

# ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЛЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ПАРТИИ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

**А.В. Акинцева, П.П. Переверзев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В статье рассматривается возможность применения искусственного интеллекта (ИИ) при технологической подготовке производства (ТПП) на стадии расчета оптимальных режимов резания с учетом нестабильных условий обработки партии деталей на примере плоского шлифования, выполняемого на станках с ЧПУ. Задачи прогнозирования точности обработки и оптимизации режимов резания для станков с ЧПУ до сих пор не решены полностью из-за сложности их решения, связанной: со слишком большой размерностью оптимизируемого поля параметров, с необходимостью одновременного решения большого количества сложных взаимосвязанных математических моделей процесса обработки, оптимизацией многочисленных параметров режимов резания и учетом ограничений целевой функции в многомерном пространстве состояний процесса обработки, сложностью учета разнонаправленного влияния различных нестабильных технологических факторов на процесс съема припуска, сложностью моделей формирования технологического размера и параметров качества обрабатываемой поверхности. Большая размерность задач требует огромных вычислительных мощностей суперкомпьютерной техники, которая не имеет ни одно производственное предприятие. Применение ИИ позволяет преодолеть «проклятие размерности». Задачи прогнозирования точности обработки и оптимизации режимов резания предложено решать в заводских условиях путем применения обученной сверточной нейронной сети (НС), используемой для распознавания образов, позволяющей рассчитывать оптимальные режимы резания для станков с ЧПУ и прогнозировать точность обработки. Обучение НС проводится на множественной выборке (сто тысяч и более операций с ЧПУ) с готовыми оптимальными режимами резания. Подготовка выборки операций с готовыми оптимальными решениями проводится заранее на суперкомпьютере с применением программного обеспечения, созданного на основе разработанной методики комплексной структурно-параметрической оптимизации режимов резания для станков с ЧПУ, учитывающей влияние различных переменных технологических факторов на процесс обработки партии деталей.

*Ключевые слова: режимы резания, оптимизация, прогнозирование точности, искусственный интеллект*

## **Введение**

Основу современного автоматизированного машиностроения составляют металлорежущие станки с ЧПУ, позволяющие вести обработку по заданным циклам и на высокопроизводительных режимах резания. Ежедневно на подготовительном этапе производства (этапе технологической подготовки производства – ТПП) на машиностроительных производствах создаются тысячи управляющих программ (УП) для операций механической обработки, реализуемых на станках с ЧПУ. Обязательным этапом ТПП является назначение режимов резания для каждой обрабатываемой поверхности детали. Этап назначения режимов резания в ТПП на данный момент вызывает много спорных моментов. Причиной тому служит отсутствие у САМ-систем цифрового инструмента, позволяющего автоматически проектировать оптимальные циклы управления режимными параметрами, которые гарантируют высокую производительность процесса обработки и стабильность показателей точности и качества при изготовлении партии деталей. На данный момент для всех без исключения операций механической обработки назначение режимов резания в САМ-системах осуществляется из оцифрованных статистических данных, взятых из нормативно-справочной литературы 60–80 гг. выпуска. Данная литература разработана для универсальных

станков с ручным управлением и учитывает технические возможности этого оборудования; основным назначением литературы на момент создания являлось нормирование операций. Назначенные таким образом режимы резания не являются оптимальными, так как при их выборе не используются методы оптимизации, а также не гарантируется стабильность показателей качества и максимальная производительность и стойкость режущего инструмента, минимальная себестоимость операции при изготовлении партии изделий. Отметим, что большинство САМ-систем имеет возможность ручной корректировки назначенных режимов резания. Предполагается, что технолог скорректирует первоначально назначенные режимы, опираясь на собственный опыт или же на результаты адаптации их к реальным производственным условиям путем обработки ряда пробных заготовок. В результате можно сказать, что в автоматизированном машиностроительном производстве на данный момент отсутствует система автоматического назначения высокопроизводительных режимов резания для станков с ЧПУ. Технологи не успевают проводить качественную отладку режимов резания в УП, что обуславливает низкую производительность операций, выполняемых на станках с ЧПУ. Зачастую технологи вынуждены параллельно с участками станков с ЧПУ создавать участки механической обработки на универсальных станках с ручным управлением, чтобы успеть выполнить производственный план и исправить брак после обработки на станках с ЧПУ. Такие станки, несмотря на их технические возможности, в современном автоматизированном машиностроительном производстве используются крайне неэффективно, без реализации их полного потенциала, с низкой производительностью операций. Такая ситуация, связанная с обязательным этапом ручного назначения и экспериментальной отладки режимов резания для каждой поверхности заготовки, не позволяет чисто технически проводить полную цифровизацию машиностроительной отрасли, создавать цифровые фабрики, умные производства и киберфизические системы.

Аналогичная ситуация складывается и с вопросом прогнозирования возможности обеспечения точности и качества обработки при изготовлении партии деталей. Единственным этапом контроля в современных САМ-системах является моделирование взаимодействия инструмента и заготовки с точки зрения геометрии траектории движения без учета влияния силы резания и упругих деформаций технологической системы. Поэтому с целью стабильного выполнения требований чертежа по точности и качеству режимы резания занижаются до безопасного уровня. Проверка выполнения требований чертежа по точности и качеству при использовании назначенных режимов резания в настоящий момент возможна только путем реальной обработки ряда пробных заготовок. Все это, несомненно, не только увеличивает продолжительность ТПП и время самой операции, но и делает невозможным его полную цифровизацию, а также не гарантирует стабильность показателей точности и качества при изготовлении партии деталей.

