

*Машиноведение, механика, надежность и безопасность машин и технических систем, мехатронные системы машин и механизмов, теория их проектирования, физика, химия и механика поверхности, управление ее структурой и свойствами относятся к приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006 -2010 годы, утвержденным Постановлением Совета Министров Республики Беларусь. Эти исследования призваны обеспечить создание новых энергосберегающих технологий и высокоэффективных материалов, повышение технического уровня и конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения - энергетического и технологического оборудования, автомобильной и сельскохозяйственной техники и т.д., что обусловлено как необходимостью удовлетворения внутренних потребностей страны, так и увеличения экспорта продукции.*

УДК 621.06.62

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТАНКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Статья посвящена анализу некоторых методических аспектов концептуального проектирования механики металлорежущих станков, связанных с синтезом их кинематической структуры. Рассмотрены пути оптимизации структуры внешних и внутренних связей кинематических групп за счет обоснования расположения органов настройки параметров исполнительных движений в отдельных и кинематически связанных простых и сложных кинематических группах, выбора положения звена соединения связей, совмещения внутренних и внешних связей, применения современных приводов. С иллюстрацией на конкретных примерах показаны направления совершенствования кинематической структуры станков с неравномерными движениями исполнительных органов для расширения их технологических возможностей и обеспечения эффективных условий резания при обработке сложных поверхностей путем стабилизации скорости исполнительных движений и рабочих углов инструмента.*

**Введение.** Кинематическая структура станка представляет совокупность механических, электрических, гидравлических и других элементов, объединенных в кинематические связи для создания исполнительных движений, передачи энергии и информации. Она устанавливает функциональные связи между исполнительными органами станка, необходимые для реализации принятой схемы формообразования заданной поверхности, и является основой для разработки кинематики и конструкции станка.

Кинематическая структура станков независимо от используемых видов кинематических связей (механические, гидравлические, мехатронные, комбинированные) и систем управления (аналоговые, числовые и др.) базируется на общих положениях [1], основные из которых следующие:

- любое исполнительное движение в станке создается отдельной *кинематической группой*;
- каждая кинематическая группа содержит источник движения, внешнюю и внутреннюю связи, при этом *внутренняя связь* обеспечивает траекторию создаваемого движения, а *внешняя связь* - остальные его параметры и служит также для передачи энергии от источника движения через звено соединения связей во внутреннюю связь;
- настройка параметров создаваемого группой исполнительного движения осуществляется соответствующими *органами настройки* (механическими, гидравлическими, электронными и т.п.), размещенными во внешней и внутренней связях;
- совокупность всех кинематических групп и межгрупповых связей образует *кинематическую структуру* станка, которая зависит от количества и структуры групп, а также способа соединения их между собой.

Такой подход позволяет с единых позиций проводить как анализ, так и синтез кинематики станков, что подтверждается, в частности, разработкой на этой основе кинематической структуры различных признанных изобретениями металлорежущих станков с механическими, гидравлическими и мехатронными связями [2-4].

Синтез кинематической структуры является ответственным этапом функционального проектирования станка, так как допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих этапах его проектирования. В соответствии со структурой, синтез отдельной кинематической группы включает построение внутренней и внешней связей, размещение в них органов настройки и выбор положения зве-

на соединения связей. Внутренняя связь простой кинематической группы представляет собой кинематическую пару, подвижное звено которой является исполнительным органом станка (шпинделем, суппортом), а внутренняя связь сложной группы содержит, как минимум, одну кинематическую цепь, связывающую между собой исполнительные звенья.

Оптимизация кинематической структуры отдельных групп и станка в целом предполагает обоснование решений по каждому из указанных этапов их синтеза исходя из того, что кинематическая структура должна обеспечивать как процесс формообразования поверхности, так и благоприятные условия резания, например, постоянно или изменение по определенному закону скорости формообразующего движения, стабилизацию рабочих углов инструмента и т.д., что особенно важно при обработке сложных поверхностей. Поэтому синтез рациональной кинематической структуры станка предполагает учет обоих факторов [5]. Исходя из этого в работе анализируются основные этапы синтеза и совершенствования кинематической структуры станков, преимущественно для обработки сложных поверхностей.

**Оптимизация структуры внешних связей кинематических групп.** Структура внешней связи определяется ее функциональным назначением - передача энергии от двигателя во внутреннюю связь и настройка исполнительного движения по требуемым параметрам (в общем случае скорости, направлению, исходной точке и длине пути).

На рисунке 1, а изображена типовая широко применяемая в станках структура внешней связи, обеспечивающая настройку исполнительного движения по скорости и направлению. Для этого во внешней связи 1 - 2 размещены реверсивный механизм  $P$  и орган настройки, который в зависимости от назначения и степени универсальности станка может быть выполнен в виде коробки скоростей, сменных шкивов или зубчатых колес.

Звено 2 является звеном соединения внешней и внутренней связей. Функцию реверсивного механизма может выполнять двигатель  $M$  или орган настройки  $i_v$  за счет установки в нем дополнительного сменного зубчатого колеса. Такое решение позволяет повысить точность кинематической цепи благодаря исключению погрешностей реверсивного механизма.

