

УДК 621.9.025; 621.9.06

DOI 10.18698/0536-1044-2017-2-39-49

# Критериальная оценка технологической компоновки металлорежущих станков с циклоидальной схемой формообразования деталей

**Д.В. Иванов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Criterion-Based Assessment of the Technological Configuration of Metal-Cutting Machines with Cycloidal Scheme of Part Shaping

**D.V. Ivanov**BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: vsivanov49@yandex.ru

**i** На основе анализа технологических возможностей и преимуществ многолезвийных способов с циклоидальной схемой формообразования деталей типа тел вращения обоснована актуальность разработки характеризующих эти способы критериев, позволяющих классифицировать их по параметрам компоновки элементов технологической пары относительно зоны обработки и по кинематике элементарных формообразующих движений. По общности признаков структуры и характера формообразования тангенциальное точение, фрезоточение и фрезерование объединены в группу способов обработки с циклоидальной схемой формообразования. Формализована структура этих способов. На основе векторного представления о геометрии и кинематике схем обработки приведены критерии оценки вариантов технологической компоновки в виде передаточных отношений геометрических координат взаиморасположения исполнительных блоков относительно зоны резания и кинематических координат вращательных формообразующих движений. Определены области значений критериев, соответствующие различным схемам технологической компоновки, способам обработки, конкретным вариантам взаимонаправленности угловых и окружных скоростей.

**Ключевые слова:** циклоидальное формообразование, критерии оценки, технологическая компоновка, передаточное отношение.

**i** Based on the analysis of technological capabilities and advantages of multi-blade cutting methods with cycloidal scheme for shaping parts such as axisymmetric bodies, the author provides rationale for developing criteria that characterize these methods. The criteria can be classified by the parameters of component layout in the technological pair with relation to the machining zone and kinematics of basic shaping movements. Tangential turning, turn-milling and milling are combined into a group with cycloidal scheme of shaping based on common features in the structure and nature of shaping. The structure of the methods is formalized. A range of values of the criteria that correspond to different schemes of technological layout, machining methods, concrete options of inter-directional angular and circumferential velocities is determined.

**Keywords:** cycloidal shaping, evaluation criteria, technological layout, gearing ratio.

Мировая тенденция в области металлообработки выражается в широком внедрении высокопроизводительных технологий лезвийного формообразования. В связи с этим весьма актуальным является создание технологических систем многолезвийного резания для получения деталей типа тел вращения как наиболее представительной группы в общем объеме выпуска машиностроительных деталей.

К преимуществам многолезвийной обработки можно отнести кинематическое распределение снимаемого припуска между резами и сечения среза между кромками резца, кратковременность непрерывного участия в резании каждого резца, повышение суммарной стойкости инструмента, кинематическое дробление стружки. Эти преимущества позволяют почти в 2 раза повысить скорость резания, а следовательно, и производительность по сравнению с однорезцовой обработкой.

Вследствие широких технологических возможностей наиболее распространенными многолезвийными способами обработки поверхностей вращения являются тангенциальное точение, фрезоточение и фрезерование. Кинематическая структура этих способов, кроме реализации преимуществ многолезвийного резания, позволяет существенно расширить спектр получаемых деталей по их конфигурации и области применения (рис. 1).

Круглопрофильные детали — валы, кольца, фланцы (рис. 1, *a*), шкивы, шестерни, колеса и плунжеры — доминируют в общем объеме выпуска машиностроительных изделий. Их применяют в подавляющем большинстве узлов и механизмов машин для обеспечения вращательных и поступательных движений исполнительных органов.

Использование для их получения тангенциального точения и фрезоточения обеспечивает разделение припуска на отдельные слои и распределение работы резания между режущими элементами инструмента, что позволяет существенно интенсифицировать режимы обработки [1–3].

Применение фрезерования при обработке шеек коленчатых, тяжелых и некруглых валов (рис. 1, *б*) помогает избежать тяжелых динамических нагрузок, действующих на привод вращения заготовки [4–6].

Детали с некруглым профилем (рис. 1, *в*) нашли широкое применение в профильных бесшпоночных соединениях [7], которые превосходят шпоночные и шлицевые соединения по таким параметрам, как несущая способность, прочность, долговечность и бесшумность [8].

В машиностроении зарубежных стран бесшпоночные соединения используют в приводах металлорежущих станков фирмы Schaublin (Швейцария), гибких инструментальных систе-

