

УДК 621:658.5127

Н.Н. ПОПОК, д-р техн. наук, проф.

заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроительного производства<sup>1</sup>

E-mail: n.popok@psu.by

Н.В. БЕЛЯКОВ, канд. техн. наук, доц.

доцент кафедры технологии машиностроения<sup>2</sup>

E-mail: nikolay\_belyakov@mail.ru

С.К. СЕЛЕЗНЁВ

ассистент кафедры технологии машиностроения<sup>2</sup>

E-mail: stanislav.selezniow@yandex.by

<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь<sup>2</sup>Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19.09.2024.

## ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТАНКАМИ НА ОСНОВЕ ТИПИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЗОН ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ОРИГИНАЛЬНЫХ НЕКРУГЛЫХ ДЕТАЛЕЙ

*В работе проведен обзор тенденций в подготовке управляющих программ для металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Описано направление в программировании обработки деталей на основе типизации параметров зон переходных процессов. Анализ форм обрабатываемых конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, переходов их обработки, а также входов-выходов инструментов и их режущих частей в заготовку дает возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов. Приводятся фрагменты такого каталога для обработки цилиндрических внутренних конструктивных элементов деталей сверлением. Предложены соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ зон переходных процессов. Такой подход создает условия для теоретико-эмпирического имитационного моделирования процессов резания в зонах переходных процессов, обеспечивающего максимальную производительность обработки и стойкость инструментов с учетом воздействия различных факторов, в том числе сокращения длин рабочих ходов.*

**Ключевые слова:** классификатор, конструктивно-технологический элемент, режущий инструмент, ЧПУ, САМ-система, переходный процесс, адаптивные системы, управляющая программа, машиностроение

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-66-73>

**Введение.** В современном машиностроении широкое применение нашли металлорежущие станки с ЧПУ. Программирование обработки на таких станках может осуществляться следующими способами: 1) вручную в текстовом редакторе; 2) на стойке станка; 3) с помощью специализированного программного обеспечения.

Первый и второй способы применяются на производствах, в основе которых лежат повторяющиеся однотипные переходы и операции обработки несложных по конфигурации заготовок деталей, не требующие больших затрат времени на расчет траекторий, математические и технологические расчеты, а также ввод полученных параметров в систему. Реализация таких операций осуществляется, как правило, на универсальных

станках и станках с ЧПУ невысокой ценовой категории, и в интеграции станков в единую сеть управления по экономическим соображениям нет необходимости. К пользователям (технологам и операторам) предъявляется требование безупречного владения командами в виде G-кодов.

Третий способ находит применение в производствах сложных по конфигурации заготовок оригинальных некруглых деталей, для которых требуется применение разнообразных переходов и операций. Для их реализации, как правило, необходимо использовать обрабатывающие центры. Для таких деталей затраты времени на подготовку управляющих программ первым и вторым способами часто в разы превышают затраты времени на обработку. Современные САМ-системы

(Mastercam, NX, SolidCAM, Edgcam, PowerMill, T-FLEX ЧПУ, КОМПАС ЧПУ, Прамень ЧПУ) позволяют значительно сократить время программирования станков с ЧПУ за счет возможности автоматизированного определения траекторий перемещений инструментов и определения ряда технологических параметров, а также объединить оборудование в единую сеть передачи данных.

При проектировании операций обработки на металлорежущих станках с ЧПУ важное значение имеет расчет границ и параметров режимов резания при врезании и выходе инструментов (переходных процессах) в заготовку, а также определение положения систем координат заготовки и инструмента в начальной, промежуточных и конечной точках траекторий резания. Во время врезания и выхода инструментов динамически изменяются составляющие силы резания, наблюдается нестабильность упругих деформаций технологической системы, возрастание уровня вибраций, что существенно влияет на качество обработанной поверхности, может приводить к затуплению, перегреву и поломке инструмента и снижению производительности обработки [1–3].

Основными направлениями снижения последствий указанных негативных явлений при переходных процессах являются: использование систем адаптивного управления; обеспечение постоянства ряда параметров с помощью изменения режимов резания.

В системах адаптивного управления в переходных процессах используются методы регистрации изменения сил резания и (или) крутящего момента, активной мощности, перемещения слоя металла заготовки, виброакустических сигналов [4–7].

Однако предлагаемые решения адаптивного управления требуют использования специальных сложных и дорогих конструктивных решений, часто являются недостаточно эффективными ввиду отсутствия математических моделей для управления процессами резания, недостаточностью быстродействия механизмов станков, а также отсутствия и (или) невозможности установки из-за непригодности станков измерительных датчиков нужных размеров, точности и эффективности.