В станках, работающих по автоматическому циклу, структура внешней связи, кроме параметров скорости и направления, должна обеспечивать также настройку исполнительного движения на начало и длину пути. Например, в структуре, представленной на рисунке 1, б, это достигается установкой на диске 5 упоров 6 и 7, которые при вращении диска воздействуют на переключатель 8 и обеспечивают в установленное время включение и выключение двигателя  $M$  или муфты, расположенной во внешней связи. В станках с ЧПУ указанные параметры движения обеспечиваются программными средствами.

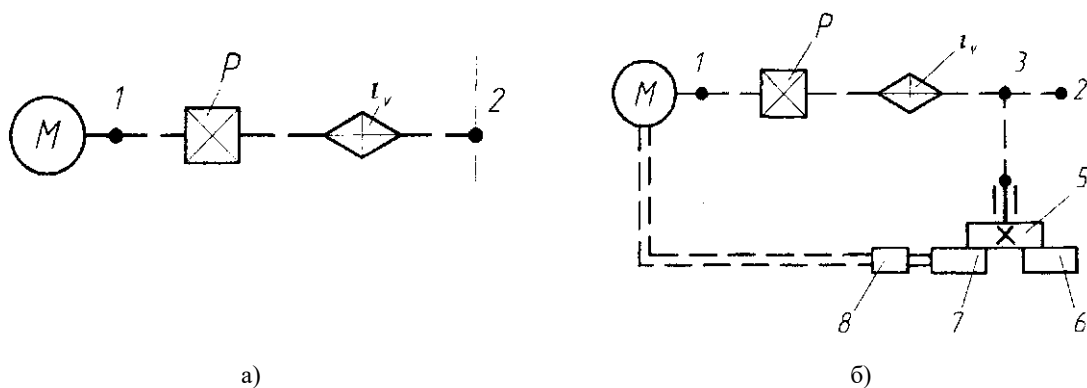


Рис. 1. Типовая структура внешних связей при настройке движения По скорости и направлению (а) и дополнительно на начало и длину пути (б)

Во внешнюю связь кинематической группы вводятся также механизмы, обеспечивающие требуемый характер исполнительного движения: однооборотные муфты, храповые или мальтийские механизмы - для получения прерывистого движения; кривошипные или кулачковые механизмы - для создания возвратно-поступательного движения исполнительного органа и т.д.

Таким образом, структура внешней связи зависит от количества настраиваемых ею параметров исполнительного движения, а также типа двигателя (регулируемый или нерегулируемый, реверсивный или неререверсивный).

При синтезе структуры внешней связи следует учитывать и то, что она определяет скорость исполнительного движения и, следовательно, производительность обработки. Поэтому важным требованием к структуре внешней связи кинематической группы с неравномерными движениями исполнительных органов является стабилизация или управление по определенному закону скоростью исполнительного

движения. Это возможно за счет непрерывного изменения передаточного отношения кинематической цепи внешней связи или частоты вращения двигателя, что обеспечивается соответствующей структурой кинематической группы,

В первом случае внешняя связь должна содержать орган настройки с переменным передаточным отношением (например, вариатор и т.п.) и кинематическую цепь, связывающую устройство управления данным органом с одним из звеньев внутренней связи. Во втором случае это звено или исполнительный орган кинематически соединяют с датчиком положения, связанным с системой управления, обеспечивающей регулирование частоты вращения двигателя по заданному алгоритму [6]. При осуществлении всех элементарных движений от отдельных двигателей стабилизация или изменение по определенному закону скорости исполнительного движения обеспечивается системой программного управления.

Если исполнительное движение создается простой кинематической группой, то для стабилизации его скорости необходимо управлять скоростью движения исполнительного органа. Например, стабилизация скорости резания при точении торцевой поверхности может быть обеспечена непрерывным изменением частоты вращения шпинделя станка по зависимости, обратно пропорциональной расстоянию между вершиной резца и осью вращения заготовки.

Решение задачи стабилизации скорости сложного исполнительного движения рассмотрим на примере станка для обработки винтовых поверхностей переменного шага. Обработка такой поверхности, формируемой согласованными движениями (вращением заготовки и поступательным перемещением инструмента вдоль оси ее вращения), возможна по трем схемам:

- регулированием частоты вращения заготовки при постоянной скорости поступательного движения;
- регулированием скорости поступательного перемещения при постоянной частоте вращательного движения;
- одновременным регулированием скоростей обоих движений [3].

Известные станки [1] реализуют первую и вторую схемы обработки, характерным для которых является неравномерность скорости результирующего винтового движения, что снижает производительность формообразования и не позволяет в полной мере использовать режущую способность инструмента из-за непрерывно изменяющихся условий резания. В этой связи более эффективной при любых параметрах винтовой поверхности является третья схема, при которой за счет одновременного изменения скоростей указанных движений обеспечивается стабилизация скорости исполнительного движения и, следовательно, условий резания. Кроме того, эта схема обладает по сравнению с первыми более широкими возможностями изменения шага формируемой винтовой поверхности.

Структурная схема станка, реализующего третью схему обработки многозаходных винтовых канавок переменного шага концевой фрезой, показана на рисунке 2. Все создаваемые на станке исполнительные движения обеспечиваются его частной

структурой при обработке многозаходных винтовых канавок. Исходя из реализуемой схемы обработки, кинематическая структура содержит две группы формообразования: простую группу главного движения  $\Phi_{AB_1}$  и сложную группу винтового движения подачи  $\Phi_{LB_2Pm}$ , а также группу движения деления  $D(B_4)$  и группы вспомогательных движений  $V_{cn}$  (Ш) и  $V_{cn}\{я5\}$ .

