает основание оператору увеличить количество деталей между правками, что дает повышение производительности и экономию инструмента, так как основной износ круга происходит в момент правки при снятии дефектного слоя и обновлении формы его режущей поверхности. При автоматизированном крупносерийном производстве используется эффективное многостаночное обслуживание. При этом практически исключается возможность коррекции количества деталей между

правками в результате наблюдения оператором за процессом обработки. Это количество задается по худшему варианту минимальным, во избежание появления бракованных деталей. С повышенным износом круга при этом приходится мириться во избежание появления брака.

Опытно-экспериментальным путем было установлено, что возмущающие воздействия в виде повышенного припуска и биения заготовок встречаются сравнительно редко, при их отсутствии круг правится преждевременно, что приводит к его нерациональному использованию. В этом случае правку шлифовального круга возможно осуществлять с периодичностью, более чем в два раза превышающую существующую. Проведенные исследования показали, что обработка заготовок с повышенными припуском или биением сопровождается потерей устойчивости динамической системы станка, которую можно аппаратно контролировать и учитывать путем соответствующего оперативного изменения количества деталей между правками. Степень затупления круга определяется количеством деталей между правками (K) и зависит от уровня вибраций в процессе обработки (U) и времени обработки (V):

$$K = f(U, V). \quad (2)$$

Расчетное значение количества деталей между правками принимаем за исходное. Контролируя состояние динамической системы станка в процессе обработки, можно прогнозировать износ круга и на этом основании корректировать принятое начальное значение числа деталей между правками, обеспечивая при этом более рациональное использование инструмента. Например, если несколько заготовок будут иметь повышенное биение или предельно высокий припуск на шлифование, то число деталей между правками уменьшается. Производительность оборудования при этом также снижается за счет затрат времени на процесс правки шлифовального круга, в процессе которого происходит его максимальный износ. Повышение количества деталей между правками круга существенно снижает расход дорогостоящего инструмента, что особенно важно при высокоавтоматизированном крупносерийном производстве [6, 7]. Очевидно, что требуемые качественные показатели эффективной обработки можно получить, если править круг в тот момент, когда фактические режущие свойства круга снижаются до критических. Экспериментальная проверка проводилась на круглошлифовальном станке Weiss WKG-05 при обработке малогабаритных валов в производственных условиях (рис. 1) [11–12].



Рис. 1. Расположение датчика уровня вибраций в зоне резания круглошлифовального станка Weiss WKG-05

Анализ изменения амплитуды вибросигнала узлов станка в процессе шлифования малогабаритных валов показал, что амплитудно-частотная характеристика процесса резания заготовок с большим биением заметно отличается. Время обработки заготовок с завышенным припуском больше. Степень затупления и износа круга имеет прямую зависимость от указанных факторов. В частности, при шлифовании детали с биением выше нормы амплитуда вибросигнала и время резания более чем в полтора раза выше (рис. 2), что неизбежно отражается на режущих свойствах круга. Имеется реальная возможность инструментального измерения указанных параметров в процессе обработки. Результат измерения может быть использован для контроля степени фактического затупления круга для корректировки ранее заданного количества деталей между правками. Все это может обеспечить снижение расхода инструмента при условии сохранения высокого качества обработанных деталей. Иногда опытный шлифовщик интуитивно «не торопится» править круг после шлифования деталей без существенных отклонений, определяя их наличие на слух. Автоматизированное серийное производство практически исключает такую возможность ввиду многостаночного обслуживания. Реализовать алгоритм управления

переходом в режим правки шлифовального круга по его фактическому состоянию стало возможным с появлением современных средств интеллектуального цифрового управления. Контроль амплитуды вибросигнала и фактической длительности процесса резания каждой детали с последующей обработкой результатов в режиме реального времени позволяет корректировать задаваемое количество деталей между правками после обработки каждой заготовки как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Бесконтрольное шлифование вынуждает производить правку круга чаще, предполагая максимальное биение заготовок и снимаемый припуск.

