

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.91.04

### СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ,  
канд. техн. наук Р.А. КИСЕЛЕВ, О.В. ЯЛОВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрено решение типовых задач структурно-параметрического синтеза формообразующих систем станочного оборудования, обеспечивающих реализацию функциональных связей в соответствии с заданными целевыми функциями. Определены общие пути и этапы структурно-параметрического синтеза, включающие формирование целевых функций, выявление на основе анализа схем обработки управляемых параметров и функциональных связей, синтез формообразующей системы с учетом кинематического и компоновочного факторов. Приведены примеры формирования функциональных связей и их реализации при структурно-параметрическом синтезе дифференциального кинематического модуля и основанной на нем формообразующей системы станка для обработки изделий с торцовым зубчатым контуром по методу непрерывного деления.*

**Введение.** Формообразование поверхности методами механической и физико-технической обработки возможно при определенных функциональных связях между исполнительными органами станка, несущими инструмент и заготовку. Эти связи разрабатываются и реализуются на этапах схемотехнического и компоновочного проектирования станка на основе структурного и параметрического синтеза, учитывая, что траектория исполнительных движений может обеспечиваться кинематикой и компоновкой станка при определенных значениях параметров кинематических и геометрических связей в формообразующей системе [1]. Их определение является целью параметрического анализа и синтеза формообразующей системы для обеспечения ее функционирования в заданном диапазоне технологических возможностей.

Параметрическая оптимизация структуры формообразующей системы позволяет интенсифицировать процессы обработки, обеспечить требуемые технико-экономические показатели (производительности, точности, универсальности и др.), что связано с анализом влияния на них компонентов системы и их взаимосвязи [2]. Указанными компонентами являются элементы кинематической и инструментальной подсистем, обеспечивающие формообразование поверхности с заданными параметрами. Рассматриваемая задача актуальна, в частности, при функциональном проектировании оборудования для обработки зубчатых контуров на торцах деталей типа кулачковых муфт, роторов, индукторов измерительных систем и т.п.

**Общие методы и этапы решения задачи.** Цель структурно-параметрического синтеза – разработка кинематической структуры формообразующей системы, определение параметров ее элементов и их рациональное размещение. Для решения этой задачи должна быть установлена целевая функция формообразующей системы, выражающая требования к ее функционированию, например, обеспечение формы и точности траектории движения исполнительного органа и т.п. В частности, применительно к станкам для обработки торцовых зубчатых контуров (ТЗК) целевыми функциями формообразующей системы могут быть: обработка одним инструментом ТЗК с четным и нечетным числом пазов; возможность управления формой их боковых поверхностей; обработка пазов с регулируемой шириной и др.

В результате параметрического анализа и синтеза устанавливаются управляемые параметры формообразующей системы, обеспечивающие заданные технико-экономические характеристики станка, что связано с выбором и анализом взаимосвязей соответствующих компонентов, определяющих эффективность функционирования всей системы, и обуславливает необходимость рассмотрения следующих этапов:

- формирование целевых функций формообразующей системы;
- представление и параметрическое описание реализуемой на станке схемы обработки и компонентов формообразующей системы;
- выявление на основе указанного описания управляемых при наладке обрабатываемой системы и в процессе формообразования кинематических и геометрических параметров схемы обработки, обеспечивающих достижение целевой функции;
- определение структуры и параметров компонентов формообразующей системы (кинематических модулей, органов настройки, инструмента и др.);
- оптимизация по результатам параметрического анализа и синтеза кинематической и компоновочной структуры проектируемого станка для реализации возможности управления процессом формообразования за счет изменения соответствующих параметров схемы обработки.

Важной задачей параметрического синтеза формообразующих систем станочного оборудования является расчет настраиваемых параметров внешних и внутренних связей кинематических групп для формирования заданной поверхности при рациональных условиях резания. Поскольку основными структурными компонентами кинематической группы являются внутренняя и внешняя связи, выполняющие различные функции в процессе формообразования, то параметрический синтез должен проводиться для каждой из этих связей в отдельности, исходя из их функционального назначения. Так как внешняя связь кинематической группы обеспечивает скорость исполнительного движения, то определенные в результате параметрического синтеза параметры должны обеспечить постоянство скорости исполнительного движения или изменение ее по заданному закону, например, для стабильного стружкодробления при точении вязких материалов. При синтезе внутренней связи, обеспечивающей траекторию исполнительного движения, ее параметры определяются исходя из формы поверхности.