Параметрами, постоянство которых обеспечивается для снижения негативных последствий переходных процессов, являются: объемная производительность, подача на зуб, погрешность [8–9]. Особый интерес представляет высокоскоростная обработка, суть которой заключается в том, что при управлении станком при переходных процессах необходимо добиться постоянного малого сечения среза и высокой скорости (в 8–10 раз выше скорости традиционной обработки). При таком подходе из-за постоянной толщины среза уменьшаются колебания сил резания, а выделяющаяся

теплота переходит не в заготовку и инструмент, а в стружку.

Реализовать высокоскоростную обработку возможно только на самых современных станках с новыми типами приводов главного движения и подач, обеспечивающих соответствующие высокие значения частот вращения шпинделя, подач на рабочем и холостом ходах, дискретность перемещений, конструкциями направляющих, подшипниковых узлов, а также новыми конструкциями режущего и вспомогательного инструмента. Особенности систем ЧПУ для высокоскоростной обработки являются: короткий цикл определения траекторий; заложенные функции искусственного интеллекта (например, система контурного и наноконтурного управления (Modeler Control для Fanuk), система учета износа инструмента); реализация алгоритма просмотра кадров look-ahead со скоростью 100...200 кадров в секунду. Стоимость таких станков в сотни раз превышает стоимость традиционных станков с ЧПУ, составляющих по оценкам экспертов 85–95 % отечественного станочного парка.

Подготовка управляющих программ для высокоскоростной обработки производится с использованием САМ-систем, что требует соответствующего инструментария. Как показал анализ САМ-систем, одним из лидеров в этом направлении является компания CNC Software (система Mastercam). В системе для обработки фрезерованием предлагается использовать технологию динамических перемещений Dynamic Motion, согласно которой снимаемый припуск разбивается на одинаковые микрообъемы. Далее назначаются режимы резания для удаления этих микрообъемов при каждом срезе материала и, таким образом, формируется траектория перемещений инструмента. Схожие подходы предлагаются в системе NX (компания Siemens) в виде автоматической оптимизации подачи Automatic feed rate optimization. Система рассчитывает не микрообъемы снимаемого материала, а усредненные их значения, что позволяет использовать алгоритмы и для традиционной обработки.

Однако технологии Dynamic Motion и Automatic Feed Rate Optimization специализируются на обработке фрезами и не предусматривают использования других, например, осевых инструментов. Так для обработки сверлением при таких подходах невозможно прогнозировать влияние на качество обработки (точность размеров, шероховатость, допуски формы и расположения) таких негативных факторов, как наростообразование, изменение твердости поверхности заготовки, автоколебания, изменение векторов сил резания и деформация технологической системы, износ инструментов, температурные воздействия.

Таким образом, использование систем адаптивного управления, а также известные алгоритмы

обеспечения постоянства параметров вносят существенный вклад в решение проблемы обеспечения качества, но имеют ограниченную специфическую область применения.

При подготовке управляющих программ для металлорежущих станков с ЧПУ технологи и операторы чаще всего решают задачи программирования обработки типовых элементарных поверхностей (плоскости, уступы, окна, открытые отверстия). Для ускорения процесса их программирования широкое распространение получили стандартные циклы и специальные G-коды, а также калькуляторы режимов резания. Однако, кроме описанного инструментария, современные средства программирования станков с ЧПУ не позволяют для типовых конструктивных элементов и различных форм режущих частей инструментов в автоматическом режиме определять и (или) задавать длины врезаний, устойчивого резания и выходов, координат начальных, промежуточных и конечных положений инструментов, а также обоснованно при этом изменять режимы резания.

Для типовых конструктивных элементов зоны врезания и выхода инструментов можно классифицировать на основе учета форм обрабатываемых поверхностей и режущих частей инструментов, а также рассчитать геометрические параметры этих зон. Классификация и расчет геометрических параметров зон врезания и выхода инструментов даст возможность теоретико-эмпирического моделирования процессов резания в зонах переходных процессов для обеспечения максимальной производительности обработки и стойкости инструментов с учетом воздействия различных негативных факторов.

*Целью работы* является разработка классификатора типовых решений и математических моделей расчета параметров зон переходных процессов при обработке оригинальных некруглых деталей для последующего управления станком с ЧПУ на их основе.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены задачи: проведен анализ признаков классификации и классификаторов конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы; разработан классификатор типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами переходных процессов для обработки поверхностей деталей; разработаны математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования с учетом границ переходных процессов при обработке типовых элементов.