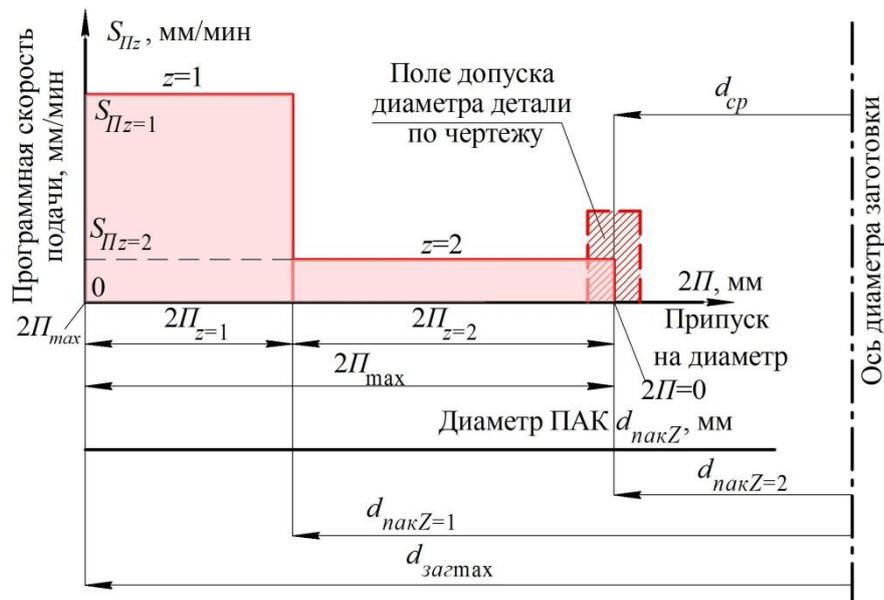
Сложившаяся заградительная для цифровизации машиностроения ситуация обусловлена тем, что задача полного расчета оптимальных режимов резания для станков с ЧПУ является сложной научно-технической проблемой, которая до сих пор полностью не решена из-за следующего ряда причин:

- слишком большая размерность поля оптимизируемых параметров режимов резания;
- необходимость решения большого количества сложных взаимосвязанных математических моделей, описывающих реальные процессы съема металла, формообразования обрабатываемой поверхности, формирования технологического размера и его погрешности, образования шероховатости и тепловых дефектов на обрабатываемой поверхности;
- сложность моделирования разнонаправленного влияния различных переменных технологических факторов на производительность и качество обработки партии деталей, связанных с колебанием припуска на обработку, затуплением режущего инструмента, переменной жесткостью технологической системы, ступенчатым изменением циклов программных подач в процессе съема припуска;
- оптимизация в многомерном пространстве многочисленных параметров режимов резания и сложность моделирования технологических ограничений целевой функции, связанных с точностью и качеством поверхностного слоя обрабатываемой поверхности детали при нестабильных условиях обработки.

Рассмотрим более подробно проблему «большой размерности» задач прогнозирования точности обработки и оптимизации цикла режимов резания. Цикл – это управление режимным па-

раметром (например, для круглого врезного шлифования, программной скоростью подачи – рис. 1) на станках с ЧПУ ведется путем ступенчатого их изменения в зависимости от оставшейся части припуска (в случае, если управление съемом припуска ведется по прибору активного контроля) или в зависимости от программной подачи.

Цикл описывается количеством ступеней цикла, величинами программных значений режимов резания и частей снимаемого припуска на каждой ступени. Поэтому для двухступенчатого цикла (например, круглого врезного шлифования) надо оптимизировать 4 параметра, а для трехступенчатого – 6 параметров. Многие виды обработки на станках с ЧПУ ведутся с применением двух и трех циклов разных подач. Так, для внутреннего шлифования отверстий применяются два цикла: цикл поперечной подачи и цикл осевой подачи. Эти циклы также могут быть двух- или трехступенчатыми. Поэтому количество оптимизируемых параметров удваивается и составляет 8 или 12 параметров. Наиболее сложное управление ведется на операциях плоского шлифования (ПШ) с ЧПУ, где применяются три цикла подач режимов резания: поперечная, осевая и продольная скорость стола. В этом случае количество оптимизируемых параметров составляет 12 и 18 [1–2]. Отметим, что помимо параметров циклов подач, необходимо оптимизировать и другие постоянные параметры режимов резания, связанных с частотой вращения инструмента и заготовки, параметрами технологической наладки (перебег инструмента и др.) и параметрами режущего инструмента. Особенно много оптимизируемых параметров связано с режущим инструментом. На операциях шлифования необходимо оптимизировать 5 параметров характеристики круга: материал зерен, материал связки, зернистость, твердость, структуру. Таким образом, для круглого врезного шлифования надо оптимизировать 11 и 13 параметров, а для операций ПШ с ЧПУ – минимум 16 и 24 параметра, соответственно, для двух- и трехступенчатых циклов.