При проектировании кинематической структуры станочного оборудования задача параметрического синтеза сводится к определению параметров расположенных в них органов настройки на основе перемещений исходных ведущих и результирующих ведомых исполнительных органов. Поэтому для ее решения целесообразно использовать общую методику кинематической настройки станков, позволяющую определять параметры органов настройки и функциональных связей в формообразующей системе в соответствии с взаимосвязанными перемещениями исполнительных органов.

Требуемая функциональная зависимость между перемещениями связываемых рассматриваемой кинематической цепью элементов определяется на основе анализа схемы формообразования поверхности, позволяющего установить настраиваемые параметры, влияющие на траекторию исполнительного движения. Например, форма циклоидальной кривой, образуемой двумя согласованными вращательными движениями производящей точки, зависит от соотношения их угловых скоростей, расстояния между осями этих движений и расстояния между производящей точкой и осью вращения. Указанные параметры определяются в результате параметрического синтеза в зависимости от формируемой линии. Учитывая, что к обработанной поверхности предъявляются определенные требования к точности её формы и размеров, при параметрическом синтезе должны быть установлены как номинальные значения настраиваемых кинематических и геометрических параметров формообразующей системы, так и допуски на них.

В результате параметрического синтеза определяются значения параметров, обеспечивающие целевую функцию формообразующей системы. При этом может потребоваться изменение исходной кинематической структуры формообразующей системы станка, например, замена бездифференциальной структуры дифференциальной или отдельных кинематических модулей.

**Структурно-параметрический синтез модулей и функциональных связей.** Функциональные связи формообразующей системы модульного типа реализуются посредством входящих в нее модулей, поэтому задача структурно-параметрического синтеза всей системы связана с синтезом ее исполнительных модулей, т.е. определением их структуры и параметров, при которых обеспечивается требуемое функционирование системы. Это важно при решении задач функционального проектирования, например, при разработке и уточнении технического задания на проектируемый станок.

Определение параметров кинематического модуля часто связано с оптимизацией его структуры, в частности за счет рационального размещения в нем органов настройки. Рассмотрим эту задачу на примере дифференциального механического модуля с двумя ведущими звеньями и двумя органами настройки (рис. 1), который может использоваться для параллельного соединения двух кинематических групп при сообщении исполнительному органу составного движения, образованного равномерным и неравномерным элементарными движениями.

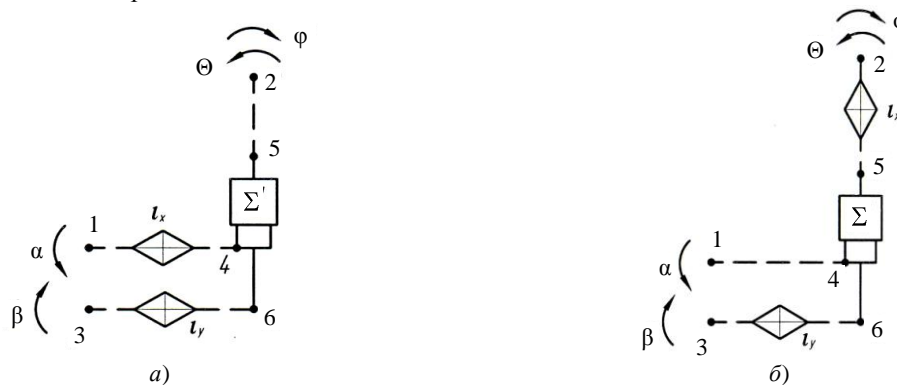


Рис. 1. Схемы соединения внутренних связей с расположением органов настройки в автономных участках (а) и в общем участке (б)

Кинематические связи модуля  $1 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$  и  $3 \rightarrow 6 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$  (см. рис. 1) имеют общий участок 5–2 и присоединенные к нему через суммирующий механизм  $\Sigma$  автономные участки 1–4 и 3–6.

