

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ЦИКЛОВ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ

А.В. Акинцева, П.П. Переверзев

Нахождение оптимального цикла шлифования, обеспечивающего выполнение требований чертежа по точности и качеству за минимально возможное время, является сложной научно-технической задачей, решение которой представляется возможным с помощью метода динамического программирования (МДП), относящегося к методам теории оптимального управления. В данной статье рассмотрены основные аспекты применения МДП для оптимизации циклов шлифования. Использование данного метода обусловлено тем, что он не требует построения заранее границ области допустимых ограничений и не является чувствительным к свойствам моделей управления и ограничений. В результате становится возможным наложение ограничения по точности, причем не только для диаметральной погрешности, но и для отклонений формы и взаимного расположения поверхностей. С целью повышения производительности операций в качестве критерия целевой функции является минимальное время обработки.

Ключевые слова: метод динамического программирования, цикл, режимы резания, внутреннее и наружное шлифование.

Появление современных станков с ЧПУ, проводящих обработку на повышенных режимах резания и по заданным циклам, выявило проблему отсутствия систем автоматизированного проектирования, позволяющих проектировать оптимальные по производительности циклы. Основой системы автоматизированного проектирования чаще всего является нормативно-справочная литература, разработанная на основе накопленных статических данных и для менее мощных универсальных станков. Полученные в результате использования систем автоматизированного проектирования циклы являются стартовыми и требуют адаптации к реальным условиям производства, что ведет к дополнительным затратам по времени и производственным ресурсам. При этом мощности станков с ЧПУ нового поколения используются не полностью, и зачастую производительность универсальных станков оказывается выше, чем у станков с ЧПУ.

Отметим, что вопросам теории проектирования оптимальных циклов обработки для станков с ЧПУ уделяется недостаточное внимание. Подавляющее число исследователей изучают частные стороны проблемы проектирования оптимальных управляющих траекторий [1]. Наибольшее внимание уделено моделированию силы резания и моделированию технологических ограничений, влияющих на производительность операций. Итогом таких исследований являются частные рекомендации по режимам резания для лимитированного числа ограничений в узком диапазоне их варьирования. Решением выше описанной проблемы является разработка методики проектирования оптимальных по производительности циклов шлифования, а также создание с помощью данной методологии нормативной справочной базы и программного обеспечения.

Из-за наличия упругих перемещений в технологической системе и инерционности перемещающихся масс фактическая радиальная подача не равна программному значению. При ступенчатом переключении программной подачи фактическая радиальная подача асимптотически приближается к программной подаче по экспоненциальному закону. На протяжении всего цикла текущее значение фактической радиальной подачи ограничивается комплексом технологических ограничений, включающим в себя такие основные ограничения, как требуемая точность получаемого размера, шероховатость, микротвердость поверхности, стойкость режущего инструмента, мощность привода станка и др. Для обеспечения максимальной производительности операции необходимо стремиться к тому, чтобы текущее значение фактической радиальной подачи на протяжении всего пути снятия припуска максимально приближалась к области ограничений. В результате величина фактически снятого припуска будет максимально допустимой тем или иным ограничением, а цикл производительней. Управление траекторией фактически снятого припуска осуществляется путем ступенчатого изменения программной подачи.

Нахождение оптимальной траектории изменения программной радиальной подачи, обеспечивающей выполнение требований чертежа по точности и качеству, является сложной научно-технической задачей, решение которой представляется возможным с помощью методов теории оптимального управления. Анализ методов теории оптимального управления показал, что задачу отыскания детерминированных параметров управления циклов при нестабильных условиях обработки и целом ряде других технологических ограничений можно решить методом динамического программирования (МДП) [2]. МДП относится к методам нелинейного программирования и не зависит от дифференцируемости целевой функции и ее ограничений. С целью повышения производительности операций в качестве целевой функции взять минимальное время обработки, т.к. из-за наличия упругих деформаций фактическая радиальная подача в значительной мере отличается от программной, а значит, и время обработки для нескольких допустимых вариантов сочетаний параметров управления может существенно отличаться.