**Рис. 1. График двухступенчатого цикла программной скорости подачи  $\Delta tp_1$  и  $\Delta tp_2$  и части снимаемого припуска  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , соответственно, на первой и второй ступени при  $z = 1$  и  $z = 2$**

В настоящей момент можно выделить следующие значимые научные работы по плоскому шлифованию, направленные на повышение стабильности показателей точности и качества обработки, а также на повышение производительности процесса шлифования. В работе [3] разработана аналитическая модель плоского шлифования периферией круга с учетом влияния двух режимных параметров (скорость стола и радиальная подача), но не учтено влияние третьего режимного параметра, оказывающего значительное влияние на точность обработки, – осевой подачи. В работах [3–9] рассмотрено плоское шлифование с осевой подачей круга, при этом обработка ведется всей шириной круга, а обрабатываемая поверхность не превышает ширину круга. Отметим, что данный подход представляет собой частный случай обработки и является не совсем верным,

так как не всегда плоскость меньше или равна ширине круга. Если обрабатываемая поверхность больше ширины круга, то обработка шлифованием производится с учетом влияния осевой подачи. В результате задача моделирования процесса плоского шлифования в значительной мере усложняется. Вопросы повышения производительности и стабильности показателей точности за счет применения циклов управления режимными параметрами отражены в работах [3–12]. В ряде работ [13–18] учтено формирование отклонений формы плоских поверхностей деталей различной жесткости с учетом кинематики процесса шлифования и количественной их оценки с использованием статистических методов. Отсутствуют публикации по прогнозированию погрешности обработки, возникающей в цикле при совместном управлении тремя программными подачами на операциях плоского шлифования с ЧПУ. В работах [15–18] получены эмпирические узкодиапазонные модели, устанавливающие взаимосвязь между высотными параметрами шероховатости шлифованной поверхности для конкретных марок материалов. Отметим, что отсутствуют публикации по учету влияния переменных технологических факторов на точность и шероховатость обработки в цикле при совместном управлении тремя программными подачами на операциях плоского шлифования с ЧПУ.

Рассмотрим влияние нестабильных условий обработки на задачу оптимизации циклов режимов резания. Влияние переменных условий обработки резко увеличивает (на порядок) трудоемкость оптимизации параметров режимов резания, так как необходимо дополнительно вводить ограничения целевой функции при различных предельных и средних сочетаниях величин переменных технологических факторов [19]. Например, колебание припуска, затупление режущего инструмента, податливость ТС не имеют детерминированного значения и изменяются в определенном диапазоне от максимального до минимального значения. Поэтому в процессе оптимизации необходимо моделировать процесс съема металла при различных случайных сочетаниях величин переменных технологических параметров в диапазоне их варьирования.

В любом случае количество оптимизируемых параметров режимов резания больше десяти, что является неразрешимым по времени для любой системы оптимизации, реализуемой на компьютерах средней вычислительной мощности. Становится неважным, десять или двадцать режимных параметров надо оптимизировать, так как такую задачу оптимизации невозможно будет решить на заводских компьютерах технологов за разумное время. Такая большая размерность задачи полной оптимизации режимов резания требует применения огромных вычислительных мощностей суперкомпьютерной техники, которые не имеет ни одно производственное предприятие.

Следовательно, надо искать решение, которое позволит преодолеть это «проклятие размерности». В качестве такого решения предлагается использовать искусственный интеллект (ИИ), который нечувствителен к размерности оптимизационной задачи. ИИ решает задачу оптимизации режимов резания в заводских условиях путем применения обученной сверточной нейронной сети (НС), широко применяемой для распознавания образов, позволяющей рассчитывать оптимальные режимы резания для станков с ЧПУ.

### **Применение искусственного интеллекта в задачах оптимизации режимов резания и прогнозирования точности обработки для нестабильных условий обработки партии деталей на станках с ЧПУ**

Рассмотрим более подробно на примере плоского шлифования с осевой подачей применение ИИ в задачах оптимизации режимов резания для нестабильных условий обработки партии деталей, изготавливаемых на станках с ЧПУ. На рис. 2 показана укрупненная схема обученной НС для расчета оптимальных режимов резания операций ПШ с ЧПУ. Во входном слое НС вводятся следующие группы входных параметров:

1. Параметры заготовки – включают в себя материал заготовки и его характеристику (марку, состояние, механические свойства); точность размеров, точность формы, точность расположения поверхностей, технические условия; требования к состоянию поверхностного слоя (допускаемое упрочнение); вид заготовки, величина и характер припусков на обработку, наличие поверхностной корки; габаритные размеры заготовки.