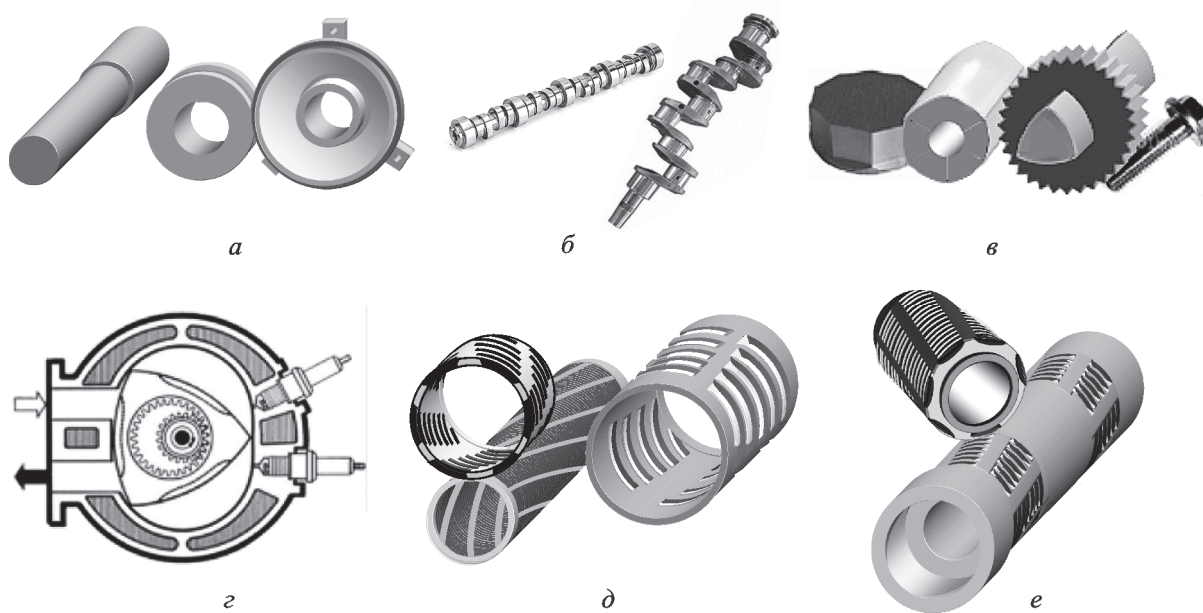


Рис. 1. Типовые детали, получаемые многолезвийным точением и фрезерованием: *a* — гладкие валы, кольца и фланцы; *б* — профильные детали бесшпоночных соединений; *в* — распределительные и коленчатые валы; *г* — двигатель Ванкеля; *д* — щелевые фильтроэлементы и демпферы; *е* — теплообменники и оребренные детали под покрытие и смазку

мах компании Sandvik Coromant (Швеция), кузнечно-прессовом оборудовании фирмы Schmid (Швеция) и компрессорах Centac компании Ingersoll (США).

Тенденция применения роторно-поршневого двигателя или двигателя Ванкеля (рис. 1, з) с трехгранным ротором принята ведущими мировыми автомобилестроительными фирмами Rolls-Royce, Nissan Motor, General Motors, Suzuki Motor, Toyota Motor, Ford-Werke, Yamaha Motor, Mazda, Citroen, Mercedes.

В машиностроении используют крепежные детали из легированных борсодержащих сталей, имеющих участки четырех- или шестигранной формы и опорный пояс, диаметр которого превышает габариты многогранника. Изготавливать такие детали из катаной заготовки невозможно.

Детали с некруглым профилем, как и круглопрофильные, обрабатывают теми же высокопроизводительными многолезвийными способами — фрезоточением и фрезерованием [9–11]. В основу профилирования таких деталей заложен метод касания [10], базирующийся на применении инструмента с поверхностью, не совпадающей с получаемой поверхностью детали.

Детали с дискретно-щелевой структурой поверхности, например, щелевые фильтроэлементы со сквозной структурой (рис. 1, д) и рифленые детали с глухой структурой со щелями в виде щелевых карманов под покрытие и смазку (рис. 1, е), выполняют в режиме фрезоточения при соотношении окружных скоростей инструмента и детали в пределах одного порядка [12]. Число резцов на инструменте составляет, как правило, в от одного до четырех. Оребрение с непрерывно-щелевой структурой под покрытие можно выполнить мелко модульной фрезой с соотношением окружных скоростей инструмента и детали от 0,01 до 0,05.

Отличительный признак схем профилирования по методу касания — наличие в структуре формообразования комбинации двух круговых движений, сообщаемых элементам пары *заготовка-инструмент* вокруг параллельных осей [13]. Результирующее формообразующее движение кромок резца в координатах, связанных с деталью, является циклоидальным, а его траектории представляют собой эпи-, гипо- или перитроходы [14, 15]. Циклоидальный вид формообразующей траектории — основной признак,

определяющий термин «циклоидальное формообразование». Пространственная композиция траекторий ограничивает получаемый профиль детали и представляет собой циклоидальный многогранник.

Общность признаков кинематической структуры и циклоидальный характер процесса формообразования и типа формообразующих траекторий позволяют объединить тангенциальное точение, фрезоточение и фрезерование в группу способов лезвийной обработки с циклоидальной схемой формообразования (ЦСФ). Это является предпосылкой для разработки критериев оценки вариантов технологической компоновки станков с ЦСФ, универсально применимых к анализу и моделированию процессов формообразования для различных схем обработки.

Цель работы — формализация компоновочных и кинематических факторов процесса формообразования и разработка на базе их комбинации критериев, характеризующих способы лезвийной обработки.

Основополагающим элементом этапа концептуального проектирования станочного оборудования является построение кинематической структуры формообразования, используемой при обработке [16, 17]. Такая структура характеризуется количественным и качественным составом формообразующих движений, а также степенью их участия в обработке.

Для ее построения введем формализацию движений, представляющую собой сочетание буквенных и цифровых символов [18]. Символ  $\Phi$  отражает принадлежность движения к процессу формообразования, индекс этого символа — технологический признак, указывающий на доминирующее участие движения в формировании скорости резания  $v$  или подачи  $s$ . Символ в скобках отражает тип движения: вращательное (В) или поступательное (П). Числовой индекс этого символа обозначает сквозную нумерацию движений.

Основным условием реализации способов многолезвийной обработки круглых поверхностей является обеспечение вращательных движений заготовке и инструменту  $\Phi(B_1)$ ,  $\Phi(B_2)$  в плоскости формирования поперечного профиля детали и продольного движения инструмента  $\Phi(P_3)$ .