Рассмотрим применение МДП для оптимизации цикла управления одним параметром – радиальной подачей на примере внутреннего шлифования (рис. 1). По аналогии с классической транспортной задачей, описывающей применение МДП для нахождения кратчайшего расстояния между начальной станцией А и конечной станцией В [2], найдем оптимальную траекторию изменения радиальной подачи в зависимости от оставшейся части припуска. Только в нашем случае начальной станцией А будет являться исходное состояние технологического процесса (параметры заготовки, оборудования, останки, инструмента и др.), а конечной станцией В будет являться готовая деталь, удовлетворяющая требованиям чертежа по точности и качеству. В классической транспортной задаче между начальной и конечной станциями хаотично расположены промежуточные станции. В нашей задаче это будут информационные клетки, но в отличие от транспортной задачи информационные клетки расположим упорядоченно в зависимости от радиальной подачи и припуска.

МДП относится к методам дискретной оптимизации. Поэтому вертикальную ось радиальной подачи разобьем на m частей с максимальным возможным значением M . Аналогично поступим с горизонтальной осью припуска, разбив ее на n частей, где N является максимально возможным количеством дискрет припуска. Недостатком метода динамического программирования является то, что в силу необходимости применения дискретных значений управляющих параметров глобальный минимум целевой функции находится с определенной погрешностью, зависящей от величины их дискретности. Поэтому чем больше дискрет выделим, тем более точные будут расчеты, но с увеличением количества рассматриваемых информационных клеток увеличивается и время расчетов.

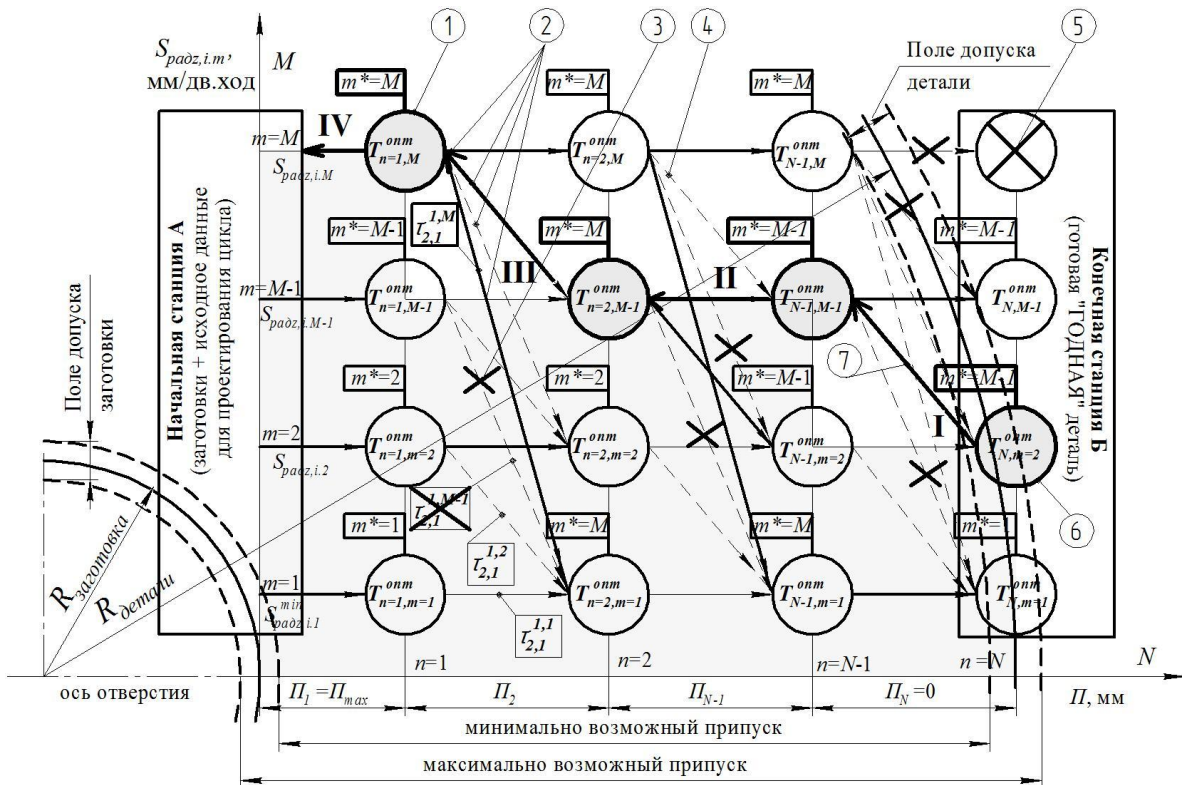


Рис. 1. Применение МДП для оптимизации цикла управления радиальной подачи в зависимости от оставшейся части припуска на примере внутреннего шлифования: 1 – промежуточные станции (информационная клетка); 2 – дороги между станциями (возможные варианты переключения радиальной подачи внутри цикла); 3 – «непроходимая» дорога между станциями (недопустимый по каким-либо ограничениям вариант переключения радиальной подачи); 4 – оптимальная дорога (оптимальный вариант переключения радиальной подачи); 5 – недопустимые станции; 6 – победитель на n -ом уровне; 7 – процедура обратного хода