Группы движений  $\Phi_{y\{B\}}$  и  $\Phi_{\{B-,P\}}$ , как не имеющие общих исполнительных звеньев и совмещенных по траектории элементарных движений, соединены через промежуточные звенья без межгрупповой связи, что характерно для фрезерных станков.

Группы движений  $\Phi_n(B_2/7з)$  и  $D\{B_A\}$  соединены последовательно, так как имеют общее исполнительное звено (шпиндель с заготовкой), которое поочередно участвует в обоих движениях. Группы вспомогательных движе-

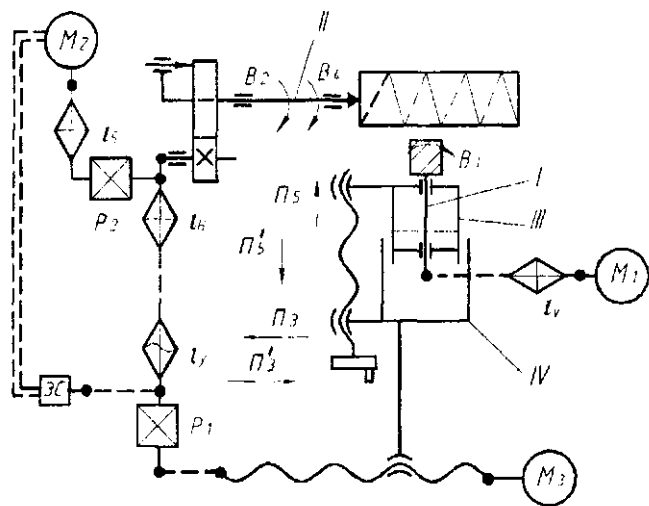


Рис. 2 Структурная схема станка для фрезерования винтовых канавок переменного шага

ний связаны с группами остальных движений через промежуточные и неподвижные исполнительные звенья.

Для настройки скорости движения  $\Phi(B_1)$  во внешнюю связь введен орган. При достаточном диапазоне регулирования частоты вращения двигателя  $M1$  отпадает необходимость в этом органе настройки. Направление вращения шпинделя задается переключением электродвигателя  $M1$ , что характерно для фрезерных станков.

Внутренняя связь группы движения  $\Phi_3(B_2I_3)$  выполнена в виде кинематической цепи, связывающей между собой шпindel  $II$  и продольный суппорт  $IV$ , совершающие элементарные движения, соответственно,  $B_2$  и  $I_3$ . Для формирования траектории исполнительного движения (левой или правой винтовой линии переменного шага) во внутренней связи расположены: орган настройки  $i_s$  с переменным передаточным отношением, обеспечивающий заданный закон и диапазон изменения шага обрабатываемой винтовой поверхности; орган  $i_m$  для настройки предельного значения шага винтовой поверхности; реверсивный механизм  $P_1$  для настройки винторезной цепи на обработку левых или правых винтовых канавок.

Внешняя связь соединяет двигатель  $M_2$  с внутренней связью через органы настройки скорости подачи ( $i_s$ ) и направления движения (реверсивный механизм  $P_2$ ). При применении реверсивного двигателя с достаточным диапазоном регулирования частоты его вращения органы настройки  $i_s$  и  $P_2$  во внешней связи не требуются.

Для стабилизации скорости движения подачи  $\Phi_3(B_2I_3)$  частота вращения шпинделя с заготовкой должна регулироваться непрерывно в соответствии с изменением шага винтовой поверхности, поэтому внешняя связь имеет переменную скоростную характеристику. С этой целью в структурную схему станка введена цепь управления частотой вращения двигателя  $M_2$ , которая снабжена задатчиком скорости (ЗС), связанным с кинематической цепью внутренней связи на участке между органом настройки  $i_s$  и тяговым устройством.

Рассмотрим настройку кинематических цепей группы винтового движения, когда обрабатываемая поверхность ограничена цилиндрическими винтовыми линиями переменного шага  $H$ , изменяющегося по закону:

$$H = H_0 + k\alpha, \quad (1)$$

где  $H_0$  – начальное значение шага;  $\alpha$  – угол поворота в винтовом движении;  $k$  – коэффициент.

В группе винтового движения настраиваются две кинематические цепи: цепь подач, которая через органы настройки  $i_s$  и  $P_2$  связывает вращение двигателя  $M_2$  с вращением шпинделя  $II$ , и винторезная цепь, связывающая через органы настройки  $i_m$ ,  $i_s$  и  $P_2$  вращение шпинделя  $II$  с перемещением продольного суппорта  $IV$ . Винторезная цепь настраивается по общей методике. Настройка цепи подач для стабилизации скорости винтового движения имеет особенности, зависящие от принятого способа стабилизации скорости, – регулированием передаточного отношения органа настройки или частоты вращения электродвигателя.

Скорость результирующего движения подачи в обоих случаях выражается зависимостью:

$$s = n_s i_{os} i_s \frac{\pi D}{\cos \beta}, \quad (2)$$

где  $s$  – перемещение фрезы относительно заготовки по винтовой линии, мм/мин;  $n_s$  – частота вращения двигателя  $M_2$ , мин<sup>-1</sup>;  $i_{os}$  – постоянная кинематической цепи между двигателем  $M_2$  и шпинделем  $II$ ;  $i_s$  – передаточное отношение органа настройки данной цепи;  $D$  – диаметр заготовки, мм;  $\beta$  – угол наклона винтовых канавок.