**Основная часть.** Для решения поставленных в работе задач использовались методы иерархической классификации, аналитической геометрии, математического моделирования и теории автоматизации. Проводился анализ чертежей деталей, технологических процессов их изготовле-

ния, а также каталогов режущих инструментов, литературных источников и интернет-изданий. Объект разработки — классификаторы конструктивно-технологических элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы с границами переходных процессов резания.

Проведенный анализ информационных источников по систематизации объектов производства и конструктивных элементов показывает, что современный этап характеризуется разработкой классификаторов для решения прикладных задач кастомизации продукции, обеспечения гибкости производства и ремонта, создания новых методов обработки и нанесения покрытий, формализации, алгоритмизации и автоматизации процедур синтеза технологии [10–15].

Однако, для решения задач синтеза технологии отсутствуют классификаторы типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами переходных процессов обработки поверхностей оригинальных некруглых деталей сложной формы, а также соответствующие математические модели для определения параметров размерной настройки оборудования, учитывающие границы этих процессов.

На основе анализа чертежей и технологических процессов изготовления оригинальных некруглых деталей сложной формы установлено, что все многообразие обрабатываемых элементарных конструктивных элементов таких деталей можно свести по кинематическому признаку их образования к трем основным классам (плоским, вращения, винтовым), а контактных поверхностей врезаний и выходов инструментов в заготовку к двум (плоским, вращения). Для формальной идентификации обрабатываемых конструктивных элементов, а также поверхностей врезаний и выходов внутри классов выделен ряд иерархических признаков и определен состав. Так, например, в класс обрабатываемых поверхностей вращения предлагается включить подклассы: элементарные, продольные и торцовые канавки. Подкласс «элементарные» предлагается разделить на цилиндры и конусы, которые, в свою очередь, делятся на два вида (со входом-выходом и закрытые) и два типа (наружные и внутренние).

Установлены теоретически возможные и наиболее часто используемые варианты взаимного расположения обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей врезаний и выходов инструментов. Так, например, ось обрабатываемого элементарного цилиндрического внутреннего конструктивного элемента может пересекаться с осью наружной цилиндрической поверхности вращения под прямым углом и углом, отличным от прямого, скрещиваться под прямым углом и углом, отличным от прямого. Совместный анализ форм поверхностей входов-выходов инструментов, а также обрабатываемых поверхностей

позволил предложить систему классификации их взаимных расположений (рисунок 1).

Разработан классификатор переходов обработки конструктивных элементов оригинальных некруглых деталей сложной формы, а также таблица соответствия их идентификаторов переходам обработки и видам режущих инструментов в зависимости от поверхностей входов-выходов.

Анализ каталогов фирм производителей режущих инструментов позволил свести все многообразие форм их режущих частей к ряду вариантов. Так, например, режущие части современных сверл сводятся к 8 вариантам: спиральное, шнековое, эжекторное с одноплоскостной заточкой; спиральное с двухплоскостной заточкой; спиральное с закругленными режущими кромками; спиральное конструкции В.И. Жирова; спиральное с прорезной перемычкой; спиральное со стачиванием перемычки; ружейное; пушечное, кольцевое, со сменными пластинками.

Совместный анализ форм обрабатываемых конструктивных элементов оригинальных некру-

глых деталей, переходов их обработки, а также контактных поверхностей входов-выходов инструментов и их режущих частей с заготовкой дает возможность создания каталога типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов с границами зон переходных процессов. На рисунке 2 показаны фрагменты такого каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением.

Составлены модели для расчета указанных параметров. Так для варианта «1111–1121 ⊥ вход»:

$$L_{нвр} = RS; L_{вр2} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2};$$

$$L_{вр} = L_{под} + L_{вр1} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2};$$

$$Z_{нвр1} = RS + L_{под};$$

$$Z_{нвр2} = RS - \left( RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) - L_{вр1}.$$