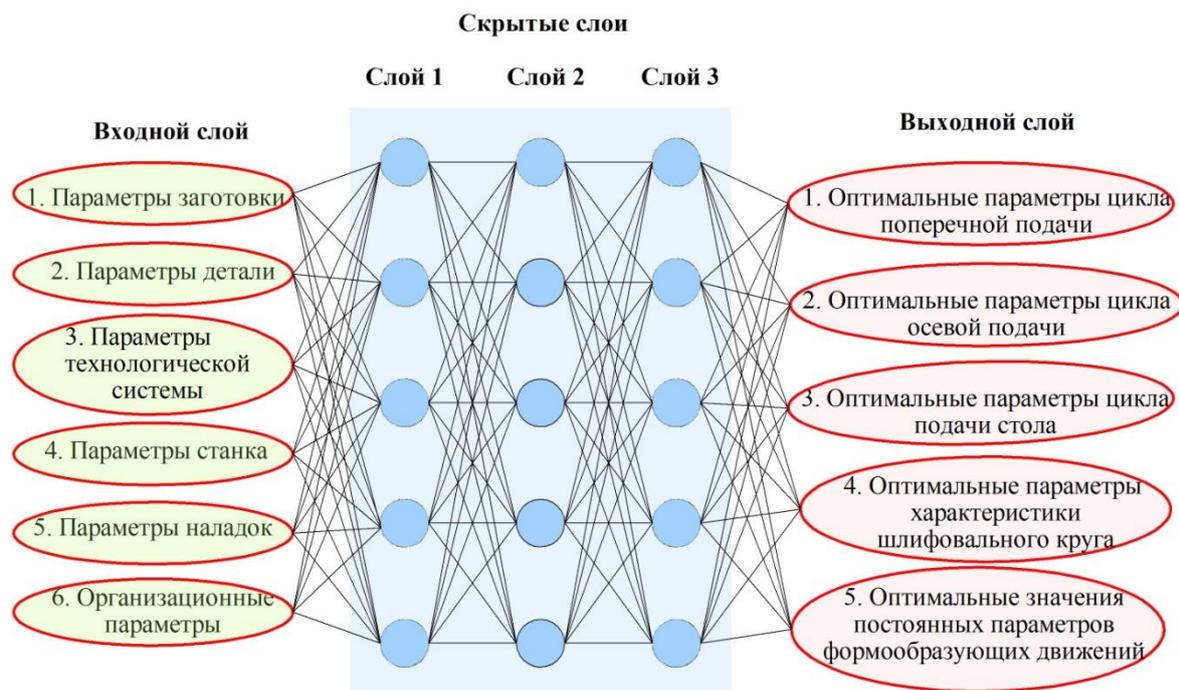
2. Параметры детали – включают в себя точность размеров, отклонение формы, шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения, структуру поверхностного слоя.

3. Параметры технологической системы (ТС) – включают в себя параметры жесткости ТС по длине обработки, погрешности установки и базирования заготовки.

4. Параметры станка – включают в себя диапазоны подач, параметры формообразующих движений, мощности приводов, кинематические и метрологические характеристики, показатели жесткости ТС, геометрические размеры шлифовального круга.

5. Параметры наладок – включают в себя перебеги круга в осевом и продольном направлениях, параметры полноты заполнения стола станка заготовками, характер обратных ходов подачи станка (рабочий или выхаживающий), стратегию траектории круга при снятии припуска.

6. Организационные параметры – включают в себя серийность обрабатываемой партии деталей, технологическое и метрологическое обеспечение, расходные материалы.



**Рис. 2. Увеличенная схема обученной нейронной сети для расчета оптимальных циклов режимов резания**

Параметры входного слоя передаются в скрытые слои НС, в которых они преобразуются в параметры выходного слоя, в котором представлены следующие группы выходных параметров сети (так как выбрано плоское шлифование, то оптимизировать требуется циклы радиальной и осевой подач, скорость стола):

1. Оптимальные параметры цикла поперечной подачи – включают в себя параметры программной скорости поперечной подачи и снимаемой части припуска на каждой ступени цикла.

2. Оптимальные параметры цикла осевой подачи – включают в себя параметры программной скорости осевой подачи и снимаемой части припуска на каждой ступени цикла.

3. Оптимальные параметры цикла продольной подачи – включают в себя параметры программной скорости продольной подачи и снимаемой части припуска на каждой ступени цикла.

4. Оптимальные параметры характеристики круга.

5. Оптимальные значения постоянных параметров формообразующих движений – частота вращения шлифовального круга.

Обучение НС проводится на множественной выборке операций ПШ с ЧПУ с готовыми оптимальными режимами резания. Выборка операций должна охватывать все нормативное пространство машиностроительной отрасли, состоящее из взаимосвязанных и пересекающихся диапазонов размеров обработки, припусков, материалов заготовки, допусков размеров заготовки и детали, параметров качества, скоростей подач, характеристик кругов, СОЖ и пр. В результате можно сказать, что подготовка множества операций ПШ с оптимальными циклами режимами резания представляет собой сложную научно-техническую задачу, связанную (как сказано выше)

с большой размерностью оптимизируемых параметров режимов резания, с необходимостью решения большого количества сложных взаимосвязанных математических моделей с учетом нестабильных условий обработки.