Стабилизация величины  $s$ , как следует из (2), возможна за счет изменения или передаточного отношения органа настройки  $i_s$ , или частоты вращения  $n_s$  электродвигателя. В первом случае величина  $i_s$  должна изменяться в соответствии с шагом формируемой поверхности по зависимости:

$$i_s = \frac{s \cos \beta}{n_s i_{os} \pi D}. \quad (3)$$

Угол  $\beta$  в зависимости (3) – величина переменная, ее текущее значение составляет

$$\beta = \arctg \frac{H}{\pi D}, \quad (4)$$

где  $H$  – шаг винтовой поверхности, выражаемый зависимостью (1).

При применении регулируемого двигателя, как следует из (3), при любом постоянном значении  $i_{os}$ , для обеспечения постоянной подачи  $s$ , частота вращения двигателя  $M_2$  с учетом (1) и (2) должна изменяться по зависимости:

$$n_s = \frac{s \cos \arctg((H_0 + k\alpha)/\pi D)}{i_{os} i_s \pi D}. \quad (5)$$

Значение  $i_s$  в данном случае рекомендуется определять для такого значения угла  $\beta$ , при котором колебание подачи  $s$  относительно ее среднего значения минимально.

Поскольку величина подачи не влияет на шаг винтовых канавок, то частота вращения двигателя может задаваться с отклонениями от расчетного по (5) значения, что упрощает реализацию задачи управления. Благодаря постоянству скорости винтового движения создаются одинаковые условия резания на всей длине обрабатываемой винтовой канавки, стабилизируются усилия резания и упругие деформации элементов обрабатывающей системы, что повышает точность формообразования. Кроме того, обеспечивается минимальное машинное время и, следовательно, повышается производительность обработки. Таким образом, оптимизация структуры внешних связей позволяет улучшить технико-экономические показатели станка.

Оптимизация структуры внутренних связей. При синтезе структуры внутренних связей станков для обработки сложных поверхностей важно учитывать особенности их формообразования, например, с целью создания одинаковых условий резания. Поэтому структура внутренней связи в этом случае должна обеспечивать не только траекторию исполнительного движения, но и ориентацию инструмента относительно формируемой поверхности. Рассмотрим реализацию этих требований при построении кинематической структуры станка для обработки резьб переменного шага. Их обработка на известных станках [1] осуществляется неподвижным относительно суппорта резцом, поэтому вследствие переменности шага (угла наклона) резьбы непрерывно изменяются рабочие углы инструмента, при определенных значениях которых не обеспечивается условие его проходимости. Это, с одной стороны, существенно ограничивает технологические возможности станка по диапазону изменения шага резьбы и, с другой, не позволяет реализовать оптимальную геометрию инструмента и режимы резания.

На рисунке 3 изображена структурная схема станка для обработки резьб и шлицев переменного шага, у которого внутренняя связь группы винтового движения обеспечивает постоянную ориентацию

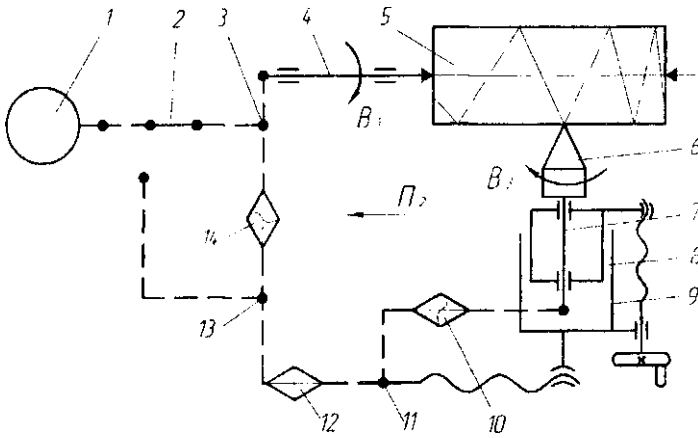


Рис. 3 Структурная схема станка для обработки винтовых поверхностей переменного шага

резцедержатель 7 получает непрерывный поворот, который задается органом 10 так, что передняя поверхность резца имеет неизменную ориентацию относительно направления траектории винтового движения. Благодаря этому передний и задний рабочие углы резца постоянны при изменении шага обрабатываемой поверхности, что позволяет осуществить обработку при оптимальной геометрии резания, повысить ее производительность и стойкость инструмента, расширить технологические возможности станка по диапазону изменения шага обрабатываемой поверхности.

Выбор положения звена соединения связей в кинематических группах. Неравномерность элементарных движений и скорости исполнительного движения существенно зависит от положения звена соединения связей, особенно в структурах дифференциального типа. Например, при использовании дифференциального механического кинематического модуля (рис. 4), в зависимости от положения звена соединения связей с постоянной частотой вращения, базовое движение может иметь структуру  $B_1(B_2' + \tilde{B}_2'')$  или  $\tilde{B}_1(B_2' + \tilde{B}_2'')$  [8].

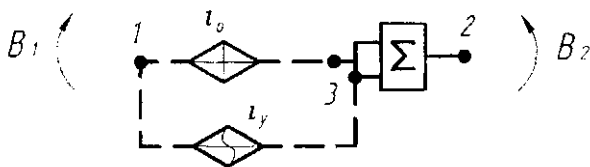


Рис. 4. Структура дифференциального механического кинематического модуля

Первая из них реализуется, когда звено соединения связей расположено в цепи  $i_x - 1 - i_y$ , а вторая – если в цепи  $i_y - 3$ .