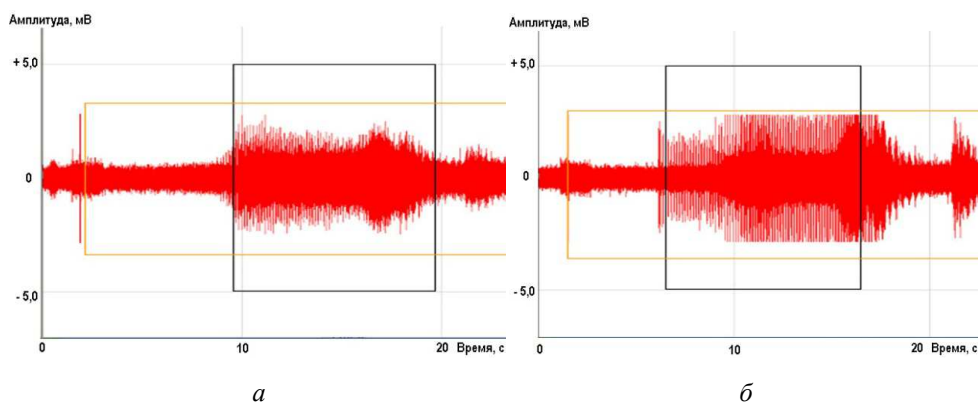


Рис. 2. Осциллограммы вибросигнала при шлифовании обычной заготовки (а) и заготовки с заметным биением (б)

В данном случае при шлифовании заготовки с нормальным биением и припуском целесообразно оставить заданное количество деталей между правками (K) без изменений (лингвистическая переменная N -«нулевая»). В случае шлифования заготовок с минимальным припуском и без заметного биения количество деталей между правками следует увеличить (присваивается значение лингвистической переменной S -«низкая»). При шлифовании заготовок с максимальным припуском, с заметным биением круга количество деталей между правками нужно уменьшить (лингвистическая переменная G -«высокая»).

В соответствии с выражением (2) входными переменными будут уровень вибросигнала (U) и время обработки (V). Введение нечеткости осуществляется путем преобразования входных переменных в соответствующую лингвистическую переменную использованием компараторов (фаззификация).

Выходной переменной будет количество деталей между правками (K). После обработки каждой детали записанное начальное количество деталей между правками корректируется соответствующим образом и сравнивается с количеством обработанных деталей. После правки вновь записывается первоначальное значение выходной переменной, которое будет корректироваться после обработки каждой детали.

В процессе экспериментальных исследований количество деталей между правками было задано в два раза больше действующего. При шлифовании предварительно отобранных деталей с минимальным биением и нормальным припуском круг сохранил свои режущие свойства до конца цикла. Очевидно, что при шлифовании деталей с максимальным припуском или заметным биением количество деталей между правками должно быть на уровне действующего, рассчитанного по худшему варианту. В противном случае повышается риск снижения качества обработки [13–16].

Функциональная схема системы цифрового управления шлифованием включает блоки фаззификации и дефаззификации, блок принятия решений FZCTR и блок базы знаний SFZ (рис. 3).