Орган настройки  $i_x$  первой кинематической группы может быть расположен или в ее автономном участке 1–4 (рис. 1, а), или в общем участке (рис. 1, б). Аналогично орган настройки  $i_y$  второй кинематической группы может быть расположен или в ее автономном участке 3–6, или в общем участке.

Таким образом, изменяя расположение органов настройки, можно получить множество вариантов кинематической структуры модуля. Из них при проектировании кинематики оборудования необходимо выбрать рациональный, обеспечивающий, например, наименьшую трудоемкость перенастройки на обработку изделия с другими параметрами или более высокую точность формообразования обработанной поверхности. Эти требования выполняются, в частности, если перенастройка одного органа, например  $i_x$ , не требует перенастройки другого органа, что обеспечивается при соответствующей структуре кинематического модуля.

Рассмотрим эту задачу, когда перемещения  $\theta$  и  $\varphi$  ведомого звена 2 модуля кинематически связаны с перемещениями  $\alpha$  и  $\beta$  ведущих звеньев 1 и 2, причем  $\varphi = k_1x$ ;  $\theta = k_2x$ , где  $k_1, k_2$  – числовые коэффициенты;  $x$  – функциональный параметр, зависящий от переменного конструктивного параметра обрабатываемого изделия, например угла наклона зубьев.

Возможны различные варианты размещения органов настройки  $i_x$  и  $i_y$ . Пусть они находятся в указанных автономных участках внутренних связей, тогда структуру этих связей можно представить следующим образом:

$$\alpha \rightarrow 1 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow \varphi + \theta;$$

$$\uparrow$$

$$\beta \rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 6.$$

Расчетные перемещения (РП) для кинематической цепи, связывающей звенья 1 и 2, выражаются соотношением:

$$РП: 1 \text{ обороту звена } 1 \rightarrow ax \text{ оборота звена } 2,$$

где  $a$  – числовой коэффициент;  $x$  – функциональный параметр, зависящий от конструктивного параметра обрабатываемого изделия, например, от числа нарезаемых зубьев.

Поэтому уравнение кинематической цепи (УКЦ) запишется в виде:

$$УКЦ: ax = 1 i_{ox} i_x,$$

где  $i_{ox}$  – передаточное отношение постоянных передач данной цепи.

Тогда формула настройки (ФН) органа  $i_x$  имеет вид:

$$ФН: i_x = C_x x, \quad (1)$$

где  $C_x = a/i_{ox}$ .

Для кинематической цепи  $3 \rightarrow i_y \rightarrow 6 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$  (см. рис. 1, а) аналогично имеем:

$$РП: 1 \text{ обороту звена } 3 \rightarrow bx \text{ оборота звена } 2;$$

$$УКЦ: bx = 1 i_{oy} i_y,$$

где  $b$  – числовой коэффициент;  $i_{oy}$  – передаточное отношение постоянных передач данной цепи.

$$ФН: i_y = C_y x, \quad (2)$$

где  $C_y = b/i_{oy}$ .

В рассматриваемом варианте  $i_x = f_1(a, x)$ ;  $i_y = f_2(b, x)$ . Из данных зависимостей следует, что при изменении параметра  $x$  должны перенастраиваться оба органа  $i_x$  и  $i_y$ . Кроме увеличения трудоемкости это может быть причиной неидентичности настройки  $i_y$  при изменении параметра  $x$ , вследствие чего неизбежны погрешности обработки. Таким образом, размещение органов настройки  $i_x$  и  $i_y$  в автономных участках в данном случае является нерациональным.

Возможны варианты, когда один из органов настройки находится в общем участке 5–2. Если в нем расположить орган  $i_x$ , то получим следующую структуру внутренних связей модуля:

$$\alpha \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow i_x \rightarrow 2 \rightarrow \varphi + \theta;$$

$$\uparrow$$

$$\beta \rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 6.$$

В этом случае значение  $i_x$  выражается формулой (1), а уравнение кинематической цепи, связывающей звенья 3 и 2, зависимостью

$$УКЦ: bx = 1 i_o i_y C_x x.$$

Тогда

$$\Phi H: i_y = C, \quad (3)$$

где  $C$  – числовой коэффициент.

Поскольку значение  $i_y$  не зависит от параметра  $x$ , то при переходе к обработке изделия с иным значением этого параметра, например зубчатого колеса с тем же углом и направлением наклона зубьев, но с другим числом зубьев, требуется изменить передаточное отношение только органа  $i_x$ , что упрощает настройку.