Во втором варианте при противоположно направленных движениях  $\vec{V}_1$  и  $(V_2 + \vec{V}_2')$  может достигаться без введения во внешнюю связь специального устройства практически приемлемая стабилизация скорости исполнительного движения, так как уменьшение, например, скорости движения  $V_1$  сопровождается одновременно увеличением скорости движения  $V_2$ . Выбор рационального положения звена соединения связей позволяет в данном случае упростить кинематическую структуру станка.

Таким образом, в станках с неравномерным движением исполнительных органов положение звена соединения внешней и внутренней связей существенно влияет на характер элементарных движений исполнительных органов, что не присуще станкам с равномерными движениями исполнительных органов. Следовательно, обоснованный выбор звена соединения связей позволяет оптимизировать структуру кинематической группы.

В станке (см. рис. 3) этот путь совершенствования кинематической структуры обеспечивается благодаря тому, что имеются два звена соединения связей, одно из которых (3) расположено между шпинделем 4 и механизмом изменения шага 14, а другое (13) - между механизмом 14 и суппортом 9. С помощью переключающего устройства 2 двигатель 1 через внешнюю связь может быть подключен к любому из этих звеньев соединения связей. От этого зависит характер движений исполнительных органов. Если используется звено 3, то при постоянной частоте его вращения в процессе обработки шпиндель вращается с постоянной частотой, а суппорт перемещается с переменной скоростью. Если же внешняя связь подключена к звену /3, то характер движений исполнительных органов станка - противоположный.

Скорость движения формообразования и, следовательно, производительность изменяются незначительно на всей длине обработки, если при нарезании резьбы переменного шага неравномерное движение сообщается инструменту, а при обработке шлицев - заготовке [3]. Таким образом, кинематическая структура стайка позволяет реализовать два способа обработки, один из которых эффективен для резьб, а второй - для шлицев переменного шага, благодаря чему обеспечиваются условия высокопроизводительной обработки на всем диапазоне технологических возможностей станка. Достигается это соответствующим выбором положения звена соединения связей.

**Совмещение внешней и внутренней связей.** Совмещение внешней и внутренней связей кинематических групп характерно для станков с числовым программным управлением, поскольку перемещение каждого исполнительного органа обеспечивается индивидуальным двигателем, связанным с системой управления. В этом случае упрощается кинематика станка, а благодаря исключению большинства механических передач с присущими им погрешностями повышается кинематическая точность станка.

Рассмотрим этот путь совершенствования кинематической структуры на примере станка для обработки винтовых канавок переменного шага (рис. 5), который отличается от станка (см. рис. 3) тем, что механические связи между его исполнительными органами заменены мехатронными, а каждый исполнительный орган станка снабжен индивидуальным двигателем.

Принципиальное отличие этого варианта станка от предыдущего состоит в исполнении кинематической группы винтового движения подачи  $V_{Ph}$ . Она имеет совмещенную внешнюю и внутреннюю связи, которые включены в винторезную кинематическую цепь между шпинделем II и суппортом IV. Данная цепь содержит связанные с системой числового программного управления СУ регулируемые двигатели  $M_2$  и  $M_1$  первый из которых соединен со шпинделем II а другой - с ходовым винтом тягового устройства суппорта IV. При применении двигателя  $M_2$  кольцевого типа, его ротор непосредственно устанавливается на шпинделе II.

Для повышения точности согласования движений  $V_2$  и  $V_2'$  задаваемой системой управления в соответствии с законом изменения шага обрабатываемых винтовых канавок, кинематическая группа движения  $D_3/7_3$  снабжена системой обратной связи, которая содержит связанные с системой управления датчик  $D_\phi$  угла поворота шпинделя //и линейный датчик положения  $D_x$  продольного суппорта IV.

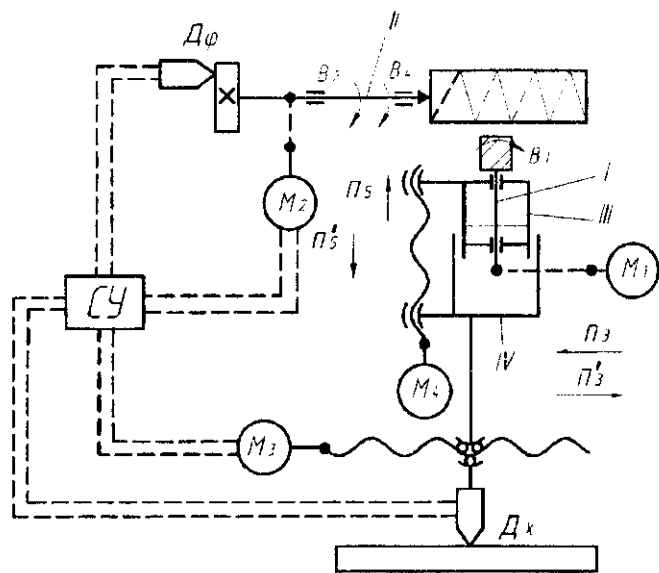


Рис. 5 Структурная схема станка для нарезания винтовых канавок переменного шага с мехатронными связями

па движения  $D_3/7_3$  снабжена системой обратной связи, которая содержит связанные с системой управления датчик  $D_\phi$  угла поворота шпинделя //и линейный датчик положения  $D_x$  продольного суппорта IV.