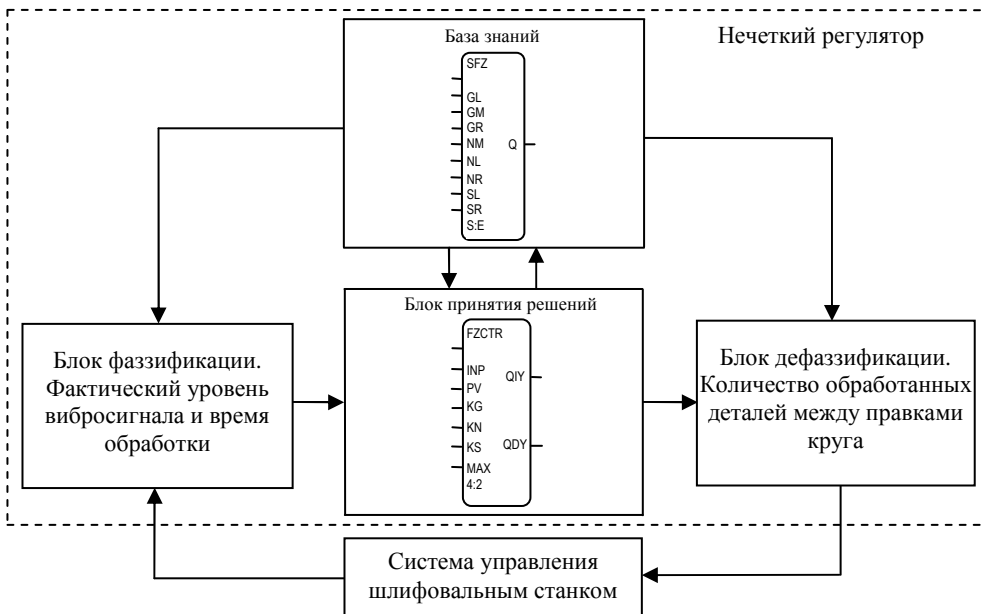


Рис. 3. Комбинированная схема цифрового управления на основе нечёткого регулятора

В процессе обработки сигнал, соответствующий уровню вибраций, поступает на вход блока фаззификации. После окончания обработки туда же поступает сигнал о времени обработки. После фаззификации принимается решение о коррекции записанного в базе знаний количества деталей между правками. Скорректированное значение записывается в базу знаний и дефаззифицируется. Параллельно производится подсчет количества обработанных деталей, которое сравнивается с записанным скорректированным значением. Правка круга осуществляется после того, как записанное после очередной коррекции количество деталей между правками совпадет (или станет меньше) с количеством обработанных деталей [17–18].

Для решения задачи алгоритмической обработки информации о процессе шлифования удобнее всего использовать комбинированную схему цифрового управления. Наряду с обычной системой управления шлифовальным станком предлагается схема на основе нечёткого регулятора. Нечёткий регулятор, который подстраивает параметры основной системы управления в зависимости от изменяющихся условий, используется в дополнительном контуре. Схему цифрового управления на основе нечёткого регулятора удобно использовать в процессе решения задачи алгоритмической обработки информации о процессе обработки (см. рис. 3).

Процесс ассоциативного мышления оператора, принимающего решение об изменении количества деталей между правками шлифовального круга в процессе обработки, можно реализовать с помощью элементов нечеткой логики. Системы с элементами нечёткой логики относятся к искусственно-интеллектуальным [19]. В таких системах дифференциальные уравнения для описания системы заменяются знаниями экспертов, которые естественным образом выражаются с помощью лингвистических переменных. В данном случае результирующая переменная «количество деталей между правками» (K) получается из входных переменных «уровень вибраций в процессе обработки» (U) и «время обработки» (V). В базе знаний записывается алгоритм выработки решения (логического заключения). В процессе цифрового управления шлифованием используются хранящиеся в базе знания.

При реализации нечеткого регулятора для анализа степени износа круга используются входные лингвистические переменные (U) и (V). Результирующая переменная (K) будет в данном случае лингвистиче-

ской переменной «Управление», которую мы хотим получить. Лингвистическую переменную «Управление», соответствующую выходу нечеткого регулятора, можно задать лингвистическими переменными G – «высокая», N – «средняя», S – «низкая». В интегрированной среде Trace Mode 6 можно представить модель нечеткого регулятора в виде двух блоков FZCTR и SFZ (см. рис. 3).

