

УДК 621.923

Ягьяев Э. Э., Шрон Л. Б.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА  
КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

*Аннотация.* В статье рассматривается комплексная модель круглого наружного шлифования, которая должна содержать в своем составе модели отдельных подсистем и зависимости, устанавливающие законы их взаимодействия. Это позволит решать комплекс задач, связанных с прогнозированием качества обработки и значений параметров состояния самой системы при различных вариантах изменения режимных параметров и других входных переменных и управляющих воздействий.

Модели операций шлифования могут быть отнесены к классу обобщенных, поскольку составляющие их зависимости и функционалы должны описывать как непрерывные, так и дискретные, как детерминированные, так и стохастические процессы.

**Ключевые слова:** математическая модель, подсистема, чистовое шлифование.

Ягьяев Е. Е., Шрон Л. Б.

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ  
КРУГЛОГО ЗОВНІШНЬОГО ШЛІФУВАННЯ  
З УРАХУВАННЯМ ЗМІН В ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМІ**

*Анотація.* У статті розглядається комплексна модель круглого зовнішнього шліфування, яка повинна містити в своєму складі моделі окремих підсистем і залежності, що встановлюють закони їх взаємодії. Це дозволить вирішувати комплекс завдань, пов'язаних з прогнозуванням якості обробки і значень параметрів стану самої системи при різних варіантах зміни режимних параметрів та інших вхідних змінних і керуючих впливів.

Моделі операцій шліфування можуть бути віднесені до класу узагальнених, оскільки складові їх залежності і функціонали повинні описувати як безперервні, так і дискретні, як детерміновані, так і стохастичні процеси.

**Ключові слова:** математична модель, підсистема, чистове шліфування.

## DEVELOPMENT THE MATHEMATICAL MODEL OF CYLINDRICAL SURFACE GRINDING PROCESS CONSIDERING CHANGES IN THE TECHNOLOGICAL SYSTEM

**Summary.** The article deals with a complex model of the round outer grinding, which should contain models of separate sub-systems and depending on the individual subsystems, establishing the laws of their interaction. This will solve the complex problems associated with the prediction of the quality of treatment and the values of the state parameters of the system in different types of change of regime parameters and other input variables and control actions. Comprehensive model of the grinding operation includes model subsystems workpiece tool contact area, machine, device, device for wheel dressing. Modeling of the structure of the system can be performed in any order. Model grinding operations can be classified as generalized as components of their dependence and functionals should describe both continuous and discrete processes as well as deterministic and stochastic processes.

**Key words:** mathematical model, subsystem, finish grinding.

**Постановка проблемы.** Важным направлением повышения качества обработки при шлифовании в автоматизированном производстве является разработка математических моделей процесса обработки. Исследования в области теории абразивной обработки, достаточная изученность динамики круглошлифовальных станков, развитие теории точности, а также возможности современной вычислительной техники создали предпосылки для дальнейшего совершенствования математических моделей, методов расчета и управления процессом шлифования.

**Анализ литературы.** Теоретическое изучение процессов образования поверхностей при шлифовании можно разделить на две группы. К первой относятся исследования, в которых процесс рассматривается как совокупность воздействий на обрабатываемую поверхность единичных абразивных зерен круга (импульсная модель), в частности это работы А. В. Королева [1] и других исследователей. При анализе процесса формирования микрорельефа обработанной поверхности импульсная модель рассматривает шероховатость как совокупность царапин, каждая из которых в сечении, перпендикулярном вектору скорости резания, соответствует профилю вершины абразивного зерна.

Ко второй группе относятся работы, в которых предполагается, что профиль поверхности образуется как результат последовательного геометрического наложения некоторого числа элементарных режущих профилей круга (геометрическая модель), например, работа [2]. При использовании геометрической модели вся поверхность круга разделяется на ряд участков. На каждом участке профили абразивных зерен (режущих кромок) сносятся в одну плоскость. Модель процесса уподобляется цилиндрическому фрезерованию, причем каждый зуб такой «фрезы» представляет собой «элементарный режущий профиль». Этот профиль оставляет на детали

группу царапин, форма которых соответствует форме вершин кромок профиля. Расстояние между соседними элементарными «режущими профилями» равно расстоянию между режущими кромками на уровне глубины шлифования.

Однако, как показал анализ результатов исследований [1; 2], существующие модели операции шлифования рассмотрены для условий постоянства режимов резания и номенклатуры обрабатываемых изделий. Они не учитывают также взаимодействие возмущений и изменений, возникающих в технологической системе.

Предложенные в работах [3; 4] модели позволяют обосновать структуру системы управления обработки заготовок на автоматизированном оборудовании, выявить основные параметры технологической системы, наиболее существенно влияющие на выходные переменные операции, изменения которых необходимо учитывать при диагностике и управлении.

Эффективное диагностирование и управление процессом механической обработки возможно лишь на основе новых подходов к изучению зависимостей между основными технологическими параметрами процесса и выходными параметрами. Анализ предложенных моделей позволяет утверждать, что возмущения не имеют сплошного спектра, каждое из них имеет свои скоростные и частотные характеристики, избирательно влияют либо на один, либо на группу параметров качества объекта производства, что позволяет производить их идентификацию и принимать решение о введении того или другого вида коррекции.