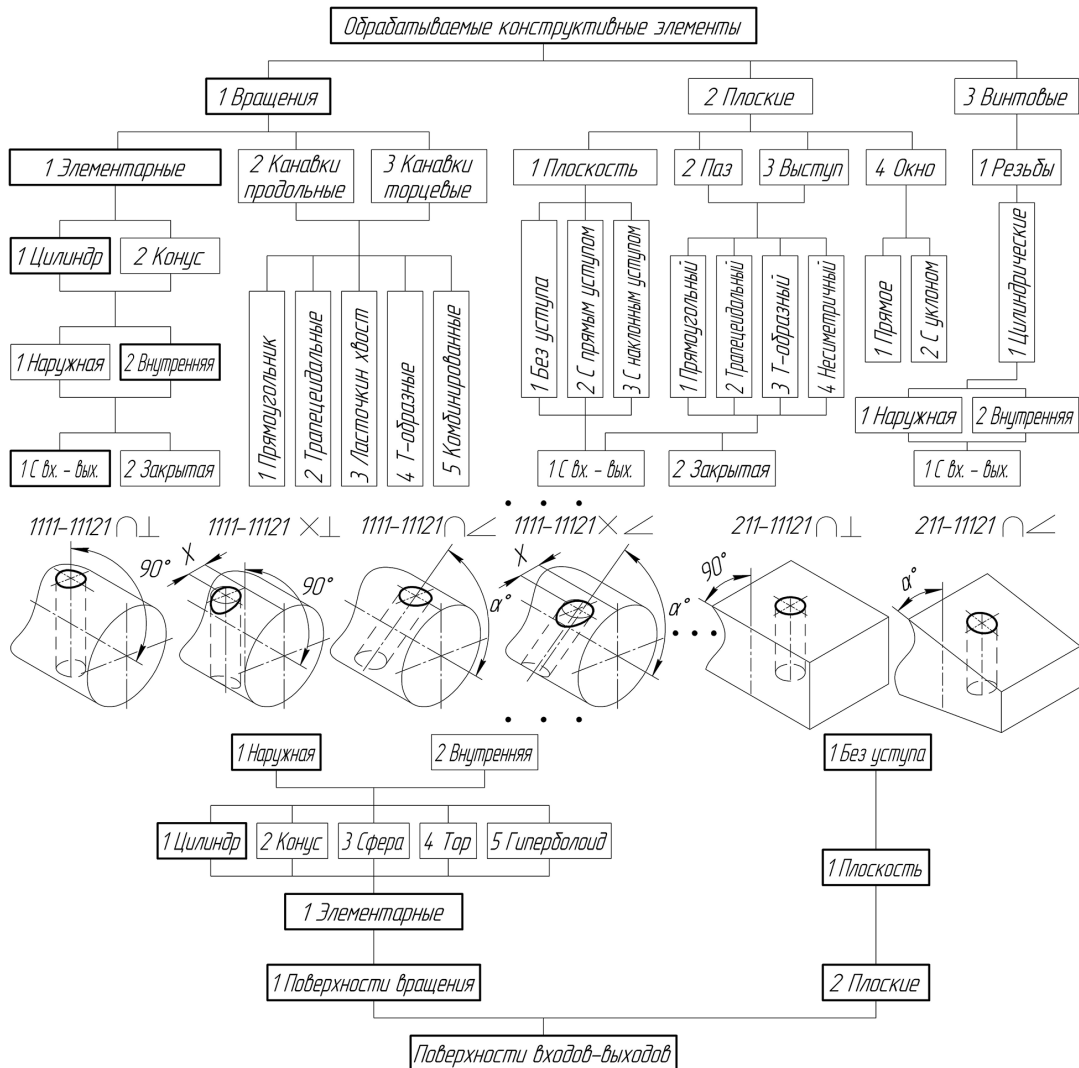
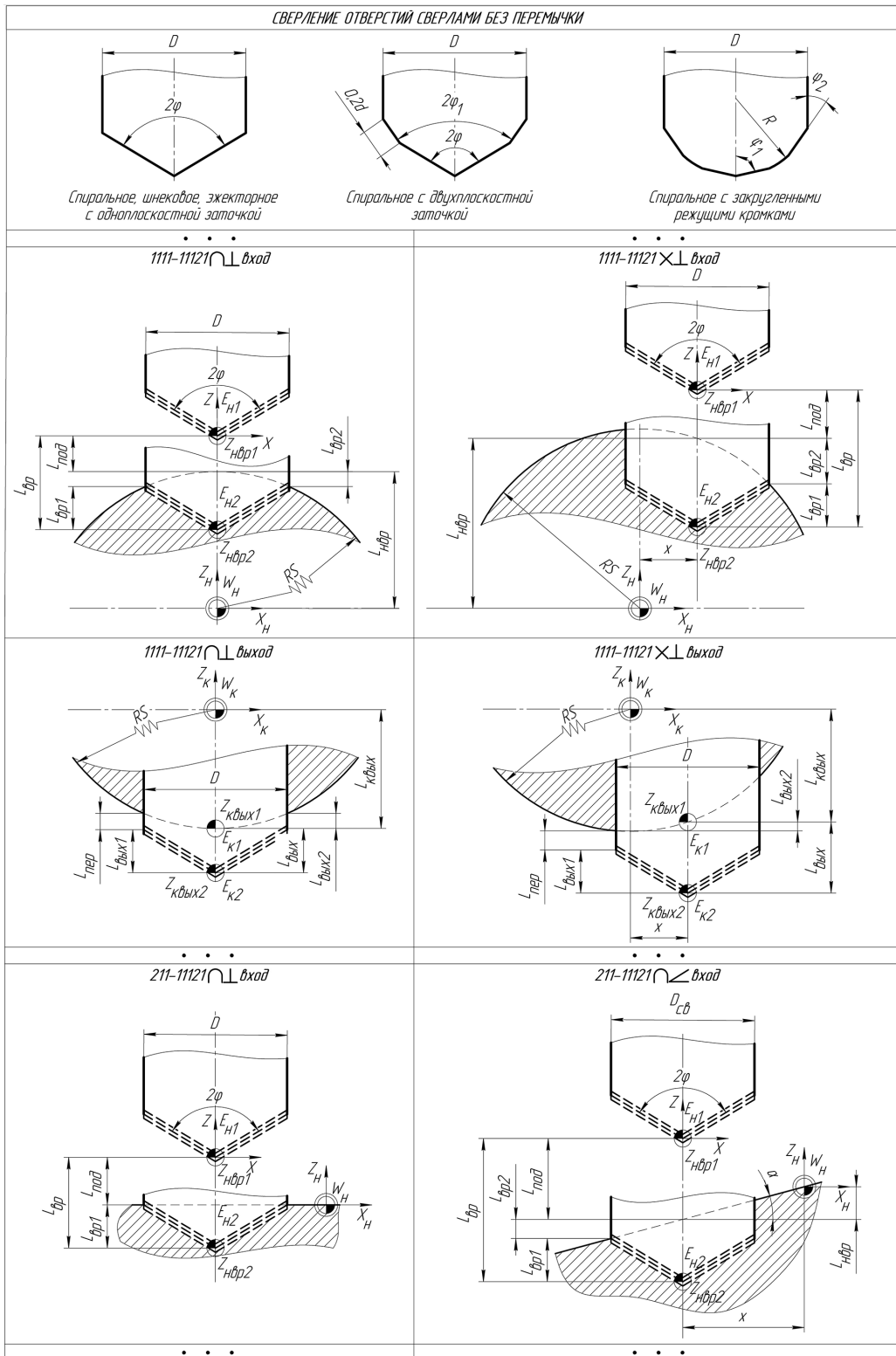