При расположении же органов настройки по первому варианту в рассматриваемом случае требуется перенастраивать оба органа настройки, что связано с увеличением трудоемкости, и зачастую невозможно обеспечить одинаковые значения передаточного отношения органа настройки, а следовательно, идентичность обработанных изделий по определенному параметру.

Из изложенного следует, что каждый вариант структуры кинематического модуля характеризуется определенными значениями параметров органов настройки, по-разному влияющих на функциональные свойства формообразующей системы. Таким образом, как показано на рассмотренном примере, параметрический синтез кинематического модуля сводится к анализу возможных вариантов его структуры для определения варианта с рациональными значениями настраиваемых параметров.

**Синтез формообразующей системы.** Рассмотрим задачу структурно-параметрического синтеза формообразующей системы на примере формирования множества пересекающихся линий, что имеет место при обработке поверхностей с периодически повторяющимся профилем, в частности ТЗК.

Повышение производительности и точности обработки ТЗК имеет практическое значение, поскольку распространенная технология их обработки на универсальных фрезерных станках, основанная на периодически выполняемом после обработки каждого пазу движения деления, не позволяет решить эту задачу. Дискретный характер движения деления является причиной дополнительных погрешностей по шагу расположения обработанных пазов и низкой производительности обработки. Осуществление движения подачи вдоль формируемого паза увеличивает длину рабочего хода инструмента, что снижает производительность.

Заслуживают внимания более производительные и точные способы обработки ТЗК, основанные на кинематическом формировании пазов при непрерывном движении деления [4].

Структурно-параметрический синтез формообразующей системы выполняется исходя из анализа заданной кинематической схемы обработки. Кинематическое формирование ТЗК как множества равномерно расположенных по окружности пазов обеспечивается двухэлементарным исполнительным движением, образованным двумя согласованными вращательными движениями производящего контура вокруг

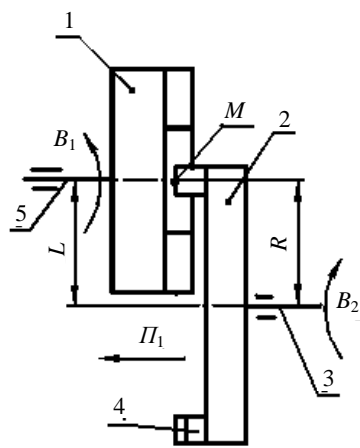


Рис. 2. Схема кинематического формирования ТЗК резцовой головкой

параллельных осей (рис. 2). Реализация данной принципиальной схемы формообразования возможна тремя практическими схемами обработки, различающимися распределением вращательных движений между инструментом и заготовкой: оба движения сообщаются или инструменту, или заготовке; или одно вращательное движение сообщается инструменту, а второе – заготовке. Более универсальным и простым в реализации является третий вариант распределения движений между инструментом и заготовкой, представленный на рисунке 2.

Режущим инструментом является резцовая головка 2 с расположенными на торце режущими зубьями 4. При обработке ТЗК инструменту 2 и заготовке 1 сообщаются вращательные движения соответственно  $B_2$  и  $B_1$  вокруг их параллельных осей 3 и 5, а инструменту – движение врезания  $\Pi_3$  вдоль оси вращения заготовки. Расстояние  $L$  между этими осями может быть равно радиусу  $R$  резцовой головки (как показано на рисунке 1) или отличаться от него.

В относительном движении траектория точки  $M$ , совершающей два вращательных движения, представляет собой циклоидальную кривую, описываемую системой уравнений:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha - R \cos \alpha(i-1); \\ y = L \sin \alpha - R \sin \alpha(i-1), \end{cases} \quad (4)$$

где  $x, y$  – текущие координаты траектории, формируемой производящими элементами резцовой головки в прямоугольной системе координат с центром на оси вращения заготовки;  $L$  – расстояние между осями резцовой головки и заготовки;  $R$  – радиус резцовой головки;  $\alpha$  – текущее значение угла поворота заготовки;  $i$  – отношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки.