Кинематическая структура формообразования способов обработки с ЦСФ (рис. 2), в общем виде содержащая одно поступательное и

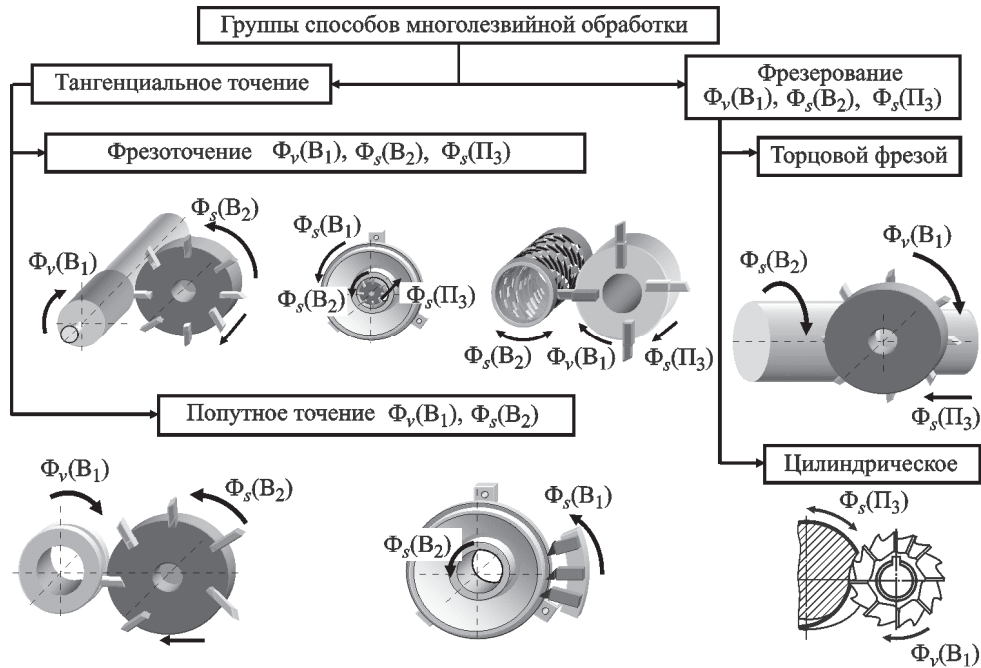


Рис. 2. Кинематическая структура формообразования способов многолезвийной обработки

два вращательных движения, распределенных по элементам пары *деталь-инструмент*, может быть отражена структурной формулой

$$\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2), \Phi_s(\Pi_3).$$

Вследствие вращательного движения круговой подачи каждый резец кратковременно контактирует с заготовкой. Следующие резцы подходят к зоне контакта с деталью через промежутки времени в пределах от долей до нескольких секунд. За это время инструмент линейно смещается относительно заготовки, обеспечивая равномерное распределение припуска между резцами.

Для математического описания процессов формообразования, универсально применимо-

го для различных способов и комплексно учитывающего параметры схем касания детали и инструмента, взаимосвязь движений по значению и взаимонаправленности, используют векторное представление о геометрии и кинематике перечисленных формообразующих факторов.

По взаиморасположению детали и инструмента относительно зоны резания технологическая компоновка может быть представлена тремя схемами касания (рис. 3).

Варианты технологической компоновки различаются соотношением геометрических параметров для внешней (а), внутренней (б) и охватывающей (в) схем касания. При внешнем различии представленные схемы являются

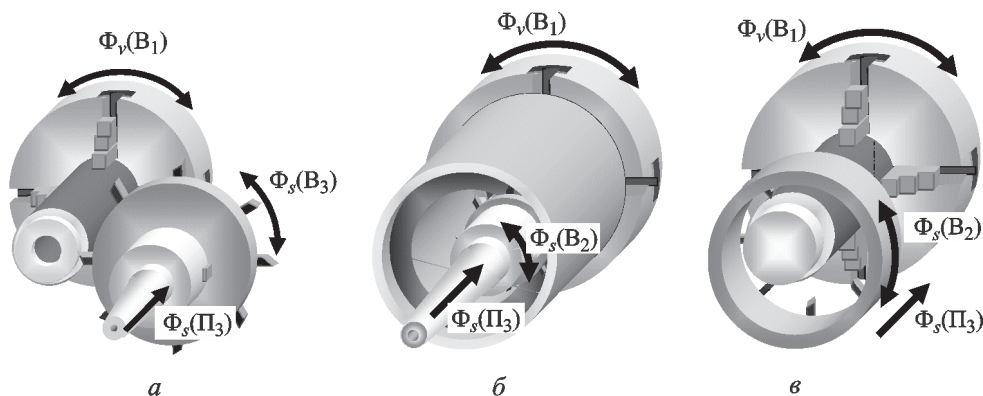


Рис. 3. Варианты технологической компоновки исполнительных блоков относительно зоны обработки, соответствующие внешней (а), внутренней (б) и охватывающей (в) схемам касания

формами проявления единого внутреннего содержания — компоновки шпинделей детали и инструмента относительно зоны обработки. Следовательно, процессы формообразования для них должны подчиняться одним и тем же закономерностям.

Для единообразного математического описания законов формообразования в приведенных вариантах предлагается формализация технологической компоновки в виде системы геометрических и кинематических векторов с применением методов векторной алгебры [19, 20].