Для обработки с постоянной результирующей подачей  $s$  винтовой канавки переменного в соответствии с уравнением (1) шага, частота  $n_{II}$  вращения шпинделя  $II$  должна изменяться по зависимости:

$$n_{II} = \frac{s \cos \arctg((H_v + k\alpha) / \pi D)}{\pi D} \quad (6)$$

Для этого частота вращения  $n_{32}$  двигателя  $M_2$  задается системой управления, равной частоте  $n_{II}$ , если передаточное отношение кинематической цепи между двигателем  $M_2$  и шпинделем  $II$  равно 1. В противном случае  $n_{32} = n_{II} / i_{ок}$ , где  $i_{ок}$  – постоянная этой кинематической цепи. Одновременно частота вращения  $n_{33}$  двигателя  $M_3$  регулируется системой управления по зависимости:

$$n_{33} = H n_{II} / S_3 \quad (7)$$

Дальнейшим направлением совершенствования кинематической структуры станка (см. рис. 5) является замена двигателя  $M_3$  и связанного с ним тягового устройства линейным двигателем, а также применение для вращения шпинделя встроенного кругового (кольцевого) двигателя для повышения кинематической точности винторезной цепи за счет исключения геометрических и упругих погрешностей тягового устройства и других механических передач.

**Рациональное размещение органов настройки в кинематических группах.** Выбор варианта размещения органов настройки является важным этапом синтеза кинематической структуры, так как от него существенно зависят точность и трудоемкость настройки исполнительных движений. Прежде всего это относится к размещению органов настройки скорости, траектории и направления движения. Рассмотрим варианты решения данной задачи при проектировании кинематически не связанных и связанных групп.

*Размещение органов настройки в простых группах.* В простой кинематической группе все органы настройки расположены во внешней связи. Поэтому оптимизация ее структуры связана с обоснованием расположения органов настройки в кинематической цепи между двигателем и звеном соединения связей, в частности, исходя из условий минимизации габаритов и веса привода, обеспечения его быстродействия и других требований.

Первое условие обеспечивается, если максимально возможное число зубчатых передач с минимальным модулем расположено в начале кинематической цепи. В приводах главного движения это достигается, если реверсивный механизм предшествует органу настройки скорости. По такой схеме построены, например, приводы главного движения токарно-винторезных станков.

Следует иметь в виду, что такой вариант размещения органов настройки не является рациональным с точки зрения обеспечения быстродействия привода и благоприятных динамических условий работы механизмов станка из-за увеличения числа передач между реверсивным механизмом и исполнительным органом. Поэтому для повышения быстродействия реверсивный механизм следует располагать после органа настройки скорости. В приводах подач, учитывая небольшую передаваемую мощность по сравнению с мощностью привода главного движения, выбор места расположения реверсивного механизма связан с удобством его переключения.

*Размещение органов настройки в отдельной сложной группе.* Для сложной несвязанной с другими кинематической группы рассматриваемая задача сводится к распределению органов настройки между внешней и внутренней кинематическими связями и обоснованию их размещения в каждой из этих связей.

Для повышения кинематической точности станка во внутренней связи рекомендуется располагать только органы настройки траектории исполнительного движения, а во внешней связи – органы настройки остальных параметров. Проиллюстрируем это на примере станка (рис. 6) для нарезания конической резьбы.

Кинематическая структура станка при нарезании резцом однозаходной резьбы должна создавать трехэлементарное исполнительное движение Ф(В1П2П3). Так как в данном случае взаимосвязаны три элементарных движения, и следовательно три исполнительных органа (шпиндель 4, продольный 7 и поперечный // суппорты), то внутренняя связь группы винтового движения содержит две кинематические цепи. Первая цепь 3 - 2 - 1, - П1 - 5 - 6 связывает между собой шпиндель 4 и продольный суппорт 7, совершающие согласованные движения

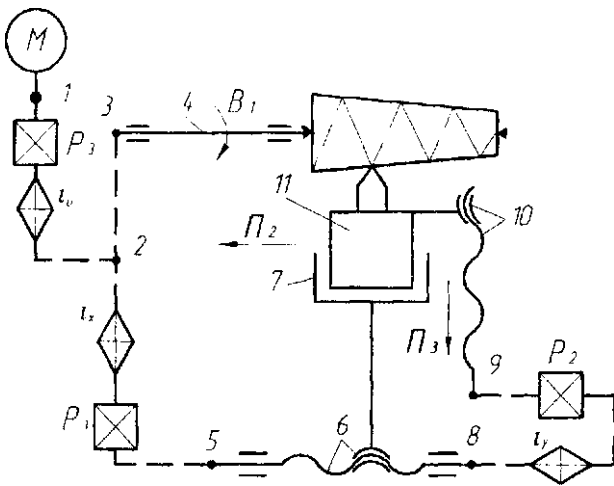


Рис. 6. Структурная схема станка для нарезания резцом конической резьбы

$V_1$  и  $П_2$ . Вторая цепь  $6 - 8 - i_v - P_2 - 9 - 10$  обеспечивает функциональную связь движений  $П_2$  и  $П_3$ , совершаемых соответственно продольным 7 и поперечным 11 суппортами для получения заданной конусности.

Внешняя связь состоит из кинематической цепи  $1 - i_x - P_3 - 2$ , соединяющей двигатель  $M$  с внутренней связью через звено 2 соединения связей.