Рисунок 1 — Элементы системы классификации взаимных расположений обрабатываемых конструктивных элементов и поверхностей входов-выходов

Figure 1 — System elements for classifying the mutual arrangement of machined structural elements and input-output surfaces



**Рисунок 2 — Фрагменты каталога для обработки элементарных цилиндрических внутренних конструктивных элементов сверлением:**  $L_{вр}$  — длина врезания;  $L_{вых}$  — длина выхода;  $W_н, W_к, E_н, E_к$  — системы координат заготовки инструмента в начальных и конечных точках;  $L_{под}$  — длина подвода инструмента (принимается 2...3 мм);  $L_{нвр}$  — расстояние между системой координат заготовки и точкой начала врезания инструмента;  $L_{квых}$  — расстояние между системой координат заготовки и точкой начала выхода инструмента;  $L_{вр2}$  — длина врезания, обусловленная геометрией заготовки;  $L_{вых} = L_{вр1}$  — длина выхода, обусловленная геометрией режущей части;  $L_{пер}$  — длина перебега (принимается 2...3 мм);  $L_{вых2}$  — длина выхода инструмента, обусловленная геометрией заготовки;  $Z_{нвр1}, Z_{нвр2}, Z_{квых1}, Z_{квых2}$  — координаты начального и конечного положений инструмента в системе координат заготовки

**Figure 2 — Catalog fragments for machining elementary cylindrical internal structural elements by drilling:**  $L_{вр}$  — penetration length;  $L_{вых}$  — exit length;  $W_н, W_к, E_н, E_к$  — coordinate systems of the tool workpiece at the initial and final points;  $L_{под}$  — tool entry length (2...3 mm is accepted);  $L_{нвр}$  — distance between the coordinate system of the workpiece and the beginning point of tool penetration;  $L_{квых}$  — distance between the coordinate system of the workpiece and the beginning point of tool exit;  $L_{вр2}$  — penetration length due to the workpiece geometry;  $L_{вых} = L_{вр1}$  — exit length due to the cutting part geometry;  $L_{пер}$  — overrun length (2...3 mm is accepted);  $L_{вых2}$  — tool exit length due to the workpiece geometry;  $Z_{нвр1}, Z_{нвр2}, Z_{квых1}, Z_{квых2}$  — coordinates of the initial and final tool positions in the coordinate system of the workpiece