Использована полярная система координат  $(\rho, \varphi)$  с центром  $O_d$  детали. Выбор этой системы обусловлен округлой формой обрабатываемых поверхностей, вращательным типом движений

$\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(B_2)$ , используемыми системами измерения, работающими также в полярной системе координат. Геометрическая координатная ось задана единичным вектором  $\mathbf{r}$ , направленным из центра  $O_d$  в полюс касания  $p$  (рис. 4). Под полюсом технологического зацепления понимают положение формообразующей точки режущей кромки резца на линии центров  $O_dO_n$  детали 1 и инструмента 2.

Схема касания может быть формализована системой коллинеарных геометрических векторов  $\mathbf{R}_d, \mathbf{R}_n, \mathbf{A}$ , определяемых из выражений

$$\mathbf{R}_d = R_d \mathbf{r}; \quad \mathbf{R}_n = R_n \mathbf{r}; \quad \mathbf{A} = A \mathbf{r},$$

где  $R_d, R_n, A$  — геометрические координаты соответствующих векторов  $\mathbf{R}_d, \mathbf{R}_n, \mathbf{A}$ .

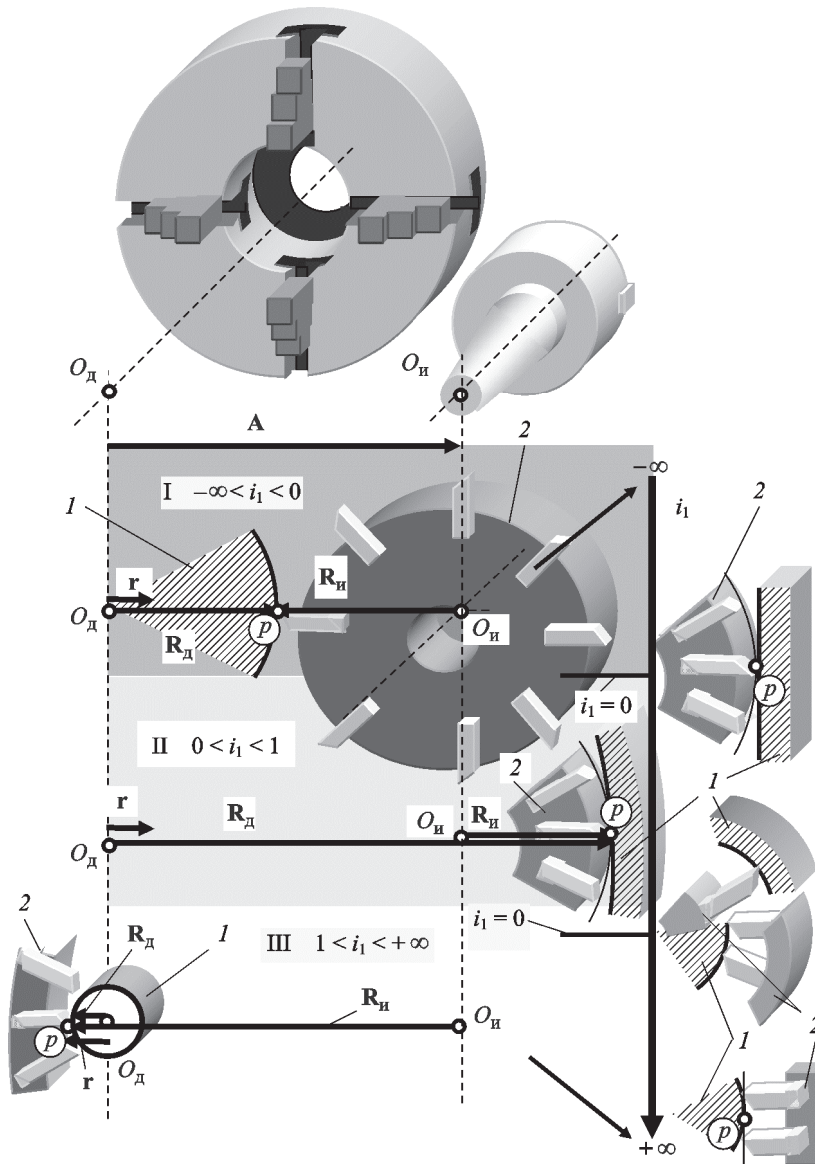


Рис. 4. Области определения схем касания детали и инструмента

Система векторов  $\mathbf{R}_д$ ,  $\mathbf{R}_и$ ,  $\mathbf{A}$ , являющаяся замкнутой, удовлетворяет соотношению

$$\mathbf{R}_д = \mathbf{R}_и + \mathbf{A}.$$

Поскольку векторы  $\mathbf{R}_д$ ,  $\mathbf{R}_и$ ,  $\mathbf{A}$  коллинеарны, их координаты связаны выражением

$$R_д = A + R_и. \quad (1)$$

Две из трех величин являются независимыми, а третья — их линейной комбинацией.

Для сопоставительного анализа схем касания удобнее рассматривать их параметры в приведенном к радиусу детали виде:

$$\begin{aligned} \bar{R}_д &= R_д / R_д = 1; \\ \bar{R}_и &= R_и / R_д; \\ \bar{A} &= A / R_д, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\bar{R}_д$ ,  $\bar{R}_и$ ,  $\bar{A}$  — приведенные к единичному радиусу детали координаты схемы касания. Параметр  $R_д$  рассматривается в качестве масштабного коэффициента при определении натуральных значений  $R_и$  и  $A$ .