Если же органы  $i_v$  и  $\Sigma_3$  перенести во внутреннюю связь, то неизбежно понизится ее кинематическая точность из-за увеличения числа передач. Кроме того, в этом случае усложнится и настройка станка, так как при перенастройке органа  $i_v$  для обеспечения заданного шага нарезаемой резьбы требуется перенастраивать и орган  $i_x$ . Необходимо учитывать также, что механизм, обеспечивающий реверсирование сложного движения, должен располагаться во внешней связи, так как одним механизмом обеспечивается одновременно изменение направления движения всех исполнительных органов, участвующих в сложном движении. При обеспечении же реверсирования за счет внутренней связи в ней должно находиться несколько реверсивных механизмов по числу исполнительных органов. Следовательно, для упрощения настройки и повышения кинематической точности органы настройки скорости и направления исполнительного движения в сложных кинематических группах должны находиться во внешней связи.

Рекомендации по последовательности расположения органов настройки во внешних связях сложных кинематических групп те же, что и приведенные выше для простых групп.

Размещение органов настройки во внутренней связи зависит от соотношения скоростей элементарных движений исполнительных органов, технологических и конструктивных факторов. В рассматриваемом примере движение  $\theta_v(BJI_2I-Ii)$  - сложное, с незамкнутой траекторией и поэтому должно настраиваться по пяти параметрам: на траекторию, представляющую расположенную на прямой или обратной конической поверхности левую или правую винтовую линию определенного шага; скорость; направление; исходную точку и длину пути. Для обеспечения указанной траектории во внутреннюю связь кинематической группы введены четыре органа настройки:  $i_x, P_{J1}, i_v$  и  $P_2$ , из которых  $i_x$  обеспечивает настройку шага резьбы, реверсивное устройство  $P_1$  - направление резьбы (левая или правая).  $i_v$  - конусность,  $P_2$  - вид конической поверхности (прямая или обратная). Скорость и направление движения настраиваются соответственно органами  $i_v, P_3$ , а путь и исходное положение - упорами (не показаны).

Реверсивный механизм  $P_x$  для задания направления резьбы должен быть расположен только после звена соединения связей, так как правая и левая резьбы нарезаются при одинаковом направлении вращения шпинделя. Положение органа настройки шага нарезаемой резьбы зависит от соотношения скоростей элементарных движений  $V_x$  и  $П$ , так, чтобы его передаточное отношение было понижающим. В этом случае обеспечиваются более благоприятные динамические условия работы механизмов станка. Поэтому при нарезании резьбы с нормальным шагом орган  $i_v$  следует располагать между звеном соединения связей и суппортом. При нарезании резьбы с увеличенным шагом предпочтительным является расположение органа  $i_v$  между звеном соединения связи и шпинделем.

**Размещение органов настройки в станках со сложной и комбинированной структурой.** Такие структуры характеризуются наличием во внешних и внутренних связях автономных и общих для нескольких групп участков. Например, две внутренние связи  $1 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$  и  $3 \rightarrow 6 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$  (рис. 7) параллельно соединенных кинематических групп 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. 7, а) или в общем участке (рис. 7, б). Аналогично орган настройки  $i_v$  второй кинематической группы может быть расположен или в ее автономном участке  $3 - 6$  или в общем участке.

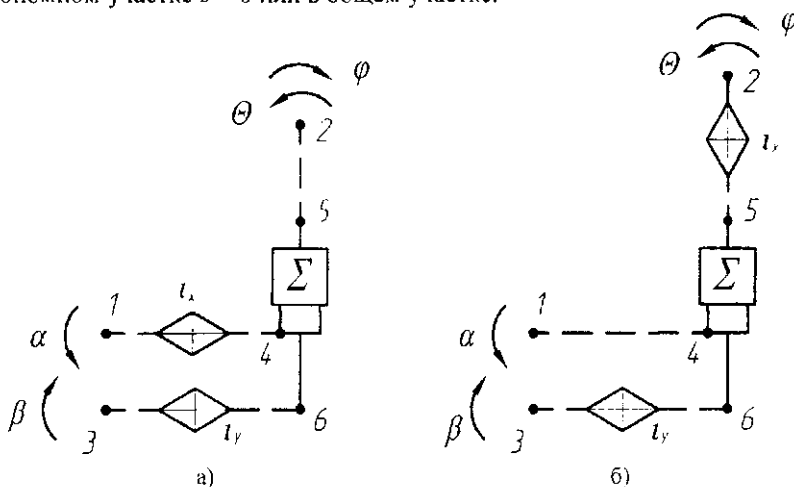


Рис. 7. Схемы соединения внутренних связей с расположением органов настройки в автономных участках (а) и в общем участке (б)



Таким образом, изменяя расположение органов настройки, можно получить множество вариантов кинематической структуры, из которых при проектировании кинематики станка необходимо выбрать рациональный, обеспечивающий наименьшую трудоемкость перенастройки станка на обработку детали с другими параметрами, а также более высокую точность формообразования поверхностей. Эти требования выполняются, если перенастройка одного органа, например не требует перенастройки другого органа.

Решим эту задачу, когда перемещения  $\theta$  и  $\varphi$  ведомого звена 2 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 изделия.