Блоком FZCTR обеспечивается реализация функции нечеткого регулятора. На вход INP подается регулируемое значение. Для входной величины задается предельная величина уставки на входе PV. В результате текущего пересчета определяется величина приращения управляющего воздействия. Управляющее воздействие выводится на выход QDY-блока. Его формирование осуществляется по алгоритмам (3) и (4):

$$Y_i = QIY_i + QDY_i, \quad (3)$$

$$QIY_i = k_g \cdot QDY_g + k_n \cdot QDY_n + k_s \cdot QDY_s, \quad (4)$$

где i – текущий номер детали, k_G – заготовки с повышенным биением и/или припуском, k_N – заготовки с нормальными биением и/или припуском, k_S – заготовки без заметного биения с минимальным припуском. QDY_G , QDY_N , QDY_S – изменение управления по условию «высокое», «среднее», «низкое» соответственно. По выражению (5) можно рассчитать приращения по каждому из условий рассогласования:

$$QDY_j = K_j \cdot SING(PV - INP), \quad (5)$$

где j – условие рассогласования: G – высокое рассогласование; N – среднее рассогласование; S – низкое рассогласование.

Через входы KG, KN и KS блока FZCTR задаются коэффициенты K_j . В начале значения этих коэффициентов можно задать по умолчанию равными 0,3, 0,2 и 0,05 соответственно. С учетом динамических характеристик конкретного оборудования необходимо скорректировать их величину в процессе обработки предварительно измеренных заготовок. Величину приращения управляющего воздействия ограничивает вход MAX. Вычисляется это ограничение как произведение регулируемого значения и данного входа. Настройка диапазонов нечеткого регулятора осуществляется посредством блока SFZ, с помощью которого задаются границы диапазонов категорий рассогласования (см. рис. 3).

Выводы. На основании анализа параметров качества технологического процесса удалось снизить расход инструмента при сохранении высокого качества изготавливаемой продукции и повысить производительность за счет обоснованного увеличения количества обработанных валов между правками. Экспериментальная проверка проводилась на круглошлифовальном станке Weiss WKG-05 при обработке малогабаритных валов в производственных условиях (см. рис. 1). В процессе экспериментальных исследований количество обработанных валов между правками круга было увеличено более чем в два раза (с 30 до 85 валов) [6, 9, 10].

Таким образом, использование нечеткого регулятора позволяет существенно повысить качество работы цифровой системы управления, снизить вероятность принятия ошибочного решения и обеспечить стабильно высокое качество продукции.

Библиографический список

1. Динамический мониторинг станочного оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин, М.Б. Бровкова. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. – 264 с.
2. Игнатъев С.А., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. – 160 с.
3. Самойлова Е.М., Игнатъев С.А. Интеллектуальный мониторинг качества механической обработки // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 4. – С. 68–72.
4. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
5. Selection of the Cutting Conditions on the Basis of Dynamic Stability for an Automated Lathe / A.A. Ignat'ev, M.V. Vinogradov, S.A. Ignat'ev, E.M. Samoilova, T.G. Nasad, A.A. Kazinskii., V.A. Karakozova, N.A., Kazinskii, M.Yu. Zakharchenko, V.A. Dobryakov // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, № 12. – P. 1034–1037.
6. Управление периодичностью правки круга при шлифовании с применением интеллектуальных технологий / А.А. Игнатъев, Е.М. Самойлова, Д.В. Козлов, В.В. Коновалов. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. – 103 с.

7. Самойлова Е.М., Игнатьев А.А., Игнатьев С.А. Интеллектуализация мониторинга технологического процесса производства деталей точного машиностроения. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2013. – 119 с.
8. Козлов Д.В., Игнатьев А.А. Оценка устойчивости динамической системы шлифовального станка // Наука: XXI век. – Энгельс, 2012. – № 2. – С. 47–52.
9. Самойлова Е.М., Игнатьев С.А. Интеллектуальный мониторинг качества механической обработки // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 4. – С. 68–72.
10. Козлов Д.В., Игнатьев А.А. Динамическая модель процесса врезного шлифования с учетом износа шлифовального круга // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 3(58). – С. 62–65.
11. Козлов Д.В., Виноградов М.В., Добряков В.А. Экспериментальное исследование процесса шлифования валов для идентификации динамической системы станка по виброакустическим колебаниям // Вестник СГТУ. – 2013. – № 1(69). – С. 160–165.
12. Козлов Д.В., Игнатьев А.А. Экспериментальное исследование частоты правки шлифовального круга // Вестник СГТУ. – 2011. – № 2(56). – С. 80–84.
13. Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Технология формирования продукционной компоненты базы знаний экспертной системы контроля и диагностирования шлифовального станка // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 25. – С. 163–176.
14. Самойлова Е.М., Колоколова С.С., Виноградов М.В. Системный подход к анализу методов управления точностью прецизионной обработки с учетом доминирующей роли формообразующих перемещений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – № 1(18). – С. 21–42.
15. Козлов Д.В., Игнатьев А.А. Математическая модель процесса врезного шлифования // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. науч. тр. по материалам 6-й Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2011. – С. 34–36.
16. Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе

автоматизированных станочных модулей интегрированного производства: в 3 ч. Ч. 2: Динамическая экспертная система поддержки принятия решения. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2018. – 100 с.

17. Самойлова Е.М. Программная реализация информационно-измерительного канала вихретокового контроля гибридной интеллектуальной системы мониторинга // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. – 2018. – № 1(62). – С. 45–51.

18. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.

19. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.

20. Risbood K.A., Dixit U.S., Sahasrabudhe A.D. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process // Journal of Material Processing Technology. – 2003. – Vol. 132. – P. 203–214.

21. Tate A. Planning and Conduction Monitoring in a FMS // Conference on development of FMS. – London, July 1984. – P. 62–69.

References

1. Brzhozovskii B.M., Martynov V.V., Iankin I.N., Brovkova M.B. Dinamicheskii monitoring stanochnogo oborudovaniia [Dynamic monitoring of machine tools]. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008. 264 p.

2. Ignat'ev S.A., Gorbunov V.V., Ignat'ev A.A. Monitoring tekhnologicheskogo protsessa kak element sistemy upravleniia kachestvom produktsii [Monitoring of the technological process as an element of the product quality management system]. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009. 160 p.

3. Samoilova E.M., Ignat'ev S.A. Intellektual'nyi monitoring kachestva mekhanicheskoi obrabotki [Intelligent monitoring of the quality of machining]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2013, no. 4, pp. 68-72.

4. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Dynamics of machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1967. 360 p.

5. Ignat'ev A.A., Vinogradov M.V., Ignat'ev S.A., Samoilova E.M., Nasad T.G., Kazinskii A.A., Karakozova V.A., Kazinskii N.A., Zakharchenko M.Yu., Dobryakov V.A. Selection of the Cutting Conditions on the Basis of Dynamic Stability for an Automated Lathe. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 12, pp. 1034-1037.

6. Ignat'ev A.A., Samoilova E.M., Kozlov D.V., Konovalov V.V. Upravlenie periodichnost'iu pravki kruga pri shlifovanii s primeneniem intellektual'nykh tekhnologii [Control of the periodicity of wheel straightening when grinding with the use of intelligent technologies]. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni Gagarina Iu.A., 2016. 103 p.

7. Samoilova E.M., Ignat'ev A.A., Ignat'ev S.A. Intellektualizatsiia monitoringa tekhnologicheskogo protsessa proizvodstva detalei tochnogo mashinostroeniia [Intellectualization of monitoring of technological process of production of details of exact mechanical engineering]. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni Gagarina Iu.A., 2013. 119 p.

8. Kozlov D.V., Ignat'ev A.A. Otsenka ustoichivosti dinamicheskoi sistemy shlifoval'nogo stanka [Stability Assessment of the dynamic system of the grinding machine]. *Nauka: XXI vek*. Engel's, 2012, no. 2, pp. 47-52.

9. Samoilova E.M., Ignat'ev S.A. Intellektual'nyi monitoring kachestva mekhanicheskoi obrabotki [Intelligent monitoring of the quality of machining]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2013, no. 4, pp. 68-72.

10. Kozlov D.V., Ignat'ev A.A. Dinamicheskaiia model' protsessa vrezного shlifovaniia s uchetom iznosa shlifoval'nogo kruga [Dynamic model of the process of cut-in grinding taking into account the wear of the grinding wheel]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 3(58), pp. 62-65.