С учетом зависимостей (2) выражение (1) может быть представлено в приведенном виде:

$$\bar{A} + \bar{R}_и = 1. \quad (3)$$

Для технологических схем с циклоидальным формообразованием детали за независимые координаты можно принять параметр  $\bar{R}_д$ , равный единице, и  $\bar{R}_и$ , значение которого полностью определяет соотношение радиусов инструмента и детали, а направление — схему касания. Таким образом, характеристикой технологической компоновки, полностью определяющей схему касания, является  $\bar{R}_и$  — приведенная координата инструмента.

При этом отношение координат  $R_и / R_д$  можно рассматривать как геометрическое передаточное отношение  $i_1$  схемы касания:

$$i_1 = \bar{R}_и = R_и / R_д. \quad (4)$$

С учетом выражения (4) зависимость (3) можно записать в виде

$$\bar{A} = 1 - i_1.$$

Из множества значений  $i_1$  можно выделить зоны I, II, III, в которых компоновка шпинделей относительно зоны обработки соответствует различным схемам касания детали и инструмента (см. рис. 4). Зона I с границами  $-\infty < i_1 < 0$  соответствует схеме внешнего касания выпуклых профилей детали и инструмента, зона II ( $0 < i_1 < 1$ ) — схеме касания вогнутого профиля детали и выпуклого профиля инструмента, зона III ( $1 < i_1 < +\infty$ ) — схеме касания выпуклого профиля детали и вогнутого профиля инструмента. Под выпуклым понимают профиль, касательная к которому не пересекает ограниченную им фигуру, под вогнутым — профиль, касательная к которому пересекает ограниченную им фигуру.

Возможны частные схемы для границ зон. Граница I–II ( $i_1 = 0$ ) соответствует схеме касания выпуклого профиля инструмента с прямолинейным профилем детали ( $R_д \rightarrow +\infty$ ) — обработке плоскостей; II–III ( $i_1 = 1$ ) — схеме касания выпукло-вогнутых профилей детали и инструмента одинаковой кривизны — осевым методам обработки. Пределы  $i_1 \rightarrow \pm\infty$  соответствуют схеме касания выпуклого профиля детали и прямолинейного профиля инструмента — обработке валов с прямолинейной тангенциальной подачей.

Варьируя значения  $i_1$ , можно синтезировать все представленные на рис. 4 схемы касания технологической пары. Таким образом, геометрическое передаточное отношение  $i_1$  однозначно характеризует схему касания и компоновку рабочих органов станка относительно зоны обработки.

Кинематические координаты  $\omega_д$ ,  $\omega_и$  векторов угловых скоростей, их кинематическое пе-

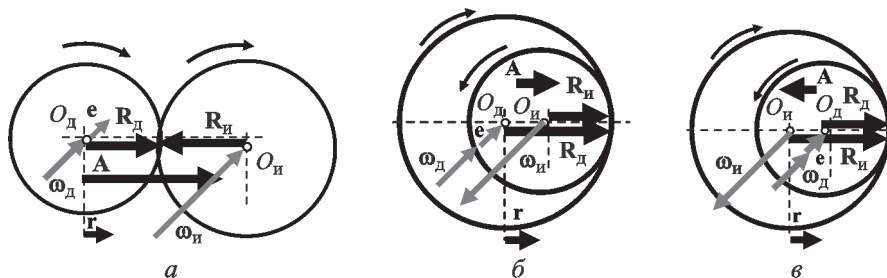


Рис. 5. Векторная формализация технологической компоновки станков с ЦСФ с внешней (а), внутренней (б) и охватывающей (в) схемами касания технологической пары

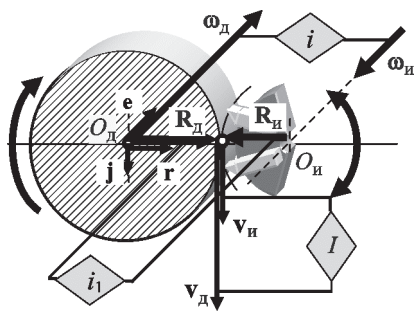


Рис. 6. Обобщенная векторная модель технологической компоновки

редаточное отношение  $i$ , координаты  $v_d, v_i$  векторов окружных скоростей и их кинематическое передаточное отношение  $I$  отражают кинематику ЦСФ, а совместно с параметрами схемы касания характеризуют технологическую компоновку станков с ЦСФ (рис. 5).

Задаваясь координатными осями угловых и окружных скоростей с единичными векторами  $e, j$ , можно записать

$$\begin{aligned} \omega_d &= \omega_d e; & \omega_i &= \omega_i e; \\ v_d &= v_d j; & v_i &= v_i j. \end{aligned}$$

Обобщенная векторная модель технологической компоновки приведена на рис. 6. Модель характеризуется тремя ортогонально расположенными парами векторов  $R_d, R_i$ ;  $\omega_d, \omega_i$ ;  $v_d, v_i$  и передаточными отношениями  $i_1, i, I$ , построенными в координатной системе с единичными векторами  $r, e, j$ . При попарной коллинеарности векторов в полюсе  $p$  соотношение вращений шпинделей детали и инструмента можно представить кинематическими передаточными отношениями координат векторов угловых  $i$  и окружных  $I$  скоростей:

$$\begin{aligned} i &= \omega_d / \omega_i; \\ I &= \frac{v_i}{v_d} = \frac{i_1}{i}. \end{aligned}$$