**Цель статьи** – разработка комплексной модели операции шлифования, включающей в себя модели подсистем.

**Изложение основного материала.** Существующие модели были достаточны для предварительного анализа процессов функционирования системы и обоснования методов ее исследова-

ния. Для повышения эффективности диагностирования и управления необходимо их дальнейшее развитие и дополнение функционалами взаимодействия подсистем.

Решение этой задачи включает в себя выполнение двух этапов:

- а) разработки динамических моделей подсистем;
- б) разработки модели взаимодействия подсистем.

Структура модели подсистемы обработки резанием рассмотрена в функционалах. Они включают в себя вектор входных переменных  $X(t)$ , поступающих в подсистему из среды и других подсистем, векторов параметров состояния

$Z(t)$  и выходных переменных  $Y(t)$ . Они объединены функциями переходов и выходов, которые в общем виде могут быть записаны

$$Z(t) = \Phi(X(t), U(t), F(t)) \quad (1)$$

$$Y(t) = F(Z(t)). \quad (2)$$

Каждая из подсистем имеет свой календарь. Функционалы (1), (2) должны описывать процесс в предусмотренные интервалы времени с учетом дискретности процесса.

Комплексная модель системы представляет собой совокупность моделей различного класса (рис. 1), что значительно осложняет решение задач диагностики и управления.

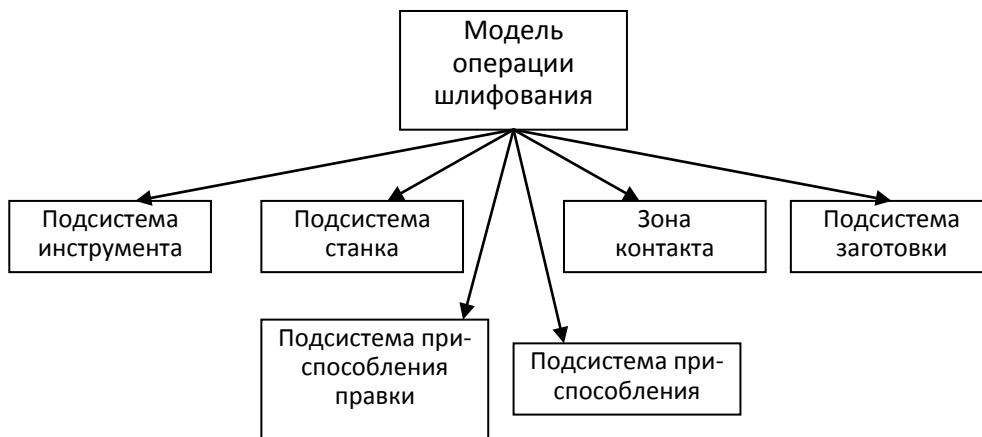


Рис. 1. Модели подсистем операции шлифования.

Взаимодействие подсистем характеризуется целой совокупностью физических и химических процессов, в основе которых лежит механическое взаимодействие.

Модель подсистемы «заготовка» должна строиться на принципах обобщенных моделей (дискретно-непрерывных, детерминированно-стохастических).

Аналогичное заключение можно сделать и по классу модели для подсистемы «инструмент». В действительности изменения параметров состояния базового участка поверхности при прохождении им зоны обработки идут непрерывно, за пределами зоны они прекращаются. Новые изменения возникают при новом контакте.

Параметры состояния подсистемы «зона контакта» зависят от размеров межцентрового расстояния, состояния поверхностей инструмента и изделия. Учитывая наличие большого числа случайных факторов, она должна описываться непрерывно-стохастическими моделями.

Модели подсистем «станок», «приспособление», «приспособление для правки круга» могут быть отнесены к классу непрерывных детерминированных моделей.

Моделирование структуры системы может производиться в любой последовательности. При этом будем полагать, что входные переменные, поступающие на подсистему и законы изменения

управляющих воздействий известны. Поскольку процесс обработки возможен только при появлении контакта круга с заготовкой, а основные выходные переменные определяются объектом производства (деталью), примем следующую последовательность анализа подсистем: зона контакта, инструмент, заготовка.

Основными входными переменными зоны контакта, как это следует из выполненного ранее анализа, являются параметры пространственного расположения инструмента и заготовки; параметры состояния рабочей поверхности инструмента и обрабатываемой поверхности заготовки до входа в зону контакта.

Параметрами состояния зоны контакта являются геометрические размеры; параметры процессов взаимодействия режущих кромок с обрабатываемым материалом; состояния поверхностей круга и заготовки в зоне. Время существования зоны – время обработки одной заготовки.

К выходным переменным зоны контакта относятся составляющие сил резания  $P_y$  и  $P_z$ ; радиальный сьем материала; параметры состояния поверхности заготовки после контакта; радиальный износ инструмента; тепловой поток, поступающий из зоны в инструмент и заготовку.