Для варианта «1111–1121 × ⊥ вход»:

$$L_{\text{нвр}} = \sqrt{RS^2 - x^2};$$

$$L_{\text{вр2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2};$$

$$L_{\text{вр}} = L_{\text{под}} + L_{\text{вр1}} + \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2};$$

$$Z_{\text{нвр1}} = \sqrt{RS^2 - x^2} + L_{\text{под}};$$

$$Z_{\text{нвр2}} = \sqrt{RS^2 - x^2} - \left( \sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} + x\right)^2} \right) - L_{\text{вр1}}.$$

Для варианта «1111–1121 ∩ ⊥ выход»:

$$L_{\text{квых}} = RS; L_{\text{квых2}} = RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2};$$

$$L_{\text{вых}} = L_{\text{квых1}} + L_{\text{пер}} - \left( RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \right);$$

$$Z_{\text{квых1}} = -RS;$$

$$Z_{\text{квых2}} = -RS - L_{\text{квых1}} - L_{\text{пер}} + RS - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}.$$

Для варианта «1111–1121 × ⊥ выход»:

$$L_{\text{квых}} = \sqrt{RS^2 - x^2};$$

$$L_{\text{квых2}} = \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2};$$

$$L_{\text{вых}} = L_{\text{пер}} + L_{\text{квых1}} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2};$$

$$Z_{\text{квых1}} = -\sqrt{RS^2 - x^2};$$

$$Z_{\text{квых2}} = -\sqrt{RS^2 - x^2} - \sqrt{RS^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2} - \sqrt{RS^2 - x^2} - L_{\text{пер}} - L_{\text{квых1}}.$$

Для варианта «211–1121 ∩ ⊥ вход»:

$$L_{\text{вр}} = L_{\text{под}} + L_{\text{вр1}}; Z_{\text{нвр1}} = L_{\text{под}}; Z_{\text{нвр2}} = -L_{\text{вр1}}.$$

Для варианта «211–1121 ∩ ∠ вход»:

$$L_{\text{нвр}} = \frac{x}{\text{ctg}\alpha}; L_{\text{вр2}} = \frac{D}{2} \text{tg}\alpha;$$

$$L_{\text{вр}} = L_{\text{под}} + L_{\text{вр1}} + \frac{D}{2} \text{tg}\alpha; Z_{\text{нвр1}} = -\frac{x}{\text{ctg}\alpha} + L_{\text{под}}.$$

Для спирального, шнекового и эжекторного сверл с одноплоскостной заточкой:

$$L_{\text{вр1}} = \frac{D}{2 \text{tg}\varphi}.$$

Для спирального сверла с двухплоскостной заточкой:

$$L_{\text{вр1}} = \frac{D - 0,2D \cdot \sin \varphi_1}{2 \text{tg}\varphi} + 0,2D \cdot \cos \varphi_1.$$

Для сверла с закругленной режущей кромкой:

$$L_{\text{вр1}} = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}.$$

**Заключение.** На основе совместного анализа форм обрабатываемых поверхностей оригинальных некруглых деталей сложной формы, переходов их обработки, а также поверхностей контакта режущих частей и заготовки при входе-выходе инструментов в зону резания предложен классификатор типовых параметризованных конструктивно-технологических элементов оригинальных некруглых деталей с границами зон переходных процессов.

При программировании обработки деталей на станках с ЧПУ классификация и типизация зон входов-выходов инструментов создает условия для сокращения затрат машинного времени за счет уменьшения длин рабочих ходов инструментов, а также для теоретико-эмпирического моделирования процессов резания в зонах переходных процессов, обеспечивающего максимальную производительность обработки и стойкость инструментов с учетом воздействия различных факторов.

Разработки могут использоваться: в IT-компаниях для совершенствования САМ-систем при создании фитчеров и макросов, а также развития стандартных циклов обработки; в технологических бюро предприятий для программирования оборудования с ЧПУ и проектировании наладок станков; в учебном процессе для подготовки специалистов в области машиностроения.