Окружные скорости детали и инструмента определяются векторными произведениями

$$v_d = \omega_d R_d; \quad v_i = \omega_i R_i.$$

На рис. 7 представлено поле передаточных отношений  $\Omega(i_1, i, I)$ , каждая точка в котором может быть представлена вектором передаточных отношений  $(i_1, i, I)$ , характеризующим спо-

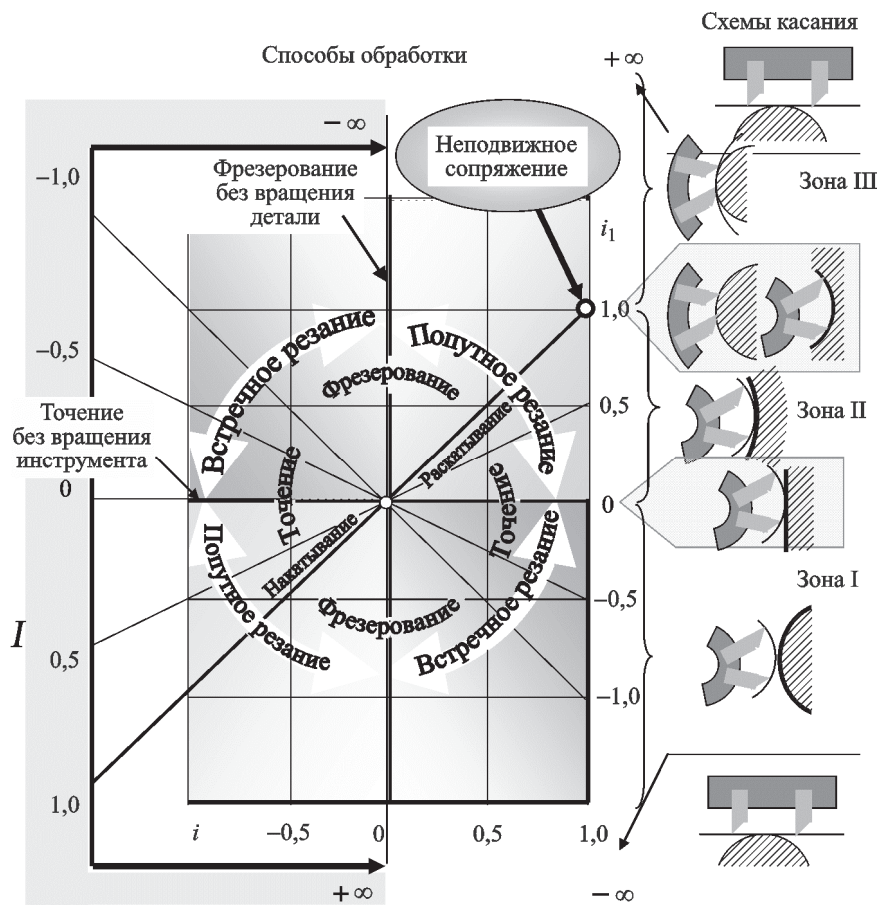


Рис. 7. Области определения вариантов технологической компоновки в поле передаточных отношений

## Значения критериев для оценки технологической компоновки станков с ЦСФ

Критерий	Схема касания детали и инструмента				
	Внешняя	Обработка прямолинейного профиля	Внутренняя	Профили равной кривизны	Охватывающая
$i_1$	$-\infty < i_1 < 0$	$i_1 = 0$	$0 < i_1 < 1$	$i_1 = 1$	$1 < i_1 < +\infty$
$i$	Вращение				
	Разнонаправленное $i < 0$			Однонаправленное $i > 0$	
$I$	Способ обработки				
	Фрезоточение круглопрофильных деталей	Фрезоточение многогранников	Фрезоточение дискретно-щелевых структур	Фрезерование круглопрофильных деталей	
	$0 <  I  \ll 1$	$0,1 <  I  < 5,0$	$0,5 <  I  < 20,0$	$10 \ll  I  < +\infty$	
	Схема обработки				
	Попутное резание			Встречное резание	

соб обработки. Координата  $i_1$  характеризует схему касания технологической пары, а координаты  $i$  и  $I$  — соотношение угловых и окружных скоростей формообразующих движений.

На координатной оси  $i$  можно выделить зоны одно- ( $i > 0$ ) и разнонаправленного ( $i < 0$ ) вращения шпинделей детали и инструмента. Границе ( $i = 0$ ) зон соответствует вариант с отсутствием вращения шпинделя детали, а предельному значению ( $i = \pm\infty$ ) — вариант обработки без вращения шпинделя инструмента (например, точение не вращающимся резцом).

На оси  $I$  показаны области значений, соответствующие различным способам обработки, о которых можно судить по модулю передаточного отношения окружных скоростей.

Зона  $0 < |I| \ll 1$  соответствует условиям точения, а зона  $1 \ll |I| < +\infty$  — фрезерования (см. таблицу). Промежуточные значения  $I$  соответствуют методам получения некруглых поверхностей и дискретно-щелевых структур, а частный случай  $I = 1$  — способам обработки без резания (накатывание, раскатывание). Точка  $I = 1$ ,  $i_1 = 1$ ,  $i = 1$  соответствует касанию профилей детали и инструмента без относительного кругового движения, например, при осевом протягивании, долблении, калибровании. Знак перед числовым значением характеризует вариант реализации резания. Зона  $I < 0$  соответствует встречному, а зона  $I > 0$  — попутному резанию.