Промежуточные станции между собой соединяют дороги, а информационные клетки – возможные варианты переключения (изменения) радиальной подачи (назовем их конкурирующими ходами). Отметим, что с целью сделать рис. 1 более понятным, количество конкурирующих ходов сокращаем из условия, что возможны ходы только на понижения уровня программной подачи (уровня M).

В транспортной задаче заранее известны время прохождения дороги (назовем время хода и обозначим τ) и ее доступность, т. е. возможно ли проехать по данной дороге. В нашей задаче в отличие от транспортной задачи данные параметры необходимо определить. Это можно сделать путем моделирования процесса съема металла в случае внутреннего и наружного шлифования на протяжении всей длины заготовки, т.к. обработка входного и выходного сечений в отличие от среднего сечения имеет ряд существенных особенностей: наличие зоны реверса и перебега круга, многоэтапность процесса (наличие этапов врезания, шлифования на проход, выхаживания

и др.) и др. [3–4]. Модель съема металла учитывает кинематику и особенности обработки рассматриваемого вида шлифования и позволяет рассчитывать фактическую радиальную подачу, силы резания, текущие значения радиусов, значение накопленного припуска и др. В результате становится возможным наложение ограничения не только диаметральных размеров, но отклонения формы и расположения поверхностей. Более подробно с моделью съема металла для процесса внутреннего шлифования можно ознакомиться в следующих статьях [3–4].

Согласно принципу оптимальности из конкурирующих ходов необходимо выбрать оптимальный ход, имеющий минимальное время достижения состояния. Конкурирующий ход участвует в выборе оптимального хода, если в достигнутом состоянии выполняются все ограничения целевой функции, т. е. ход является допустимым. Определение допустимости хода в случае переключения радиальной подачи осуществляется посредством наложения двух групп ограничений, действующих в начале цикла (по осыпаемости круга, мощности привода, допустимости диапазона подач и т. д.) и на протяжении всего цикла (точность, бесприжоговость, шероховатость обрабатываемой поверхности). После моделирования съема металла для рассматриваемой информационной клетки с координатами $[m, n]$ производится аналогичное моделирование съема оставшейся части припуска на минимально допустимой по станку радиальной подаче – координаты $[m_{max}, n_{min}]$. После того как для информационной клетки из ряда конкурирующих ходов определяется оптимальный, в нее записывается и сохраняется координата «откуда был сделан оптимальный ход» – m^* .

С целью повышения устойчивости показателей точности и качества обработанной поверхности к воздействию переменных технологических факторов проверку ограничений целевой функции МДП позволяет производить по двум группам предельных сочетаний значений технологических условий обработки. Наложение ограничений целевой функции для каждого конкурирующего хода производится в двух вариантах с использованием как величин благоприятных (минимальные значения степени затупления круга, исходного радиального биения заготовки, припуска, максимальный диаметр круга), так и неблагоприятных факторов (максимальная степень затупления круга, минимальные значения исходного радиального биения заготовки, припуска, диаметра круга).

После того как на последней дискрете припуска выбирается информационная клетка, имеющая оптимальное (минимальное) время обработки, процедурой обратного хода по координатам m^* восстанавливается оптимальная траектория изменения радиальной подачи в зависимости от оставшейся части припуска (рис. 2).

В результате оптимизации можно получить оптимальный «бесступенчатый цикл» (условное название), который в силу дискретности МДП будет иметь множество мелких ступеней. В данном случае количество ступе-

ней ограничено только числом узлов координатной сетки, на которых возможно переключение. Поэтому с целью получения траектории оптимального цикла с заданным количеством ступеней необходимо ввести ограничение целевой функции по количеству допустимых ступеней цикла, т. е. по количеству допустимых переключений, осуществляемых прибором активного контроля. В этом случае состояние процесса будем определять не только координатами $[n, m]$, но и дополнительной координатой z – номером ступени цикла (по-прежнему для удобства понимания рассматриваем на примере оптимизации одного управляющего параметра – радиальной подачи). На рис. 3 представлена структура информационной клетки, учитывающей ограничение по количеству переключений программной подачи. Более подробно с методикой проектирования оптимальных циклов на примере внутреннего шлифования можно ознакомиться в статье [5–6].