### Список литературы

1. Попок, Н.Н. Система поддержки принятия решений по определению параметров размерной настройки сверл для программирования обработки отверстий на станках с числовым программным управлением / Н.Н. Попок, Н.В. Беляков, С.К. Селезнёв // Вестник БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2023. — № 2(14). — С. 50–63.
2. Беляков, Н.В. Основы автоматизированного проектного базирования в субтрактивном и аддитивном машиностроительных производствах / Н.В. Беляков, Н.Н. Попок. — Витебск: УО «ВГТУ», 2023. — 183 с.
3. Солодков, В.А. Особенности единичного цикла процесса прерывистого резания / В.А. Солодков, А.А. Карчадзе // Вопросы науки и образования. — 2020. — № 20(104). — С. 4–10.
4. Safe optimization for feedrate scheduling of power-constrained milling processes by using Gaussian processes / L. Ratundu, I. Laptev, E.D. Klenske, H.-C. Möhring // Procedia CIRP. — 2021. — Vol. 99. — P. 127–132. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.020>.
5. Козочкин, М.П. Система адаптивного управления станочным оборудованием по сигналам вибрации и активной мощности / М.П. Козочкин, А.Н. Порватов, А. Дуйсенга-

- ли // Автоматизация и управление в машиностроении. — 2016. — № 1(23). — С. 17–25.
6. Мустафаев, Г.А. Использование датчиков адаптивного управления для повышения качества обработки деталей на станках с числовым программным управлением / Г.А. Мустафаев, Е.В. Сидорчик // Молодой ученый. — 2013. — № 9(56). — С. 60–62.
  7. Каштальян, И.А. Дискретное управление процессами резания на токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. — 2015. — № 4. — С. 115–126.
  8. Automated feed rate optimization with consideration of angular velocity according to workpiece shape / P. Vavruska, M. Pesice, P. Zeman, T. Kozlok // Results in Engineering. — 2022. — Vol. 16. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100762>.
  9. Козлов, А.М. Параметрическое управление подачей при фрезеровании сложных поверхностей на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2017. — Вып. 8-1. — С. 59–64.
  10. Волчкевич, И.Л. О задачах классификации деталей на ранних этапах проектирования технологических комплексов / И.Л. Волчкевич, В.В. Галий // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2015. — Вып. 10. — С. 100–107.
  11. Кудряшов, Е.А. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2009. — № 4(45). — С. 3–8.
  12. Нгуен, Ш.Х. О классификации поверхностей свободной формы: обзор / Ш.Х. Нгуен // Новая наука: Современное состояние и пути развития. — 2016. — № 12-4. — С. 99–105.
  13. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В.Д. Цветков, под ред. П.И. Ящерицына. — Минск: Наука и техника, 1979. — 261 с.
  14. Шириялкин, А.Ф. О разработке классификационной системы информации о деталях машин на конкретном предприятии / А.Ф. Шириялкин, А.Н. Угасин // Вестник УлГТУ. — 2013. — № 3(63). — С. 63–71.
  15. Базров, Б.М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства / Б.М. Базров. — М.: КУРС, 2023. — 324 с.

POPOK Nikolay N., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department of Technology and Improvement of Machine-Building Production<sup>1</sup>

E-mail: [n.popok@psu.by](mailto:n.popok@psu.by)

BELYAKOV Nikolay V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology<sup>2</sup>

E-mail: [nikolay\\_belyakov@mail.ru](mailto:nikolay_belyakov@mail.ru)

SELEZNEV Stanislav K.

Assistant of the Department of Mechanical Engineering Technology<sup>2</sup>

E-mail: [stanislav.selezniow@yandex.by](mailto:stanislav.selezniow@yandex.by)

<sup>1</sup>Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus

Received September 19, 2024.

## SOFTWARE CONTROL OF MACHINES BASED ON TYPIFICATION OF TRANSIENT ZONE PARAMETERS FOR PROCESSING OF ORIGINAL NON-CIRCULAR PARTS

*The paper provides an overview of trends in the preparation of control programs for CNC metal cutting machines. The direction in the development of programming of machining parts based on the transient zone parameter typification is described. The analysis of the shapes of the processed structural elements of the original non-circular parts of complex shape, the transitions of their processing, as well as the input-output surfaces of tools and their cutting parts makes it possible to create a catalog of typical parameterized structural and technological elements with the boundaries of transient zones. Fragments of such a catalog are given for processing elementary cylindrical internal structural elements by drilling. Appropriate mathematical models are proposed to determine the parameters of dimensional adjustment of equipment, taking into account the boundaries of transient zones. This approach creates conditions for theoretical and empirical simulation of cutting processes in transient zones, ensuring maximum processing performance and tool durability, taking into account the effects of various factors, as well as reducing the length of working strokes.*

**Keywords:** classifier, structural and technological element, cutting tool, CNC, CAM system, transient process, adaptive systems, control program, mechanical engineering