Согласно уравнениям (4) форма боковых сторон обработанных пазов зависит от настраиваемых кинематического параметра  $i$  и геометрических параметров  $L$  и  $R$ .

Из множества формируемых по рассматриваемым схемам кривых в качестве траекторий исполнительных движений (производящих линий) при обработке ТЗК практический интерес представляют те, которые удовлетворяют условию замкнутости [5].

Если отношение  $i$  угловых скоростей выражается целым числом, то любая формируемая линия состоит из  $i$  конгруэнтных участков и является замкнутой. При этом соседние конгруэнтные участки соединяются между собой в точках образованной кривой, равномерно расположенных по окружности. Данное обстоятельство обеспечивает возможность многократного перемещения формообразующей точки по одной и той же траектории, что требуется при обработке ТЗК методом врезания, так как каждый паз по глубине формируется за несколько резцов (оборотов заготовки). Если значение  $i$  выражается дробным рациональным числом вида  $i = N/q$ , то также образуется замкнутая кривая, состоящая из  $N$  конгруэнтных ветвей. Формообразующая точка, описывая многократно  $N$  ветвей, возвращается каждый раз в исходное положение, что позволяет использовать образуемую линию в качестве направляющей в схемах обработки ТЗК с непрерывным движением деления.

При иррациональном значении  $i$  формообразующая точка, описывая бесконечное число пересекающихся ветвей, не возвращается в исходное положение, поэтому образуемая линия является незамкнутой. Данный случай не имеет практического значения при обработке ТЗК.

Анализ уравнений (4) позволяет определить значения параметров схемы обработки для получения боковых сторон пазов определенной формы. Например, при  $i = 1$  они очерчены по окружности, так как траектория производящей точки описывается уравнением

$$(x + R)^2 + y^2 = L^2. \quad (5)$$

Перемещение производящей точки по прямой (что необходимо при обработке ТЗК с прямолинейными пазами) обеспечивается при  $L = R$  и  $i = 2$ , так как траектория производящей точки в этом случае описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x = 0; \\ y = 2L \sin \alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что уравнением (6) описывается только средняя линия паза, формируемая точкой  $M$ , а его боковые стороны имеют эллиптическую форму. Требуемая точность обработки поверхностей достигается за счет настройки радиуса  $R$  инструмента, возможность осуществления которой должна обеспечиваться его конструкцией.

Так как отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки в рассматриваемом случае равно двум, то число обработанных пазов в 2 раза больше числа резцов в головке, и поэтому возможна обработка ТЗК только с четным числом пазов.

Технологические возможности рассмотренной схемы (см. рис. 2) по числу и форме обрабатываемых пазов значительно расширяются, если в процессе обработки изменять по определенному закону передаточное отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки. Например, для обработки зубчатых контуров с нечетным числом прямолинейных пазов угловые скорости движений  $B_1$  и  $B_2$  задают такими, чтобы в течение одного оборота инструмента их отношение  $i$  принимало в зоне обработки значение, равное двум (для формирования прямолинейного паза), а на остальном участке компенсировало вызванную несогласованность вращательных движений, нарушающую условие непрерывного деления. В этом случае можно обрабатывать ТЗК как с четным, так и нечетным числом пазов [6].

Указанные условия определяются целевой функцией формообразующей системы – обеспечение возможности обработки ТЗК с различным четным или нечетным числом пазов. Эта функция может быть реализована при неравномерном вращении инструмента или заготовки.

Возможности схемы по форме боковых поверхностей обрабатываемых пазов существенно расширяются при управлении расстоянием  $L$  между этими осями инструмента и заготовки (рис. 3, а), что должно обеспечиваться при проектировании компоновки и кинематики станка. Требуемую форму обрабатываемого паза получают за счет настройки расстояния между осями инструмента и заготовки, а также радиуса установки режущих элементов на резцовой головке. При обработке сходящихся пазов указанное расстояние настраивают по следующей зависимости [7]:

$$L = \sqrt{R^2 + R_0^2 \frac{i \pm 2}{i}}, \quad (7)$$

где  $R$  – радиус инструмента;  $R_0$  – средний радиус расположения пазов;  $i$  – отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки; знак «минус» соответствует одинаково направленным, знак «плюс» – противоположно направленным вращательным движениям инструмента и заготовки.