На рис. 3 приведена структурная схема формирования оптимального цикла режимов резания для операции ПШ с ЧПУ, на которой показаны состав и взаимосвязь различных блоков, характеризующие сложность решения задачи оптимизации. Оптимизация циклов режимов резания для операций ПШ с ЧПУ должна проводиться в единой виртуальной среде с использованием технологий цифрового двойника (ЦД). ЦД операции ПШ должен достоверно моделировать физические явления, возникающие в зоне резания, и учитывать функциональные составляющие физического содержания технологического процесса (ТП): процесс стружкообразования, взаимное положение детали и шлифовального круга, силу резания, температуру в зоне резания и т. д. Основу ЦД операции ПШ с ЧПУ составляют модели:

- аналитическая модель силы резания, которая устанавливает взаимосвязь между основными технологическими факторами, оказывающими влияние на силу резания, а также учитывает физику процесса резания, кинематику и др. особенности;
- модель расчета жесткости технологической системы (деталь, режущий инструмент, основные и вспомогательные приспособления);
- модель технологических перемещений (программная и фактическая подачи, упругие деформации технологической системы, глубина резания);
- модель расчета глубины резания (режимы резания, геометрическая площадь контакта, жесткость технологической системы, кинематика, физико-механические свойства обрабатываемого материала, затупление и износ режущего инструмента и т. д.);
- модель съема припуска (суммирование глубины резания на протяжении всего времени обработки и по всей обрабатываемой поверхности);
- модель формирования технологического размера (модель расчета параметров обрабатываемой поверхности в конце операции);
- модель формирования погрешности технологического размера (модель расчета погрешности технологического размера, модель расчета погрешности формы, модель расчета погрешности, модель расчета суммарного отклонения формы и расположения поверхностей);
- модель управления производительностью операции механической обработки (структура ступенчатого изменения циклов режимов резания, распределение припуска по ступеням цикла, расчет основного времени, расчет конечных размеров обрабатываемой детали и погрешности обработки) с учетом влияния переменных технологических факторов (колебания припуска, изменение режущей способности инструмента, переменная жесткость технологической системы, вариация физико-механических свойств обрабатываемого материала и т. д.).

Перечисленные выше модели позволяют виртуально имитировать послойное удаление припуска со всей обрабатываемой поверхности с учетом нестабильных условий обработки. В результате становится возможным расчет технического размера и его погрешности. Это делает возможным наложение ограничения по точности обработки. Отметим, что также перечисленные выше модели позволяют учитывать влияния нестабильных факторов производства таких, как степени затупления круга, исходной плоскостности заготовки и колебания припуска в партии деталей (см. рис. 3). По перечисленному выше ряду моделей в ближайшее время планируется выпустить серию статей, где с каждой моделью можно будет ознакомиться более подробно.

Для решения задачи оптимизации разработана методика структурно-параметрической оптимизации циклов режимов резания для операций плоского шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ. Данная методика разработана с использованием единой методологии комплексной структурно-параметрической оптимизации циклов шлифования с ЧПУ [20]. В ее основе находится цифровая модель процесса плоского шлифования, устанавливающая взаимосвязь между всеми входными и выходными параметрами процесса обработки. В качестве математического метода оптимизации используется метод динамического программирования, целевая функция может представлять из себя основное время, себестоимость операции, стойкость инструмента. Отметим, что часть входных параметров системы оптимизации циклов ПШ с ЧПУ могут быть использованы как и параметры управления циклом режимов резания, так и ограничением методики оптимизации. Например, характеристика шлифовального круга, в случае возможности ее варьирования,

станет параметром управления циклом. В противоположном случае она станет ограничением цикла. Также к обязательным ограничениям цикла относятся требования чертежа по точности и качеству.



**Рис. 3. Структурная схема формирования оптимального цикла режимов резания для операций плоского шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ**

На рис. 4 представлена информационная клетка, используемая в методике оптимизации циклов режимов резания для операций ПШ с ЧПУ. Сама информационная клетка является «безразмерной», а методика не ограничивает количество оптимизируемых параметров. В результате становится возможным проведение комплексной (совместной) оптимизации не только всех режимов резания, но и других параметров управления циклом (характеристика и геометрические параметры круга, величина перебега, количества ступеней в цикле и т. д.) при условии минимизации себестоимости и максимизации производительности операции, сокращении количества выпускаемого брака. В результате становится возможной полная автоматизация процесса проектирования операции плоского шлифования с ЧПУ и цифровизация ТПП на этапе подготовки УП ЧПУ.

Подготовка выборки операций с готовыми оптимальными решениями проводится заранее на суперкомпьютере, с применением программного обеспечения, созданного на основе разработанной методики комплексной структурно-параметрической оптимизации режимов резания для операций плоского шлифования с ЧПУ, учитывающей влияние различных переменных технологических факторов на процесс обработки партии деталей. На основе данной выборки производится обучение НС.

Другим перспективным направлением использования созданных математических, методических и программных разработок является возможность создания системы контроля проектируемых или уже существующих заводских циклов режимов резания на возможность обеспечения заданной точности технологического размера и его погрешности, а также параметров качества поверхностного слоя обработанной поверхности. Становится возможным проведение контроля выполнения на операции плоского шлифования следующих требований по точности: прямолинейности, плоскостности, параллельности, перпендикулярности и др. Учет влияния нестабиль-

ных условий обработки позволит прогнозировать стабильность показателей точности и качества при изготовлении партии деталей.