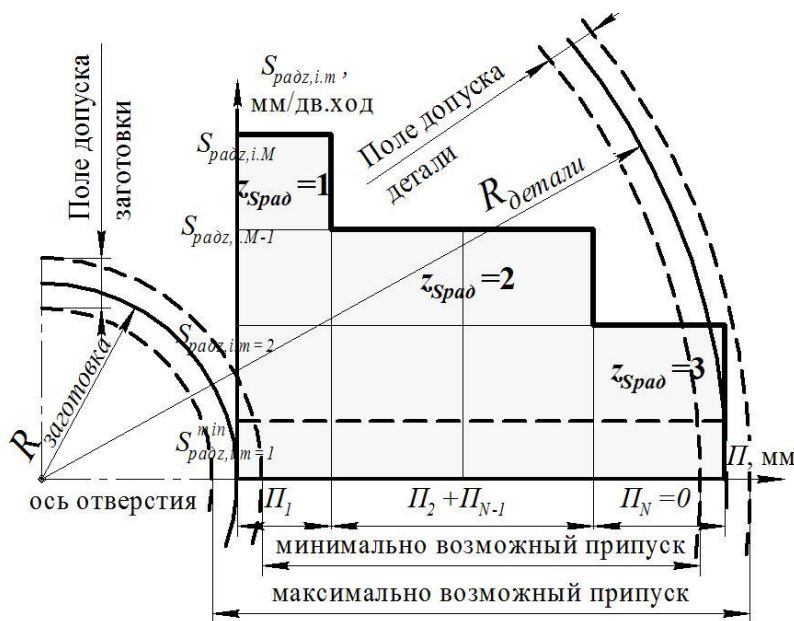


Рис. 2. Траектория оптимального цикла радиальной подачи

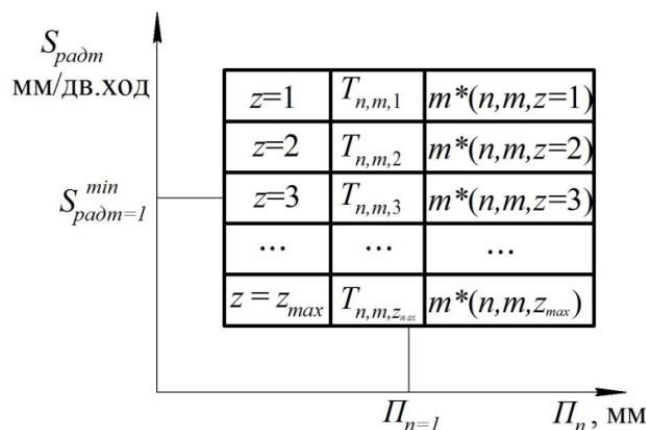


Рис. 3. Структура информационной клетки, учитывающей ограничение по количеству переключений программной подачи

Выводы. Применение МДП для оптимизации циклов шлифования позволяет с математической точностью рассчитывать оптимальные значения режимов резания (например, радиальной подачи) в зависимости от величины снимаемого припуска, а также осуществляет оптимальное распределение снимаемого припуска по ступеням цикла, при которых обеспечивается минимальное время цикла с учетом заданных технологических ограничений целевой функции и переменных технологических условий (степени затупления круга, исходного радиального биения заготовки, колебаний припуска и др.).

Библиографический список

1. Переверзев, П.П. Теория проектирования оптимальных циклов для металлорежущих станков с ЧПУ – 1 часть / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2017. – № 1. – С. 11–18.
2. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с.
3. Переверзев, П.П. Моделирование процесса съема металла при внутреннем шлифовании с учетом особенностей кинематики резания / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2016. – № 4. – С. 23–27.
4. Pereverzev, P.P. Modeling of metal removal during an internal grinding in view of kinematics cutting features / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36 (No. 10). – Pp. 888–893.
5. Переверзев, П.П. Методика проектирования оптимальных циклов внутреннего шлифования в многомерном пространстве управляющих параметров / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // СТИН. – 2016. – № 5. – С. 26–31.
6. Pereverzev, P.P. Automatic cycles' multiparametric optimization of internal grinding / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 121–126.

[К содержанию](#)