Рассмотрим 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:

$$\begin{array}{ccccccccccc} \alpha & \rightarrow & 1 & \rightarrow & i_x & \rightarrow & 4 & \rightarrow & \Sigma & \rightarrow & 5 & \rightarrow & 2 & \rightarrow & \varphi + \theta \\ & & & & & & & & & & \uparrow & & & & \\ & & & & & & & & & & \beta & \rightarrow & 3 & \rightarrow & i_y & \rightarrow & 6 \end{array}$$

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

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

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

Поэтому уравнение рассматриваемой кинематической цепи

$$\text{УКЦ: } ax = I i_{ox} i_x, \quad (8)$$

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

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

$$\text{ФН: } i_x = C_x x, \quad (9)$$

где  $C_x = a/i_{ox}$ .

Для кинематической цепи внутренней связи  $3 \rightarrow i_y \rightarrow 6 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 2$  аналогично имеем:

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

$$\text{УКЦ: } bx = I i_{oy} i_y, \quad (10)$$

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

$$\text{ФН: } i_y = C_y x, \quad (11)$$

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  $x$  (например, числа нарезаемых зубьев шестерни) 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, например по углу наклона нарезаемых винтовых зубьев. Таким образом, размещение органов настройки  $i_x$  и  $i_y$  в автономных участках в данном случае является нерациональным.

Рассмотрим варианты, когда один из органов настройки находится в общем участке 5 – 2.

Если в нем разместить орган  $i_x$ , то имеем следующую структуру внутренних связей:

$$\begin{array}{ccccccccccc} \alpha & \rightarrow & 1 & \rightarrow & 4 & \rightarrow & \Sigma & \rightarrow & 5 & \rightarrow & i_x & \rightarrow & 2 & \rightarrow & \varphi + \theta \\ & & & & & & & & & & \uparrow & & & & \\ & & & & & & & & & & \beta & \rightarrow & 3 & \rightarrow & i_y & \rightarrow & 6 \end{array}$$

В этом варианте значение  $i_x$  выражается формулой (7), а уравнение кинематической цепи, связывающей звенья 3 и 2, – зависимостью:

$$\text{УКЦ: } bx = I i_o i_x i_y, \quad (12)$$

или с учетом (9)

$$\text{УКЦ: } bx = I i_o i_y C_x x. \quad (13)$$

Тогда

$$\text{ФН: } i_y = C, \quad (14)$$

где  $C$  – числовой коэффициент.

Поскольку значение  $i$ , 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  $г$ . В случае нарезания зубчатых колес одной передачи, имеющих разное (левое и правое) направление зубьев, в органе  $д$  нужно установить паразитную шестерню, не изменяя ею передаточное отношение. Оба сопряженных колеса будут иметь одинаковый угол наклона нарезанных зубьев, что важно для обеспечения нормальных условий работы зубчатой передачи. 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  $и$ , следовательно, идентичность обработанных изделий по определенному параметру.

Таким образом, размещение органов настройки в кинематических связях при проектировании станка должно задаваться на основе анализа возможных вариантов.

Изложенные методы совершенствования кинематической структуры положены в основу кинематики признанных изобретениями станков для обработки зубчатых колес с модифицированными зубьями, винтовых и некруглых цилиндрических поверхностей [9- 12].

Заключение. Совершенствование кинематической структуры станков в направлении повышения универсальности, производительности и кинематической точности должно осуществляться с учетом обеспечения рациональных условий формообразования и резания. Это достигается путем оптимизации структуры внешних и внутренних связей кинематических групп, рационального расположения в них органов настройки, обоснования выбора положения звена соединения внешней и внутренней связей, введения нескольких таких звеньев, совмещения внешней и внутренней связей в сочетании с применением современных систем управления и приводов координатных перемещений. Предложенные решения носят универсальный характер и могут быть использованы при синтезе кинематической структуры различных по технологическому назначению металлорежущих станков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. - М: Машиностроение, 1970.-403 с.
2. Голембиевский А.И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / Под ред. В.А. Петрова. - Мн: Наука и техника, 1986. - 168 с.
3. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. - Мнл Наука и техника, 1995. -264 с.
4. Ванин В.А., Лучкин В.К. Построение формообразующих кинематических цепей металлорежущих станков на основе гидравлических связей //СТИН. - 2005. - № 2. - С. 13 - 17.
5. Данилов В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием //Мир технологий. - 2003. - № 1. С. 61-71.
6. Зубодолбежный станок для обработки некруглых колес: А,с. 921726 СССР, МКИ В23F I 5/02 / В.А. Данилов // Бюл. Открытия. Изобретения. 1982. - № 15.
7. Станок для обработки резьб и шлицев переменного шага: А.с. 992143 СССР, МКИ В23G 3/10 / В.А. Данилов // Бюл. Открытия, Изобретения, - 1983. - № 4.
8. Данилов В.А. Синтез и оптимизация кинематической структуры станков с использованием типовых модулей//СТИН. 1999. №7.-С. 9 - 15.
9. Данилов В.А. Усовершенствованные станки для нарезания колес с бочкообразными зубьями // Машиностроитель. - 1990. - № 5. - С. 14-15.
10. Данилов В.А. Токарная обработка некруглых поверхностей // Машиностроитель. - 1991. - № 8. - С. 13 - 14.
11. Данилов В.А. Станки для обработки профильных поверхностей, передающих момент // Техника машиностроения. - 1998. - № 4. - С. 102 - 105.
12. Данилов В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием // Инженер-механик. - 2003, - № 3 (20). - С. 26 - 31.