11. Kozlov D.V., Vinogradov M.V., Dobriakov V.A. Eksperimental'noe issledovanie protsessa shlifovaniia valov dlia identifikatsii dinamicheskoi sistemy stanka po vibroakusticheskim kolebaniiam [Experimental study of shaft grinding process for identification of machine dynamic system by vibroacoustic vibrations]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni Gagarina Iu.A.*, 2013, no. 1(69), pp. 160-165.

12. Kozlov D.V., Ignat'ev A.A. Eksperimental'noe issledovanie chastoty pravki shlifoval'nogo kruga [Experimental study of the frequency of grinding wheel straightening]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 2(56), pp. 80-84.

13. Samoilova E.M., Ignat'ev A.A. Tekhnologiia formirovaniia produktsionnoi komponenty bazy znaniia ekspertnoi sistemy kontroliia i

diagnostirovaniia shlifoval'nogo stanka [Technology of formation of production component of knowledge base of expert system of control and diagnostics of the grinding machine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 25, pp. 163-176.

14. Samoiloва E.M., Kolokolova S.S., Vinogradov M.V. Sistemnyi podkhod k analizu metodov upravleniia tochnost'iu pretsizionnoi obrabotki s uchetom dominiruiushchei roli formoobrazuiushchikh peremeshchenii [System approach to the analysis of precision machining accuracy control methods taking into account the dominant role of form-forming displacements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, no. 1(18), pp. 21-42.

15. Kozlov D.V., Ignat'ev A.A. Matematicheskaia model' protsessa vreznogo shlifovaniia [Mathematical model of the process of cut-in grinding]. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva mashin i priborov. Sbornik nauchnykh trudov po materialam 6 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Penza: Privolzhskii dom znaniia, 2011, pp. 34-36.

16. Samoiloва E.M., Ignat'ev A.A. Metody i algoritmy intellektualizatsii monitoringa tekhnologicheskikh sistem na osnove avtomatizirovannykh stanochnykh modulei integrirovannogo proizvodstva. Chast' 2. Dinamicheskaiia ekspertnaia sistema podderzhki priniatiia resheniia [Methods and algorithms of intellectualization of monitoring of technological systems on the basis of the automated machine modules of the integrated production. Part 2. The dynamic expert system of support of acceptance of decisions]. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni Gagarina Iu.A., 2018. 100 p.

17. Samoiloва E.M. Programmnaia realizatsiia informatsionno-izmeritel'nogo kanala vikhretokovogo kontroliia gibridnoi intellektual'noi sistemy monitoringa [Software implementation of information-measuring channel of eddy current control of hybrid intelligent monitoring system]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 1(62), pp. 45-51.

18. Gavrilova T.A., Khoroshevskii V.F. Bazy znaniia intellektual'nykh sistem [Knowledge Base of Intelligent Systems]. Saint Petersburg: Piter, 2000. 384 p.

19. Vasil'ev V.I., Il'iasov B.G. *Intellektual'nye sistemy upravleniia. Teoriia i praktika* [Intelligent control systems. Theory and practice]. Moscow: Radiotekhnika, 2009. 392 p.

20. Risbood K.A., Dixit U.S., Sahasrabudhe A.D. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. *Journal of Material Processing Technology*, 2003, vol. 132, pp. 203-214.

21. Tate A. Planning and Conduction Monitoring in a FMS. *Conference on development of FMS*. London, July 1984, pp. 62-69.

Сведения об авторах

Виноградов Михаил Владимирович (Саратов, Россия) – доктор технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: michail1948@mail.ru).

Самойлова Елена Михайловна (Саратов, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: Helen_elenka@mail.ru).

About the authors

Vinogradov Mikhail Vladimirovich (Saratov, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Automation, control, mechatronics" Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarina (410054, Saratov, 77, Polytechnic str., e-mail: michail1948@mail.ru).

Samoilova Elena Mikhailovna (Saratov, Russian Federation) is a Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology and control systems in mechanical engineering" Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarina (410054, Saratov, 77, Polytechnic str., e-mail: Helen_elenka@mail.ru).

Получено 30.10.2019