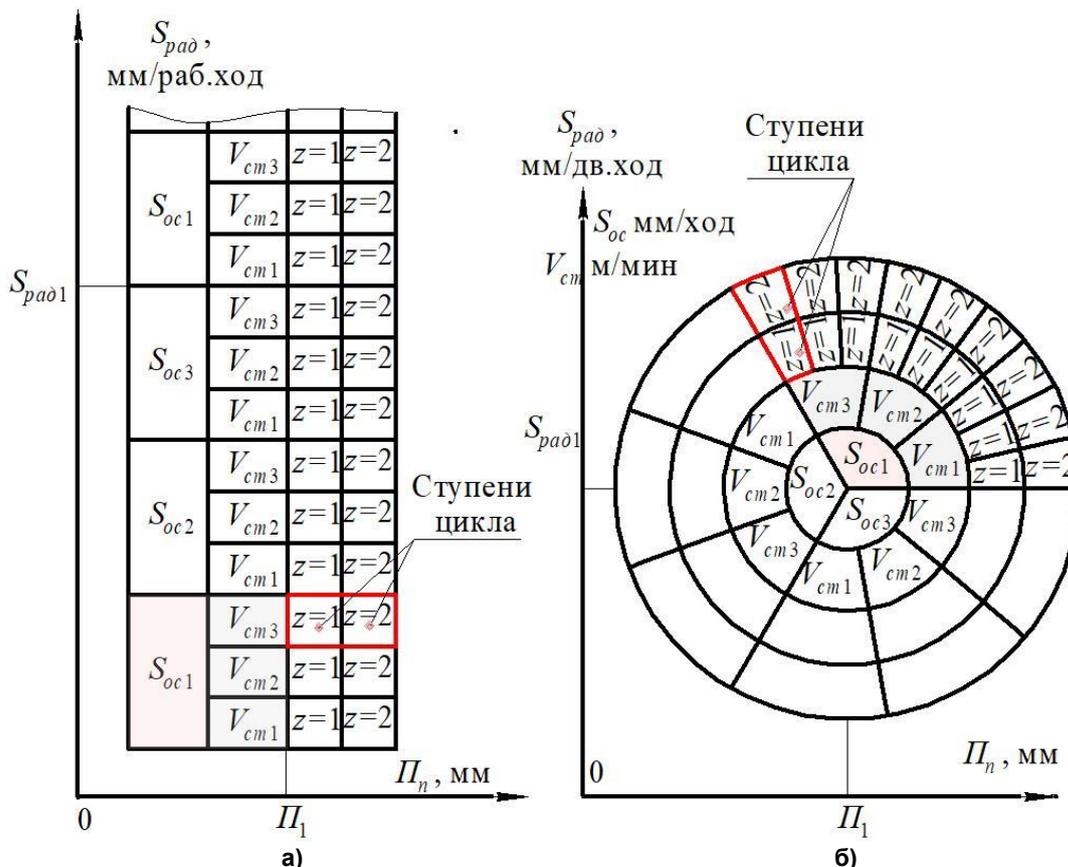


Рис. 4. Информационная клетка: а) – прямоугольная; б) – секториальная

**Выводы**

1. Проектирование операций металлообработки характеризуется необходимостью назначения более десяти технологических настроечных и организационных параметров, в том числе и режимов резания, реализуемых на станках с ЧПУ в формате автоматических ступенчатых циклов, что невозможно реализовать в производственных условиях на типовых заводских компьютерах. Также на данный момент в имеющихся САМ-системах отсутствует возможность прогнозирования точности обработки при изготовлении партии деталей. Чаще всего с целью достижения заданных чертежом параметром точности и качества режимы резания назначаются заниженными, что, несомненно, снижает производительность процесса обработки.

2. Учет влияния нестабильных условий обработки партии деталей на станках с ЧПУ существенно усложняет решение задач прогнозирования точности обработки и оптимизации режимов резания из-за необходимости моделирования процесса съема металла при различных случайных сочетаниях величин переменных технологических параметров в диапазоне их варьирования. Поэтому до сих пор данные задачи остаются нерешенными из-за слишком высокой размерности, что требует больших вычислительных мощностей компьютеров.

3. Предложенная впервые методика применения обученной НС позволяет обойти ограничение по размерности в задачах прогнозирования точности обработки и оптимизации режимов резания. Обучение НС проводится на множественной выборке операций металлообработки с готовыми оптимальными режимами резания. Подготовка множественной выборки для обучения НС производится по разработанной методике комплексной оптимизации управляющих параметров для операций плоского шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ. Методика позволяет производить одновременную оптимизацию неограниченного количества параметров управления циклом (количество ступеней цикла, подачи и припуск по ступеням), скорости резания (частоты вращения заготовки и круга), параметров характеристики круга (твердость, зернистость, структу-

ра, материал зерен и связки) и параметров технологических наладок (диаметр и высота круга, перебеж круга).

4. Вторым направлением применения НС является прогнозирование стабильности показателей точности обработки при изготовлении партии деталей. Данной проверке могут быть подвергнуты как вновь разрабатываемые циклы, так и применяемые в заводских условиях циклы режимов резания. Учет влияния нестабильных условий обработки позволит охватить все возможное сочетание «крайних» условий обработки при изготовлении партии деталей (колебания припуска, исходную плоскостность заготовки, затупления шлифовального круга и т. д.).

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00792.**

### Литература

1. Терган, В.С. Плоское шлифование / В.С. Терган, Б.С. Либерман. – М.: Изд-во Высшая школа, 1969. – 284 с.