Данная схема обработки реализована на станке моделей ВС50 производства Витебского станко-строительного завода «Вистан». Она позволяет одним инструментом обрабатывать пазы с различными по форме боковыми сторонами (рис. 3, б): выпуклыми 1 или вогнутыми 2, что важно для повышения долговечности кулачковых муфт за счет обеспечения рациональной формы контакта их рабочих поверхностей.

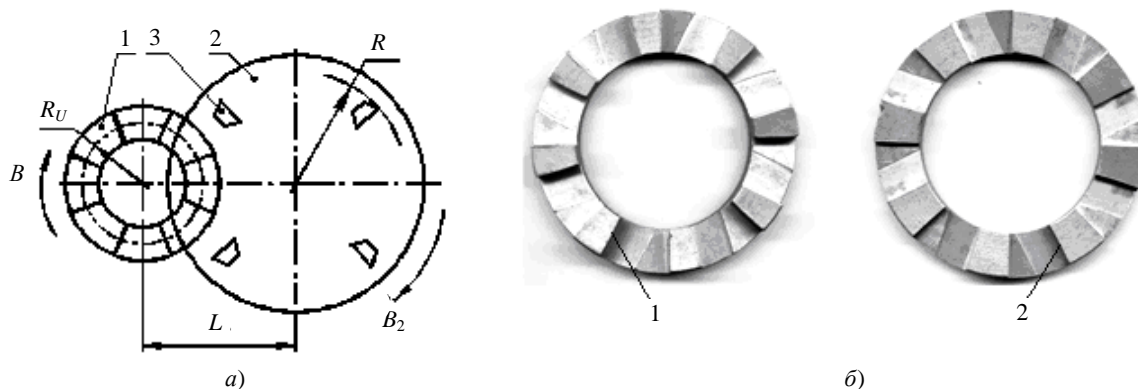


Рис. 3. Кинематическая схема обработки ТЗК с управляемым межосевым расстоянием (а) и образцы обработанных деталей (б) на станке модели ВС50

В схеме обработки ТЗК по рисунку 2 профиль паза образуется методом копирования, поэтому его ширина равна длине проекции режущей кромки резца на плоскость, перпендикулярную оси паза (траектории исполнительного движения). Это ограничивает технологические возможности данной схемы по ширине пазов, так как с увеличением последней соответственно возрастает сила резания, что снижает виброустойчивость обрабатываемой системы. В этой связи данная схема предпочтительна при обработке узких пазов.

Для исключения влияния ширины обрабатываемых пазов на виброустойчивость станка и повышения универсальности режущего инструмента целесообразно формировать паз по ширине не одновременно, а последовательно, т.е. не методом копирования, а методом следа или комбинированным методом –

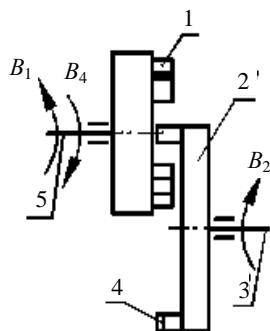


Рис. 4. Схема обработки ТЗК с управляемой шириной пазов

сочетанием методов копирования и следа. На этом принципе основана схема обработки пазов на торцах деталей [8], которая от рассмотренной отличается тем, что требуемую ширину пазов обеспечивают не за счет параметров режущей части инструмента, а кинематически, сообщая заготовке дополнительное вращение  $B_4$  для профилирования пазов по ширине (рис. 4). В данном случае процесс обработки состоит из последовательно выполняемых этапов врезания и профилирования.

На этапе врезания детали сообщают вращение  $B_1$  с частотой  $n_1$ , а резцовой головке – вращение  $B_2$  с частотой  $n_2$  в том же направлении, что и вращение  $B_1$ . При этом  $n_2/n_1 = 2$ . Одновременно с движениями  $B_1$  и  $B_2$  резцовой головке сообщается также движение врезания  $B_3$  вдоль оси 3. При переходе к этапу профилирования изменяется отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки, имевшее место на этапе врезания. Тем самым создается движение профилирования – относительное перемещение режущих зубьев резцовой головки вдоль контура заготовки.

Отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки задают в зависимости от скорости и направления движения профилирования по формуле

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,5 \mp \frac{S}{\pi d n_2}, \tag{8}$$

где  $S$  – скорость движения профилирования;  $d$  – диаметр заготовки; знак «плюс» соответствует одинаково направленным вращению заготовки и движению профилирования, «минус» – противоположно направленным этим движениям.

Для обеспечения соотношения (8) частоту вращения заготовки изменяют по сравнению с этапом врезания на величину  $\Delta n_1 = \frac{S}{\pi d}$  или частоту вращения резцовой головки на  $\Delta n_2 = \frac{2S}{\pi d}$ . Практически это обеспечивается, например, при сообщении дополнительного вращения  $B_4$  заготовке или резцовой головке соответственно с частотой  $\Delta n_1$  или  $\Delta n_2$ .

Благодаря тому, что после выполнения этапа врезания изменяют соотношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки и тем самым создают движение профилирования, можно

обрабатывать пазы, ширина которых не зависит от длины режущей кромки зуба инструмента, а определяется временем этапа профилирования. Поэтому данная схема позволяет обрабатывать разнообразные детали с ТЗК одним инструментом.

Из анализа кинематических схем обработки следует, что для обработки ТЗК с четным и нечетным числом пазов и различной формой их боковых сторон кинематическая структура и компоновка станка должны обеспечивать возможность настройки параметров  $L$ ,  $R$  и  $i$ . Такую структуру имеет станок [9], формообразующая система которого построена на базе дифференциального кинематического модуля (см. рис. 1).

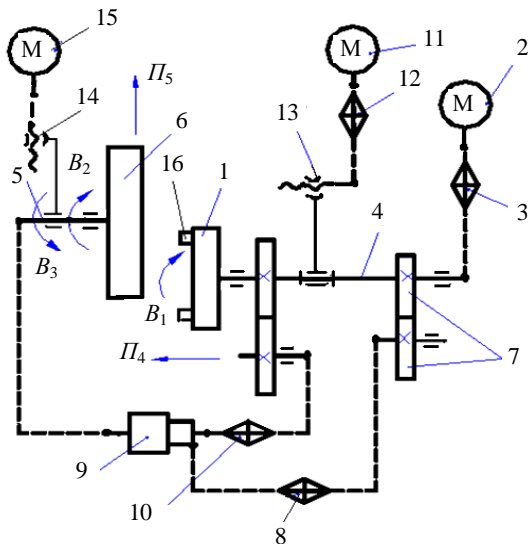


Рис. 5. Структурная схема станка для обработки пазов на торцах кольцевых деталей

Станок (рис. 5) содержит: привод вращения инструмента 1, состоящий из двигателя 2 и органа настройки 3 скорости резания; шпиндели 4 и 5 соответственно инструмента 1 и заготовки 6; связывающую указанные шпиндели между собой кинематическую цепь деления с суммирующим механизмом 9 и органом настройки 10; дополнительную кинематическую цепь между этими шпинделями, снабженную механизмом 7 автоматического изменения угловой скорости вращения заготовки и органом настройки 8.

Для осуществления поступательного перемещения инструмента вдоль оси заготовки служит привод подачи, состоящий из двигателя 11, органа настройки 12 и винтовой пары 13. Станок снабжен устройством в виде винтовой передачи 14 и двигателя 15 для настройки расстояния между осями вращения инструмента 1 и заготовки 3. Резцы 16 установлены в корпусе режущего инструмента 1 с возможностью перемещения в радиальном направлении для настройки расстояния между осями вращения инструмента и заготовки в зависимости от формы пазов. Механизм 7 автоматического изменения угловой скорости вращения заготовки может быть выполнен, например, в виде некруглых зубчатых колес.

Перед обработкой посредством устройства 14 настраивают расстояние между осями инструмента 1 и заготовки 6 путем сообщения шпинделю с инструментом движения  $\Pi_4$  от двигателя 15 или вручную, а резцы 16 устанавливают в инструменте 1 относительно оси его вращения в соответствии с формой обрабатываемых пазов.