Подсистема абразивного инструмента является одной из наиболее сложных и наименее устойчивых. Основные временные параметры (пре-

рыватели) подсистемы:  $T_{\text{кк}}$  – время контакта участка поверхности с заготовкой ( $1 \times 10^{-5} \dots 8 \times 10^{-5}$  с),  $T_{\text{ок}}$  – время одного оборота круга ( $2 \times 10^{-2} \dots 6 \times 10^{-2}$  с),  $T_0$  – время обработки одной заготовки (30...120 с);  $T_{\text{п}}$  – время стойкости круга между правками (600...1800 с);  $T_{\text{к}}$  – время работы круга до полного износа ( $6 \times 10^4 \dots 18 \times 10^4$  с).

Входными переменными подсистемы абразивного инструмента при его правке являются частота вращения круга; геометрия правящего инструмента; элементы режима правки (продольная подача, глубина резания, число проходов). В результате правки формируются состояние рабочей поверхности инструмента, которое определяется геометрией отдельных режущих кромок, их числом, распределением по глубине инструмента, формой инструмента. Зависимости, устанавливающие связь между входными переменными и параметрами состояния инструмента при правке, приводятся в работах [1; 5; 6]. Для процессов шлифования параметры состояния инструмента, полученные после правки, являются начальными параметрами подсистемы.

К выходным переменным подсистемы «инструмент», кроме рассмотренных выше, относятся износ абразивного инструмента при обработке одной заготовки, расход инструмента при правке, затраты времени на правку и замену инструмента. Все они рассчитываются по известным методикам и входят в состав функции цели.

Заготовка является объектом производства, вся технологическая система предназначена для преобразования ее параметров. Основные временные интервалы подсистемы:  $T_{\text{кз}}$  – время контакта участка поверхности с инструментом ( $2 \times 10^{-3} \dots 8 \times 10^{-3}$  с);  $T_{\text{оз}}$  – время одного оборота (0,1...0,6 с);  $T_0$  – время обработки одной заготовки;  $T_{\text{п}}$  – время обработки партии заготовок.

Входными переменными подсистемы «заготовка» являются параметры состояния до установки заготовки на станок и до  $i$ -го контакта; частота вращения; силы резания; съем материала при выполнении  $i$ -го контакта; вероятностные характеристики поверхностного слоя после  $i$ -го контакта; тепловой поток, поступающий из зоны.

Выходные переменные подсистемы «заготовка», поступающие в среду, являются параметрами точности и качества поверхности, которые совпадают с параметрами состояния после заключительного оборота. Выходные переменные системы включают в свой состав совокупность выходных переменных подсистем и совокупность параметров, дающих техническую, экологическую, экономическую оценку работоспособности системы.

Комплексная модель операции шлифования должна содержать в своем составе модели отдельных подсистем и зависимости, устанавли-

вающие законы взаимодействия подсистем, что позволяет решать комплекс задач, связанных с прогнозированием качества обработки и значений параметров состояния самой системы при различных вариантах изменения режимных параметров и других входных переменных и управляющих воздействий.

**Выводы.** На основе выполненных исследований установлено, что модели операций шлифования могут быть отнесены к классу обобщенных, поскольку составляющие их зависимости и функционалы должны описываться как непрерывные, так и дискретные процессы, как детерминированные, так и стохастические процессы.

Основными структурными модулями, которые определяют ядро модели технологической системы, являются модели функционирования отдельных подсистем и модель взаимодействия подсистем.

В дальнейших исследованиях предполагается для оценки математической модели провести численный эксперимент по расчету текущих значений параметров состояния системы и выходных переменных, провести проверку адекватности модели сравнением экспериментальных значений выходных переменных операции шлифования с расчетными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А. В. Исследование влияния поперечной подачи правящего инструмента на шероховатость шлифуемой поверхности / А. В. Королев, Р. А. Березняк // Чистовая обработка деталей машин. Выпуск 2. – Саратов, 1976. – С. 52–60.
2. Филимонов Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов / Л. Н. Филимонов. – Л. : Машиностроение, 1973. – 134 с.
3. Новоселов Ю. К. Диагностика операций чистового шлифования / Ю. К. Новоселов, Э. Э. Ягьяев // Оптимизация производственных процессов : сб. науч. тр. – Севастополь, 2007. – Вып. 10. – С. 52–56.
4. Ягьяев Э. Э. Диагностика и прогнозирование технического состояния устройств автоматического управления / Э. Э. Ягьяев, Ю. К. Новоселов, Л. Б. Шрон // Автоматизация: проблемы, идеи, решения : материалы международной научно-технической конференции. – Севастополь, 2007. – С. 155–156.
5. Боготворский С. С. Научные основы лазерной правки шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов : автореф. дис. на соискание ученой степ. докт. техн. наук / С. С. Боготворский ; Национальный техн. ун-т Украины. – К., 1996. – 37 с.
6. Матюха П. Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга : автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / П. Г. Матюха ; Харьковский гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1996. – 48 с.