2. Филимонов, Л.Н. Плоское шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1985. – 109 с.

3. Yudin, S. Generalized cutting force model for grinding / S. Yudin, K. Smolyanov, P. Pereverzev // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709, No 033005. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033005

4. Shipulin, L.V. Three-Stage Cycle in Plane Grinding by the Wheel Periphery / L.V. Shipulin, I.V. Shmidt // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40, No. 4. – P. 347–350. DOI: 10.3103/S1068798X20040218

5. Николаенко, А.А. Моделирование обеспечения точности обработки при плоском глубинном шлифовании периферией круга / А.А. Николаенко // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 57–59.

6. Воронов, С.А. Математическое моделирование процесса плоского шлифования / С.А. Воронов, М.А. Вэйдун // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 4. – С. 85–94.

7. Носенко, В.А. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга / В.А. Носенко, С.В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 74–79.

8. Дианов, А.А. Образование волнистости при плоском прерывистом шлифовании периферией круга / А.А. Дианов, Е.Ю. Татаркин, В.А. Терентьев // Ползуновский Вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 127–131.

9. Ильиных, А.С. Формирование качества поверхности при плоском шлифовании торцем круга / А.С. Ильиных // Технология машиностроения. – 2011. – № 4. – С. 19–22.

10. Voronov, S.A. Influence of technological system's rigidity on the dynamics of grinding process of flexible parts / S.A. Voronov, I.A. Kiselev, M. Weidong // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 226(2), No. 02002. DOI: 10.1051/mateconf/201822602002

11. Soler, I. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding / I. Soler, N.V. Le, M.D. Si // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129, No. 010706. DOI: 10.1051/mateconf/201712901076

12. Amon, G. Modeling of Vibration Condition in Flat Surface Grinding Process / G. Amon, W. Jin, A. Uwimbabazi // Shock and Vibration. – 2020. – Vol. 12. – P. 1–12. DOI: 10.1155/2020/3069895

13. Свирицев, В.И. Прогнозирование формирования шероховатости поверхности при плоском торцевом планетарном шлифовании / В.И. Свирицев, И.В. Подборнов, В.К. Флегентов // Технология машиностроения. – 2010. – № 12. – С. 14–16.

14. Подборнов, И.В. Прогнозирование формирования остаточной шероховатости поверхности при плоском торцевом планетарном шлифовании / И.В. Подборнов, В.И. Свирицев // СТИН. – 2011. – № 5. – С. 36–37.

15. Nosenko, V.A. Removal of material at different stages of deep plane grinding / V.A. Nosenko, V.K. Zhukov, S.A. Zotova et al. // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28 (6). – P. 606–610. DOI: 10.3103/S1068798X0806021X

16. Gong, Y.D. *The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology* / Y.D. Gong, B. Wang, W.S. Wang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 129. – P. 123–126. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00589-7

17. Hecker, R.L. *Predictive modeling of surface roughness in grinding* / R.L. Hecker, S.Y. Liang // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2003. – Vol. 43. – P. 755–759. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.092

18. Zhou, X. *Modeling and predicting surface roughness of the grinding process* / X. Zhou, F. Xi // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2002. – Vol. 42. – P. 969–977. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00011-1

19. Pereverzev, P.P. *Designing optimal automatic cycles of round grinding based on the synthesis of digital twin technologies and dynamic programming method* / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar et al. // *Inter. J. Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 1. – P. 1–11. DOI: 10.5194/ms-10-331-2019

20. Акинцева, А.В. *Диагностика качества проектируемого цикла внутришлифовальной обработки* / А.В. Акинцева, А.В. Прохоров, С.В. Омельченко и др. // *СТИН*. – 2020. – № 7. – С. 27–30.

**Акинцева Александра Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техники, технологии и строительства», Южно-Уральский государственный университет, akintsevaav@susu.ru

**Переверзев Павел Петрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, pereverzevpp@susu.ru

*Поступила в редакцию 15 мая 2022 г.*

DOI: 10.14529/engin220205

## THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE TASKS OF OPTIMIZING CUTTING MODES AND PREDICTING PROCESSING ACCURACY FOR UNSTABLE PROCESSING CONDITIONS OF A BATCH OF PARTS ON CNC MACHINES

**A.V. Akintseva**, akintsevaav@susu.ru

**P.P. Pereverzev**, pereverzevpp@susu.ru

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The article considers the possibility of using artificial intelligence (AI) in the technological preparation of production (TPP) at the stage of calculating optimal cutting modes, considering unstable processing conditions of a batch of parts on the example of flat grinding performed on CNC machines. The problems of predicting processing accuracy and optimization of cutting modes for CNC machines have not yet been fully solved due to the complexity of their solution associated with: too high dimensionality of the optimized parameters, need to solve a large number of complex interrelated mathematical models of the processing process, optimization of numerous parameters of cutting modes and considering the limitations of the objective function in a multidimensional states space of the processing process, complexity of considering the multidirectional influence of various unstable technological factors on the process of the allowance removal, complexity of the models of formation of the technological size and quality parameters of the processed surface. The high dimensionality of tasks requires huge computing power of super-computer technology, which no manufacturing enterprise has. The use of AI allows overcoming the «curse of dimensionality». It is proposed to solve the problems of predicting processing accuracy and optimizing cutting modes in the production conditions by using a trained convolutional neural network (NN) used for pattern recognition, which allows calculating optimal cutting

modes for CNC machines and predicting processing accuracy. NN training is performed on a multiple sample (one hundred thousand or more CNC operations), with ready optimal cutting modes. Preparation of a sample of operations with ready optimal solutions is performed in advance on a supercomputer, using software created on the basis of the developed technique of complex structural and parametric optimization of cutting modes for CNC machines, considering the influence of various variable technological factors on the processing of a batch of parts.