Станок работает следующим образом. Шпиндель 4, несущий инструмент 1, получает вращение  $B_1$  от двигателя 2 с частотой, настраиваемой органом настройки 3. Шпиндель 5 с заготовкой 6 получает два вращательных движения  $B_2$  и  $B_3$ . Вращение  $B_2$  передается шпинделю 5 от шпинделя 4 через орган настройки 10 и суммирующий механизм 9. Угловая скорость этого движения задается органом настройки 10. Вращение  $B_3$  передается шпинделю 5 от шпинделя 4 через механизм 7 автоматического изменения угловой скорости заготовки, орган настройки 8 и суммирующий механизм 9. Угловая скорость вращения  $B_3$  изменяется механизмом 7 в течение каждого оборота инструмента для обеспечения соотношения угловых скоростей шпинделей инструмента и заготовки в соответствии с требуемой формой пазов. Таким образом, формообразующая система станка обеспечивает при постоянной частоте вращения инструментального шпинделя неравномерное вращение шпинделя с заготовкой для управления процессом формообразования в соответствии с циклом обработки. Инструмент 1 получает перемещение  $\Pi_4$  вдоль оси вращения заготовки (движение врезания) от двигателя 11 с помощью винтовой пары 13. Скорость этого перемещения задается органом настройки 12 в соответствии с режимом резания.

Кинематическая цепь, соединяющая шпиндель 4 и суммирующий механизм 9 через устройства 7 и 8 может быть заменена подключенным к механизму 9 регулируемым двигателем, что целесообразно при оснащении станка системой ЧПУ. Такое решение упрощает настройку и повышает универсальность станка.

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- структурно-параметрический синтез формообразующей системы станочного оборудования включает формирование целевых функций, выявление на основе анализа схем обработки управляемых параметров и функциональных связей, их реализацию посредством кинематических модулей, обоснование размещения в системе органов настройки и взаимного расположения исполнительных органов с учетом кинематического и компоновочного факторов;

- параметры структурных элементов формообразующей системы определяются на основе общей методики расчета кинематической настройки станков с учетом реализуемых системой функциональных связей;



- размещение органов настройки в кинематических связях определяется исходя из его влияния на выполнение целевых функций;
- изложенная процедура структурно-параметрического синтеза формообразующих систем носит универсальный характер и может быть использована при функциональном проектировании станков с различными системами управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, В.А. Реализация функциональных связей в формообразующих системах станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 6–14.
2. Данилов, В.А. Параметрический синтез формообразующих систем станочного оборудования / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч. техн. конф., посв. памяти проф. В.Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – С. 110–113.
3. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
4. Данилов, В.А. Синтез и реализация универсальных схем формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 2. – С. 2–10.
5. Данилов, В.А. Анализ условий формирования пазов на торцах деталей методом кинематического профилирования / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Теория и практика машиностроения: междунар. науч.-техн. журнал. – 2004. – № 2. – С. 14–16.
6. Способ обработки пазов на торцах деталей и станок для его осуществления: пат. 6165 Респ. Беларусь, МПК В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 19990206; заявл. 02.03.99; опубл. 2004.06.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004.
7. Способ обработки пазов на торцах деталей: а. с. 1798055 SU, МПК В33С3/28 / В.А. Данилов; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявка № 4942664; опубл. 28.02.93 // Бюл. изобретений. – 1993. – № 8.
8. Способ формирования пазов на торце детали: пат. 5707 Респ. Беларусь, МПК В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявл. 17.01.2000. – № а 2000051; опубл. 2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 4. – С. 125.
9. Станок для обработки пазов на торцах деталей: пат. 9191 Респ. Беларусь, МПК В 23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявл. 24.09.2012. – № u 20120835; опубл. 30.06.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 183.

Поступила 20.01.2014

**STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS  
OF THE FORMATIVE SYSTEMS OF MACHINE EQUIPMENT**

**V. DANILOV, R. KISELEV, O. YALOVSKI**

*In the article the solution of typical problems of structural and parametric synthesis of shaping systems of machine equipment which ensure the implementation of functional connections in accordance with the specified objective functions is analyzed. We defined common directions and steps of structural and parametric synthesis, including the formation of the objective functions, identification based on the analysis processing circuits of controlled parameters and functional linkages, synthesis of the forming system based on kinematic and layout factors. The article gives the examples of the formation of functional connections and their implementation in structural and parametric synthesis of the differential kinematic module and, based on it, the molding machine system for processing with mechanical toothed contour using method of continuous division.*