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-66-73>

## References

1. Popok N.N., Belyakov N.V., Seleznev S.K. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy po opredeleniyu parametrov razmernoy nastroyki sverl dlya programmirovaniya obrabotki otverstiy na stankakh s chislovym programmnyim upravleniem [Decision support system for determining the dimensional adjustment parameters of drills for programming hole processing on CNC machine-tools]. *BARSU herald. Series "Engineering"*, 2023, no. 2(14), pp. 50–63 (in Russ.).
2. Belyakov N.V., Popok N.N. *Osnovy avtomatizirovannogo proektnogo bazirovaniya v subtraktivnom i additivnom mashinostroitelnykh proizvodstvakh* [Fundamentals of automated design basing in subtractive and additive engineering industries]. Vitebsk, Vitebskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet Publ., 2023. 183 p. (in Russ.).
3. Solodkov V.A., Karchaidze A.A. Osobennosti edinichnogo tsikla protsessa preryvistogo rezaniya [Features of a single cycle of the interrupted cutting process]. *Voprosy nauki i obrazovaniya*, 2020, no. 20(104), pp. 4–10 (in Russ.).
4. Rattunde L., Laptev I., Klenske E.D., Möhring H.-C. Safe optimization for feedrate scheduling of power-constrained milling processes by using Gaussian processes. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 99, pp. 127–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.020>.
5. Kozochkin M.P., Porvatov A.N., Duysengali A. Sistema adaptivnogo upravleniya stanochnym oborudovaniem po signalam vibratsii i aktivnoi moshchnosti [Adaptive control system for machine equipment based on vibration and active power signals]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashinostroenii*, 2016, no. 1(23), pp. 17–25 (in Russ.).
6. Mustafaev G.A., Sidorchik E.V. Ispolzovanie datchikov adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya kachestva obrabotki detaley na stankakh s chislovym programmnyim upravleniem [The use of adaptive control sensors to improve the quality of part processing on a CNC machine]. *Young scientist*, 2013, no. 9(56), pp. 60–62 (in Russ.).
7. Kashtalyan I.A., Sheleh V.K., Orukari B. Diskretnoe upravlenie protsessami rezaniya na tokarnykh stankakh s chislovym programmnyim upravleniem [Discrete control of cutting processes on numerically-controlled cutting machines]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 4, pp. 115–126 (in Russ.).
8. Vavruska P., Pesice M., Zeman P., Kozlok T. Automated feed rate optimization with consideration of angular velocity according to workpiece shape. *Results in engineering*, 2022, vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100762>.
9. Kozlov A.M., Malyutin G.E. Parametricheskoe upravlenie podachey pri frezerovanii slozhnykh poverkhnostey na stankakh s ChPU [Parametric control of feedings milling complex surfaces on CNC machines]. *News of Tula State University. Technical sciences*, 2017, iss. 8-1, pp. 59–64 (in Russ.).
10. Volchkevich I.L., Galiy V.V. O zadachakh klassifikatsii detaley na rannikh etapakh proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov [On the problem of parts classification in the early stages of technological complexes design]. *News of Tula State University. Technical sciences*, 2015, iss. 10, pp. 100–107 (in Russ.).
11. Kudryashov E.A., Altukhov A.Yu., Lumin D.Yu. Tekhnologicheskiy klassifikator detaley i poverkhnostey, podlezhashchikh obrabotke rezaniem [Technological classifier of parts and surfaces subject to cutting]. *Obrabotka metallov. Metal working and material science*, 2009, no. 4(45), pp. 3–8 (in Russ.).
12. Nguen Sh.Kh. O klassifikatsii poverkhnostey svobodnoy formy: obzor [On the classification of free-form surfaces: a review]. *Novaya nauka: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya*, 2016, no. 12-4, pp. 99–105 (in Russ.).
13. Tsvetkov V.D. *Sistemno-strukturnoe modelirovanie i avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov* [System and structural modeling and automation of technological process design]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1979. 261 p. (in Russ.).
14. Shiryalkin A.F., Ugasin A.N. O razrabotke klassifikatsionnoy sistemy informatsii o detalyakh mashin na konkretnom predpriyatii [On the development of a classification system of information about machine parts at a specific enterprise]. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 3(63), pp. 63–71 (in Russ.).
15. Bazrov B.M. *Bazis tekhnologicheskoy podgotovki mashinostroitel'nogo proizvodstva* [The basis of technological preparation of machine-building production]. Moscow, KURS Publ., 2023. 324 p. (in Russ.).