*Keywords: cutting modes, optimization, accuracy predicting, artificial intelligence*

### References

1. Tergan V.S., Lieberman B.S. *Ploskoe shlifovanie* [Surface grinding]. Moscow. Publishing House Higher School, 1969. 284 p.
2. Filimonov L.N. *Ploskoe shlifovanie* [Surface grinding]. Leningrad. Mashinostroenie, Leningrad branch, 1985. 109 p.
3. Yudin S., Smolyanoy K., Pereverzev P. Generalized cutting force model for grinding. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no 033005. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033005
4. Shipulin L.V., Shmidt I.V. Three-Stage Cycle in Plane Grinding by the Wheel Periphery. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, no. 4, pp. 347–350. DOI: 10.3103/S1068798X20040218
5. Nikolayenko A.A. [Simulation of Ensuring the Accuracy of Processing in Flat Deep Grinding by the Periphery of the Circle]. *Engineering technology*, 2011, no. 5, pp. 57–59. (in Russ).
6. Voronov S.A., Weidong M.A. [Mathematical Modeling of the Process of Flat Grinding]. *Problems of mechanical engineering and reliability of machines*, 2017, no. 4, pp. 85–94. (in Russ).
7. Nosenko V.A., Nosenko S.V. [Flat Deep Grinding of Grooves in Blanks Made of Titanium Alloy with Continuous Dressing of the Grinding Wheel]. *Bulletin of mechanical engineering*, 2013, no. 4, pp. 74–79. (in Russ).
8. Dianov A.A., Tatarkin E.Yu., Terentiev V.A. [The Formation of Waviness in Flat Intermittent Grinding by the Periphery of the Circle]. *Polzunovskiy Bulletin*, 2009, no. 1–2, pp. 127–131. (in Russ).
9. Ilinykh A.S. [Formation of Surface Quality During Flat Grinding with the End Face of a Circle]. *Engineering Technology*, 2011, no. 4, pp. 19–22. (in Russ).
10. Voronov S.A., Kiselev I.A., Weidong M. Influence of technological system's rigidity on the dynamics of grinding process of flexible parts. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 226(2), no. 02002. DOI: 10.1051/mateconf/201822602002
11. Soler I., Le N.V., Si M.D. Influence of rigidity of the hardened parts on forming the shape accuracy during flat grinding. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, no. 010706. DOI: 10.1051/mateconf/201712901076
12. Amon G., Jin W., Uwimbabazi. Modeling of Vibration Condition in Flat Surface Grinding Process. *Shock and Vibration*, 2020, vol. 12, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/3069895
13. Svirshchev V.I., Podbornov I.V., Flegentov V.K. [Prediction of the Formation of Surface Roughness in Flat Face Planetary Grinding]. *Engineering technology*, 2010, no. 12, pp. 14–16. (in Russ).
14. Podbornov I.V., Svirshchev V.I. [Forecasting the Formation of Residual Surface Roughness in Flat Face Planetary Grinding]. *STIN*, 2011, no. 5, pp. 36–37. (in Russ).
15. Nosenko V.A., Zhukov V.K., Zotova S.A., Nosenko S.V. Removal of material at different stages of deep plane grinding. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28(6), pp. 606–610. DOI:10.3103/S1068798X0806021X
16. Gong, Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 129, pp. 123–126. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00589-7
17. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 755–759. DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.092

18. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, vol. 42, pp. 969–977. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00011-1

19. Pereverzev P.P., Akintseva A.V., Alsigar M.K., Ardashev D.V. Designing optimal automatic cycles of round grinding based on the synthesis of digital twin technologies and dynamic programming method. *Inter. J. Mechanical Sciences*, 2019, vol. 1, pp. 1–11. DOI: 10.5194/ms-10-331-2019

20. Akintseva A.V., Prokhorov A.V., Omel'chenko S.V. E.N. Simonov Diagnostics of Internal-Grinding Cycles at the Design Stage. *Russian Engineering Research*, 2020, vol.40 (12), pp. 1052–1054 DOI: 10.3103/S1068798X20120035

*Received 15 May 2022*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Акинцева, А.В. / Применение искусственного интеллекта в задачах оптимизации режимов резания и прогнозирования точности обработки для нестабильных условий обработки партии деталей на станках с ЧПУ / А.В. Акинцева, П.П. Переверзев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 52–63. DOI: 10.14529/engin220205

**FOR CITATION**

Akintseva A.V., Pereverzev P.P. The use of artificial intelligence in the tasks of optimizing cutting modes and predicting processing accuracy for unstable processing conditions of a batch of parts on CNC machines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 52–63. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin220205

---