Таким образом, передаточные отношения  $i_1$ ,  $i$ ,  $I$  являются критериями для комплексной оценки технологической компоновки станков с ЦСФ. Критерий  $i_1$  определяет схему касания технологической пары, критерий  $I$  по абсолютному значению — способ обработки, по знаку — вариант резания (попутный или встречный), а критерий  $i$  — взаимонаправленность угловых скоростей вращения шпинделей детали и инструмента.

## Выводы

1. На основе проведенного анализа установлено, что система передаточных отношений  $i_1$ ,  $i$ ,  $I$  является комплексным векторным критерием для оценки компоновочно-кинематического варианта обработки.

2. В поле передаточных отношений определены области значений частных критериев и их комбинации, соответствующие конкретным схемам касания технологической пары, различной взаимонаправленности угловых и окружных скоростей, способам обработки и схемам реализации резания.

3. Полученные критерии служат исходной базой для моделирования процессов циклоидального формообразования при многолезвийной обработке.



## Литература

- [1] Воронов В.Н. Технологические возможности процесса фрезоточения. *Автоматизация и современные технологии*, 1999, № 3, с. 14–17.
- [2] Селиванов А.Н. Повышение производительности обработки деталей типа тело вращения за счет применения многолезвийного инструмента. *Автоматизация и управление в машино- и приборостроении. Сб. науч. тр.*, Саратов, Саратов. гос. техн. ун-т, 2009, с. 185–187.
- [3] Чернянский П.М., Скиба В.М. Попутное тангенциальное точение. *Технология металлов*, 1999, № 7, с. 27–31.
- [4] Грязев М.В., Степаненко А.В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2010, № 2, ч. 1, с. 130–136.
- [5] Полетаев В.А. Конструктивные особенности приводов подач станков для кругового фрезерования. *Справочник. Инженерный журнал*, 2001, № 8, с. 63–64.
- [6] Wek C. Future of material a Delphi forecast. *Manufacturing engineering*, 1977, vol. 79(1), pp. 59–60.
- [7] Чарнко Д.В., Тимченко А.И. Профильные соединения валов и втулок в машиностроении. *Вестник машиностроения*, 1981, № 1, с. 33–37.
- [8] Данилов В.А., Данилов А.А. Анализ и реализация методов формообразования некруглых поверхностей профильных моментопередающих соединений. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*, 2014, № 11, с. 8–15.
- [9] Воронов В.Н. Формообразование и кинематика резания при фрезоточении некруглых профилей. *Автоматизация и современные технологии*, 2001, № 7, с. 8–11.
- [10] Данилов В.А. Анализ и пути интенсификации способов обработки некруглых поверхностей профильных соединений. *Вестник машиностроения*, 1991, № 1, с. 50–54.
- [11] Бекасов Д.Л. Фрезоточение некруглых профилей с продольной подачей. *Технология машиностроения*, 2008, № 3, с. 9–10.
- [12] Иванов В.С. Моделирование процесса циклоидального формообразования при лезвийной обработке поверхностей вращения. *Технология машиностроения*, 2007, № 7, с. 19–23.
- [13] Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Получение полимерных щелевых фильтрующих труб методом деформирующего резания. *Вестник машиностроения*, 2010, № 12, с. 51–53.
- [14] Иванов В.С. Анализ траекторий формообразования при лезвийной обработке по передаточным отношениям схемы технологического зацепления и вращений детали и инструмента. *Технология машиностроения*, 2007, № 6, с. 15–19.
- [15] Иванов В.С., Зубков Н.Н., Иванов Д.В. Анализ кинематики процесса циклоидального формообразования при получении щелевых структур вращающимся лезвийным инструментом. *Технология машиностроения*, 2007, № 11, с. 13–15.
- [16] Бушуев В.В. *Основы конструирования станков*. Москва, МГТУ Станкин, 1992. 519 с.
- [17] Данилов В.А. Модульное построение формообразующих систем при функциональном проектировании станочного оборудования. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*, 2013, № 3, с. 9–18.
- [18] Иванов В.С., Иванов Д.В. Формирование структурно-компоновочных решений станков фрезоточения. *Технология машиностроения*, 2015, № 12, с. 12–17.
- [19] Бугров Я.С., Никольский С.М. *Высшая математика. Т. 1. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии*. Москва, Дрофа, 2004. 288 с.
- [20] Корн Г., Корн К. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Москва, Наука, 1974. 832 с.

## References

- [1] Voronov V.N. Tekhnologicheskie vozmozhnosti protsessa frezotocheniiia [The technological capabilities of the process mesotocin]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technology]. 1999, no. 3, pp. 14–17.

- [2] Selivanov A.N. Povyshenie proizvoditel'nosti obrabotki detalei tipa telo vrashcheniia za schet primeneniia mnogolezviinogo instrumenta [The processing capacity of parts such as a body of rotation through the use of multiblade tool]. *Avtomatizatsiia i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sb. nauch. tr.* [Automation and control in mechanical engineering: collection of scientific papers]. Saratov, SSTU publ., 2009, pp. 185–187.
- [3] Chernianskii P.M., Skiba V.M. Poputnoe tangentsial'noe tochenie [Associated tangential turning]. *Tekhnologiia metallov* [Technology of metals]. 1999, no. 7, pp. 27–31.
- [4] Griazev M.V., Stepanenko A.V. Perspektivnye tekhnologii obrabotki poverkhnosti vrashcheniia frezerovaniem [Perspective technologies of processing of surfaces of revolution of the milling]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya of the Tula State University. Engineering science]. 2010, no. 2, pt. 1, pp. 130–136.
- [5] Poletaev V.A. Konstruktivnye osobennosti privodov podach stankov dlia krugovogo frezerovaniia [Design features of feed drives of machine tools for circular milling]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering journal with appendix]. 2001, no. 8, pp. 63–64.
- [6] Wek C. Future of material a Delphi forecast. *Manufacturing engineering*, 1977, vol. 79(1), pp. 59–60.
- [7] Charnko D.V., Timchenko A.I. Profil'nye soedineniia valov i vtulok v mashinostroenii [Profile connection of shafts and bushings in mechanical engineering]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 1981, no. 1, pp. 33–37.
- [8] Danilov V.A., Danilov A.A. Analiz i realizatsiia metodov formoobrazovaniia nekruglykh poverkhnosti profil'nykh momentoperedaiushchikh soedinenii [Analysis and realization of methods of shaping non-circular surfaces of profiled torque transmitting connection]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk state University. Series V. Industry. Applied science]. 2014, no. 11, pp. 8–15.
- [9] Voronov V.N. Formoobrazovanie i kinematika rezaniia pri frezotochenii nekruglykh profilei [Formation and kinematics of cutting at mesotocin non-circular profiles]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technology]. 2001, no. 7, pp. 8–11.
- [10] Danilov V.A. Analiz i puti intensifikatsii sposobov obrabotki nekruglykh poverkhnosti profil'nykh soedinenii [Analysis and ways of intensification methods of processing a non-circular profile of the surfaces of the joints]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 1991, no. 1, pp. 50–54.
- [11] Bekasov D.L. Frezotochenie nekruglykh profilei s prodol'noi podachei [Traverse mill cutting of non-round profiles]. *Tekhnologiia mashinostroeniia* [Industrial and manufacturing engineering]. 2008, no. 3, pp. 9–10.
- [12] Ivanov V.S. Modelirovanie protsessa tsikloidal'nogo formoobrazovaniia pri lezviinoi obrabotke poverkhnosti vrashcheniia [Cycloidal forming process simulation at revolving surface cut]. *Tekhnologiia mashinostroeniia* [Industrial and manufacturing engineering]. 2007, no. 7, pp. 19–23.
- [13] Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of slotted polymer filter tubes by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1231–1233.
- [14] Ivanov V.S. Analiz traektorii formoobrazovaniia pri lezviinoi obrabotke po peredatochnym otnosheniiam skhemy tekhnologicheskogo zatseplenii i vrashchenii detali i instrumenta [Shaping contour consideration at cutting relative reduction ratio of tool part engagement and rotation processing diagram]. *Tekhnologiia mashinostroeniia* [Industrial and manufacturing engineering]. 2007, no. 6, pp. 15–19.
- [15] Ivanov V.S., Zubkov N.N., Ivanov D.V. Analiz kinematiki protsessa tsikloidal'nogo formoobrazovaniia pri poluchenii shchelevykh struktur vrashchaiushchimsia lezviinym instrumentom [Kinematics analysis of the cycloidal shaping at slotted structures production by the revolving edged tool]. *Tekhnologiia mashinostroeniia* [Industrial and manufacturing engineering]. 2007, no. 11, pp. 13–15.
- [16] Bushuev V.V. *Osnovy konstruirovaniia stankov* [Design principles of machine tools]. Moscow, MGTU Stankin publ., 1992. 519 p.
- [17] Danilov V.A. Modul'noe postroenie formoobrazuiushchikh sistem pri funktsional'nom proektirovanii stanochnogo oborudovaniia [The modular structure of forming systems in

- the functional design of machine tools]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series V. Industry. Applied science]. 2013, no. 3, pp. 9–18.
- [18] Ivanov V.S., Ivanov D.V. Formirovanie strukturno-komponovochnykh reshenii stankov frezotocheniia [Formation of the structure — assembly decisions for turn-milling machines]. *Tekhnologiya mashinostroeniia* [Industrial and manufacturing engineering]. 2015, no. 12, pp. 12–17.
- [19] Bugrov Ia.S., Nikol'skii S.M. *Vysshaia matematika. T. 1. Elementy lineinoi algebry i analiticheskoi geometrii* [The higher mathematics. Vol. 1. Elements of linear algebra and analytical geometry]. Moscow, Drofa publ., 2004. 288 p.
- [20] Korn G., Korn K. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook on mathematics for researchers and engineers]. Moscow, Nauka publ., 1974. 832 p.

Статья поступила в редакцию 24.10.2016

## Информация об авторе

**ИВАНОВ Дмитрий Вячеславович** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vsivanov49@yandex.ru).

## Information about the author

**IVANOV Dmitriy Vyacheslavovich** (Moscow) — Candidate of Science, Associate Professor, Department of Metal Cutting Machines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vsivanov49@yandex.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография

**Л.И. Пономарева, В.А. Вечтомова, А.С. Милосердова**

### «Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи»

Рассмотрены возможности спутниковых многолучевых зеркальных и линзовых антенн, а также особенности построения бортовых цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных зеркальных и линзовых излучателей. Приводятся результаты оптимизации структуры и характеристик крупноапертурных излучателей, а также антенных решеток из них. Показаны преимущества многолучевых крупноапертурных излучателей при построении антенных решеток для глобальных систем спутниковой связи и возможные схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровых антенных решеток.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru