

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Технологическое оборудование»

В. А. Данилов  
А. А. Данилов

# СИНТЕЗ СХЕМ ОБРАБОТКИ И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Пособие

к практическим занятиям для студентов специальностей  
1-36 01 01 «Технология машиностроения»  
и 1-36 01 03 «Технология и оборудование  
машиностроительного производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области машиностроительного оборудования и технологий*

Минск  
БНТУ  
2020

УДК 621.9.06.62-231.3(075.8)

ББК 34.63-5я73

Д18

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра технологии и оборудования машиностроительного производства УО «Полоцкий государственный университет», заведующий кафедрой д-р техн. наук, профессор *Н. Н. Попок*;  
заместитель академика-секретаря отделения физико-технических наук НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор *М. Л. Хейфец*

**Данилов, В. А.**  
Д18

Синтез схем обработки и кинематической структуры металлорежущих станков : пособие к практическим занятиям для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения» и 1-36 01 03 «Технология и оборудование машиностроительного производства» / В. А. Данилов, А. А. Данилов. – Минск: БНТУ, 2020. – 50 с.  
ISBN 978-985-583-116-8.

В пособии рассмотрены общие принципы и методики синтеза рациональных схем обработки поверхностей и кинематической структуры металлорежущих станков. Приведены индивидуальные задания и примеры их выполнения.

Пособие предназначено студентам машиностроительных специальностей для выполнения практических занятий по дисциплинам «Конструирование и расчет станков» и «Конструирование и расчет технологического оборудования». Оно может быть полезно при курсовом и дипломном проектировании станочного оборудования.

**УДК 621.9.06.62-231.3(075.8)**  
**ББК 34.63-5я73**

**ISBN 978-985-583-116-8**

© Данилов В. А., Данилов А. А., 2020  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Ответственным этапом схемотехнического проектирования станка является разработка или выбор рациональных кинематических схем обработки заданных поверхностей и его кинематической структуры [1–3]. Под кинематической схемой обработки понимается совокупность исполнительных движений, сообщаемых инструменту и заготовке при определенном их относительном расположении в цикле обработки заданной поверхности. Принятая кинематическая схема обработки должна обеспечить требуемую производительность и точность формообразования поверхности, а также благоприятные условия работы режущего инструмента и исполнительных механизмов станка, например, за счет стабилизации скорости и сил резания, рабочих углов режущих лезвий, уменьшения инерционных нагрузок путем исключения реверсивных движений и т. д. [4].

Разрабатываемая на основе принятой схемы обработки кинематическая структура станка является основой его кинематики, обеспечивает реализацию необходимых функциональных связей в его обрабатывающей системе, определяющих производительность, точность, универсальность и другие технико-экономические показатели станка [5].

Ошибки, допущенные при синтезе кинематической схемы обработки и кинематической структуры станка, не могут быть компенсированы на последующих этапах его проектирования, что обуславливает значимость и важность поиска рациональных решений рассматриваемых задач. Освоение соответствующих методик важно для практической подготовки по проектированию металлорежущих станков.

# 1. СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

## 1.1. Содержание индивидуального задания

Разработать кинематическую схему обработки заданной поверхности определенным режущим инструментом.

Составить отчет о выполнении задания.

Варианты индивидуальных заданий приведены в п. 1.4.

## 1.2. Методические указания по выполнению задания

Синтез кинематической схемы обработки включает следующие основные этапы [3]:

- задать в соответствии с аналогичными схемами обработки относительное расположение заготовки и режущего инструмента;
- на основе анализа геометрии формируемой поверхности выбрать ее производящие линии (образующую и направляющую);
- задать метод формообразования каждой производящей линии и поверхности в целом как сочетание методов образования ее производящих линий – образующей и направляющей;
- определить необходимые для обработки поверхности исполнительные движения (формообразования, установочные, деления, вспомогательные и др.);
- задать структуру исполнительных движений, т. е. количество и тип элементарных движений, образующих каждое исполнительное движение;
- установить настраиваемые параметры исполнительных движений (скорость, направление, траектория и др.);
- задать распределение элементарных движений между инструментом и заготовкой;
- изобразить кинематическую схему обработки.

### *1.2.1. Выбор производящих линий поверхности*

С кинематической точки зрения, формирование поверхности сводится к образованию ее производящих линий (образующей и направляющей) и их относительному перемещению [3]. За образу-

ющую и направляющую поверхности могут быть приняты разные принадлежащие ей линии. Например, для формообразования плоскости в качестве образующей  $1$  (рис. 1.1), в зависимости от применяемого метода обработки, может быть принята прямая линия (рис. 1.1,  $a$ ), дуга окружности (рис. 1.1,  $б$ ) или принадлежащая плоскости любая линия, которую перемещают вдоль направляющей  $2$ . Первая схема соответствует, например, строганию плоскости широким резцом, а вторая – фрезерованию торцовой фрезой.

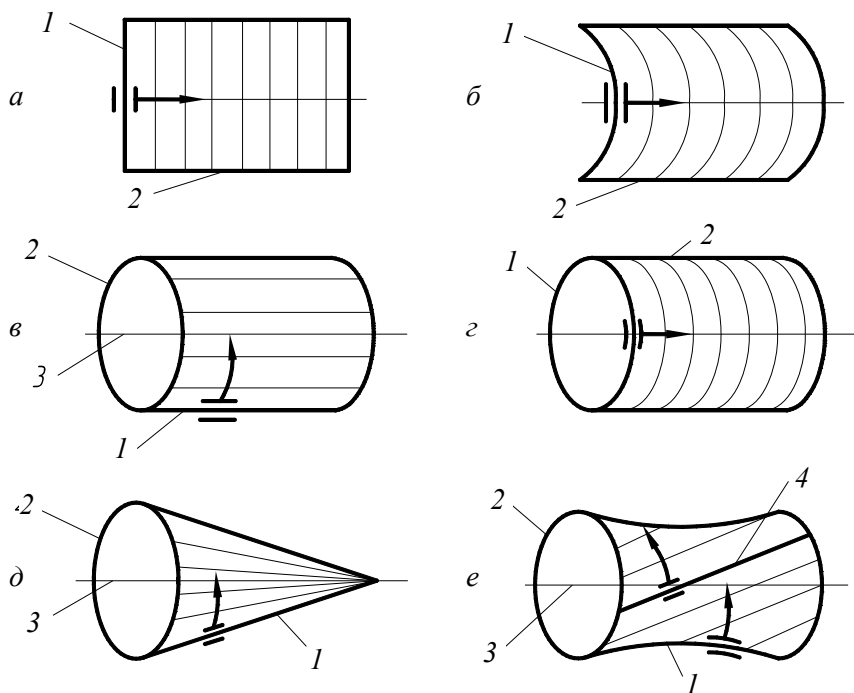


Рис. 1.1. Производящие линии в схемах образования поверхностей:  
 $a, б$  – плоскости;  $в, г$  – цилиндрической поверхности;  
 $д$  – конической поверхности;  $е$  – однополостного гиперболоида

Прямая  $1$  при перемещении по окружности  $2$  (рис. 1.1,  $в$ ), т. е. при вращении вокруг оси  $3$ , образует цилиндрическую поверхность, что имеет место при ее точении широким резцом. Цилиндрическую поверхность можно получить также перемещением окружности  $1$

вдоль прямой 2 (рис. 1.1, *з*), что реализуется при протягивании отверстия. Для формообразования конической поверхности (рис. 1.1, *д*), закрепленную в ее вершине прямолинейную образующую 1 необходимо перемещать по окружности 2 (вращать вокруг оси 3).

Для упрощения схемы обработки и повышения точности формообразования поверхности важно выбрать из множества возможных производящих линий линии простой геометрической формы. Эта задача решается путем анализа геометрии поверхности. Например, поверхность однополостного гиперболоида может быть получена путем перемещения гиперболы 1 (рис. 1.1, *е*) вдоль окружности 2 (вращения вокруг оси 3). Однако эта же поверхность образуется при вращении вокруг оси 3 скрещивающейся с ней под определенным углом прямой 4. Вторая схема проще в реализации и обеспечивает более высокую точность формообразования однополостного гиперболоида.

Таким образом, обоснованный выбор формы производящих линий важен для определения рациональной схемы обработки заданной поверхности.

### ***1.2.2. Характеристика методов формообразования производимых линий и поверхностей***

Метод формообразования поверхности определяется возможным сочетанием методов формирования ее производящих линий [3].

***Методы образования производящих линий.*** При обработке поверхности на станке ее производящие линии должны быть воспроизведены движениями инструмента и заготовки, и контактирующими с этой поверхностью формообразующими (производящими) элементами инструмента, которые могут представлять собой линии (режущие кромки) или точки (вершины режущих лезвий). В первом случае производящие линии образуются методами копирования (Кп) или обката (Об), во втором – следа (Сл) или касания (Кс) [3, 5].

При *методе копирования* производящий элемент 1 (рис. 1.2, *а*) инструмента по форме и протяженности идентичен образуемой линией 2, поэтому движение формообразования в данном случае не требуется. Метод копирования широко применяется для профилирования внутренних и наружных поверхностей простой и сложной геометрической формы лезвийными и абразивными инструментами (протягивание, точение фасонными резцами, фрезерование и т. д.).

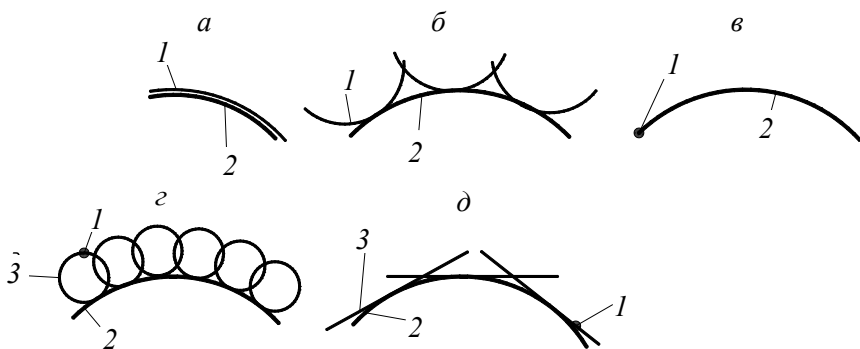


Рис. 1.2. Методы образования производящих линий:  
*а* – копирования; *б* – обката; *в* – следа; *г*, *д* – касания

*Методом обката* (огибания) линия 2 (рис. 1.2, б) образуется как огибающая множества последовательных положений производящего элемента *1* в его относительном движении, поэтому необходимо одно сложное движение формообразования. Материальным носителем формы образуемой линии являются одновременно инструмент и кинематика станка, создающая движение обкатки. Последнее может быть непрерывным или прерывистым. Данный метод широко применяется при обработке сложных поверхностей, например, для профилирования нарезаемых зубьев зубчатых колес.

При *методе следа* (рис. 1.2, в) образуемая линия 2 представляет собой траекторию движения производящего элемента в виде точки *1*, например, вершины токарного резца, следовательно, необходимо одно движение формообразования.

По *методу касания* (рис. 1.2, г) линия 2 образуется как касательная к множеству дополнительных линий 3 – траекторий производящей точки *1*. Данный метод требует два движения формообразования: одно – для создания дополнительных линий, а другое – для их относительного перемещения. Метод касания характерен для обработки вращающимися инструментами (фрезами, шлифовальными кругами). В этом случае дополнительные линии являются окружностями. Реже они имеют прямолинейную (рис. 1.2, д) или иную форму.

Рассмотренные методы образования производящих линий относятся к элементарным (базовым). Возможны также комбинированные методы, представляющие сочетание элементарных, например,

(Кп + Сл), (Об + Сл) и др. [4], которые позволяют объединить преимущества входящих в них элементарных методов.

**Методы образования поверхностей.** Образующая и направляющая заданной поверхности могут быть получены любым элементарным или комбинированным методом. Поэтому методы образования поверхностей определяются возможными сочетаниями методов образования производящих линий. Так как скорость возникновения образующей не может быть меньше, чем направляющей, возможны следующие методы формообразования поверхностей, основанные на элементарных методах образования производящих линий: Кп – Кп, Кп – Сл, Кп – Об, Кп – Кс, Об – Об, Об – Сл, Сл – Об, Сл – Сл, Сл – Кс, Кс – Об, Кс – Сл, Кс – Кс [3]. Выбор того или иного метода зависит от геометрии формируемой поверхности, требований к универсальности схемы обработки, к точности и производительности формообразования и других факторов.

Каждый метод формообразования производящих линий и поверхности в целом характеризуется определенной совокупностью исполнительных движений, от которой зависят сложность схемы обработки и кинематики станка.

### ***1.2.3. Определение необходимых исполнительных движений***

**Типы исполнительных движений.** К исполнительным относятся движения формообразования (Ф), деления (Д), ориентирующие (Ор), установочные (Уст) и вспомогательные (Всп) [3–5].

**Движение формообразования** – это относительное перемещение инструмента и заготовки, в результате которого на ней в процессе обработки на ней образуется заданная поверхность. Движениями формообразования являются, например, вращение заготовки и перемещение резца при точении, перемещение резца по винтовой линии при нарезании резьбы на токарно-винторезном станке.

Если для обработки поверхности требуется одно движение формообразования, то оно осуществляется со скоростью резания и обозначается  $\Phi_v$ . При двух и большем количестве движений формообразования одно из них будет движением резания  $\Phi_v$ , а остальные – движениями подачи –  $\Phi_{s1}$ ,  $\Phi_{s2}$  и т. д.

**Движение деления** – это движение для перемещения траектории движения формообразования в новое геометрическое положение



для образования на заготовке нескольких одинаковых по форме поверхностей. Наличие у детали таких поверхностей определяет необходимость введения движения деления в разрабатываемую схему обработки. Движением деления является, например, периодический поворот  $B$  заготовки  $I$  на угол  $\beta$  (рис. 1.3,  $a$ ) для обработки на ней инструментом  $2$  расположенных по окружности пазов.

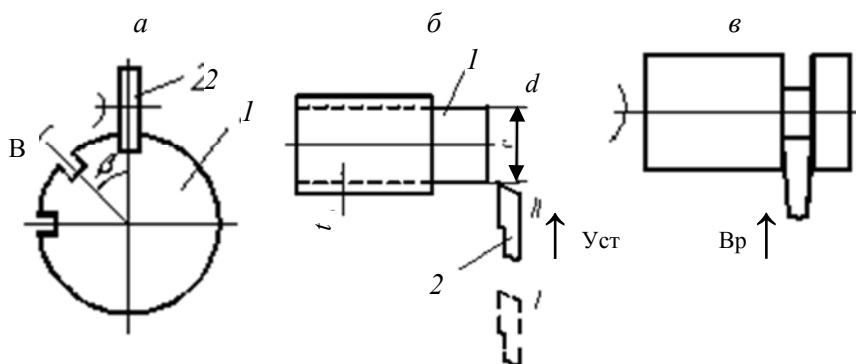


Рис. 1.3. Схемы выполнения движений на станках:  
 $a$  – движения деления ( $D$ );  $b$  – установочного движения ( $U_{ст}$ );  
 $v$  – движения врезания ( $V_r$ )

Делительное движение может быть также непрерывным. В этом случае оно совмещается с формообразующим движением, что характерно для обработки зубчатых колес режущими инструментами обкатного типа (долбяками, червячными фрезами и др.).

Функция деления может выполняться также за счет конструкции инструмента, что позволяет упростить кинематическую схему обработки и повысить производительность станка.

*Установочным* называется движение, приводящие инструмент  $2$  относительно заготовки  $I$  в определенное положение, обеспечивающее, например, возможность снятия слоя материала глубиной  $t$  и получения заданного размера  $d$  обработанной поверхности (рис. 1.3,  $b$ ). Таким движением является перемещение резца  $2$  из позиции I в позицию II. Установочное движение, при котором происходит резание, называется *движением врезания* ( $V_r$ ) (рис. 1.3,  $v$ ). При отсутствии процесса резания установочное движение является *наладочным*.

*Ориентирующим* (Ор) называется движение, которое обеспечивает постоянную ориентацию инструмента относительно криволинейной обработанной поверхности, например, для стабилизации его рабочих углов. Наличие ориентирующего движения улучшает условия резания и расширяет технологические возможности схемы обработки, поэтому учет данного обстоятельства представляет один из путей синтеза рациональных схем обработки сложных поверхностей [4]. Рассмотрим использование этого пути при обработке винтовых канавок переменного шага.

Например, при обработке на цилиндрической детали 1 (рис. 1.4) винтовой канавки переменного шага неподвижным относительно суппорта резцом 2 имеет место изменение его кинематических переднего и заднего углов, равное изменению угла наклона винтовой линии 3, что значительно ограничивает допустимый диапазон изменения шага формируемой винтовой поверхности. Эти недостатки устраняются при сообщении резцу 2 вращения  $B_3$ , функционально связанного с его перемещением  $\Pi_2$  и вращением  $B_1$  изделия 1 для обеспечения неизменной ориентации режущей части относительно обрабатываемой поверхности.

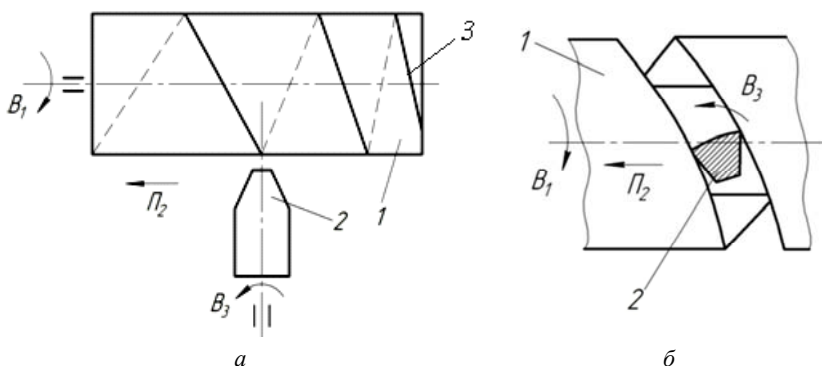


Рис. 1.4. Схема формообразования винтовых канавок переменного шага: а – схема обработки; б – ориентация инструмента относительно формируемой поверхности

*Вспомогательные* движения (Всп) служат для возвращения инструмента и заготовки в исходное положение, для поворота револьверной головки при смене инструмента и выполнения других функций в соответствии с циклом обработки заготовки на станке.

Необходимость в тех или иных исполнительных движениях определяется на основе анализа конструкции изготавливаемой детали, относительного расположения обработанных поверхностей и их геометрии.

Обязательными в схемах механической обработки являются движения формообразования. Необходимость в делительном и ориентирующем движении определяется конструкцией детали и геометрией обработанной поверхности (наличие у детали нескольких одинаковых поверхностей, переменная кривизна производящих линий поверхности), а также зависит от метода формообразования.

Например, при формировании методом следа линии переменной кривизны для стабилизации рабочих углов инструмента (резца) необходимо ориентирующее движение. Если же эта линия формируется методом касания вращающимся инструментом (фрезой), такое движение не требуется.

#### ***1.2.4. Задание и оптимизация структуры исполнительных движений***

Любое исполнительное движение на станке создается элементарными движениями, к которым относятся вращательное (В), поступательное (П), осциллирующее (О), качательное (К) [3, 4]. По структуре исполнительное движение может быть простым, если образовано одним элементарным движением, или сложным (образовано двумя или более элементарными движениями). Поэтому простыми исполнительными движениями являются, например, движения:  $\Phi_v(V_1)$ ;  $\Phi_s(P_2)$ ;  $D(V_3)$ ;  $V_p(P_4)$ , а сложными –  $\Phi_v(V_1V_2)$ ;  $\Phi_s(V_3P_4)$ ;  $D(V_3P_6)$ ;  $\Phi_v(V_1V_2P_3)$ .

Элементарные движения, образующие сложное исполнительное движение, должны быть одновременны, а их скорости – функционально взаимосвязаны. Например, при точении на станке с ЧПУ поверхности с переменным по длине детали диаметром необходимо сложное движение подачи  $\Phi_s(P_2P_3)$ , образованное перемещениями  $P_2$  и  $P_3$  продольного и поперечного суппортов с подачами  $S_1$  и  $S_2$ , соответственно, которые должны быть взаимосвязаны определенной зависимостью. Так, при обработке конической поверхности с углом  $\alpha$  наклона образующей, соотношение между значениями  $S_1$  и  $S_2$  выражается зависимостью  $S_2 / S_1 = \operatorname{tg}\alpha$ , которая должна обеспечиваться системой управления.

Структура движения зависит от формы создаваемой линии (плоская или пространственная) и метода ее формообразования. Для упрощения

структуры исполнительных движений производящие линии целесообразно принимать плоскими или расположенными на поверхностях вращения с учетом типа координатной системы станка. Для типовых методов формообразования производящих линий могут быть установлены соответствующие структуры исполнительных движений.

Методом следа плоская линия может быть образована одним или несколькими элементарными движениями. Например, для формирования окружности геометрическим методом требуется простое исполнительное движение  $\Phi(V)$ . Кинематически та же окружность может быть образована разными по структуре исполнительными движениями, например,  $\Phi_v(V_1O_2)$ ,  $\Phi_v(V_1B_2)$ ,  $\Phi_s(O_1O_2)$  и т. п. При дополнительных требованиях (повышение точности формообразования, стабилизация рабочих углов инструмента) в кинематическую схему обработки вводится соответствующее движение, например, ориентирующее.

Кинематика формообразования производящих линий методом касания отличается от рассмотренных выше независимым движением резания  $\Phi_v$  (обычно вращательным) для образования дополнительных траекторий производящих элементов инструмента, формирующих заданную производящую линию.

Кинематика формообразования производящих линий методом обката обусловлена относительным перемещением аксоидов [6]. В зависимости от формы аксоидов их относительное перемещение создается определенной комбинацией взаимосвязанных элементарных движений:  $(V_1P_2)$  – для цилиндрического и плоского аксоидов;  $(V_1B_2)$  – для цилиндрических, конических и гиперболических аксоидов вращения;  $(V_1B_2P_3)$  – если один из аксоидов имеет некруглую форму.

**Оптимизация структуры исполнительных движений.** При синтезе кинематики формообразования следует учитывать, что одна и та же линия может быть образована различными сочетаниями элементарных движений. Например, спираль Архимеда, как любая плоская линия, может быть образована при сообщении производящей точке двух согласованных реверсивных прямолинейных перемещений, т. е. движением  $\Phi(O_1O_2)$ , которое реализуется на фрезерных станках с ЧПУ при сообщении продольному и поперечному столам, согласованных управляющей программой перемещений.

Та же линия образуется при сообщении точке вращения вокруг некоторой оси и связанного с ним поступательного перемещения в плоскости вращения, т. е. движением  $\Phi(V_1P_2)$ , которое осуществляется,

например, на универсальных токарно-винторезных станках при обработке спиральных канавок на торцах деталей. Данные схемы формообразования неравнозначны по сложности их реализации на станке и влиянию на динамику работы его исполнительных механизмов. В этой связи выбор из множества возможных рационального сочетания элементарных движений имеет существенное значение и представляет один из путей оптимизации структуры исполнительных движений [4].

В общем случае предпочтительны комбинации нереверсивных движений, обеспечивающих по сравнению с реверсивными движениями более высокую производительность и точность обработки за счет исключения влияния переменных по направлению инерционных нагрузок на эти показатели. Поэтому исключение реверсивных движений представляет один из путей оптимизации кинематики формообразования и схем обработки.

*Методы исключения реверсивных движений.* Реверсивные движения могут быть исключены геометрическими и кинематическими методами [4]. Геометрически это возможно путем выбора системы координатных перемещений исполнительных органов и соответствующей компоновки станка.

Кинематически реверсивное поступательное движение может быть исключено заменой его вращательным движением. Рассмотрим этот метод на примере токарной обработки некруглых поверхностей (рис. 1.5).

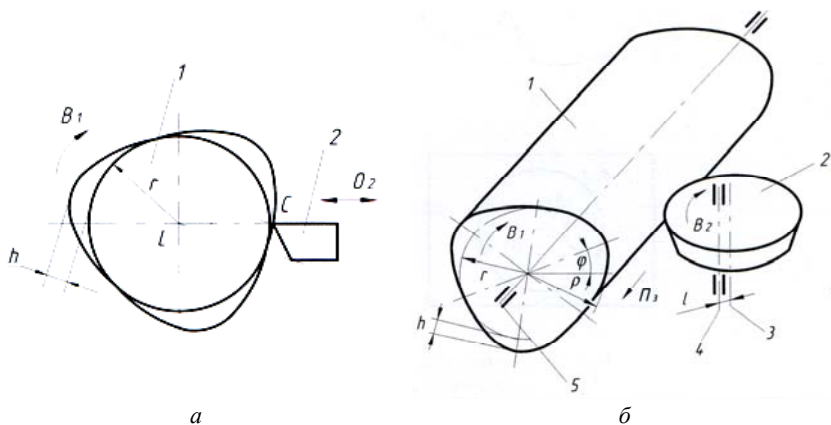


Рис. 1.5. Схемы формирования некруглой поверхности:

*а* – проходным резцом; *б* – ротационным эксцентрично установленным резцом

По классической схеме формообразование такой поверхности осуществляется сложным движением профилирования  $\Phi_v(B_1O_2)$  и простым движением подачи  $\Phi_s(\Pi_3)$ . В процессе обработки заготовка  $l$  (рис. 1.5, *a*) совершает вращение  $B_1$ , а резец 2 – согласованное с ним возвратно-поступательное движение  $O_2$  и подачу  $\Pi_3$  (на рисунке не показана). Частота возвратно-поступательного движения резца задается в  $m$  раз больше частоты вращения заготовки, где  $m$  – количество выступов профиля обработанной поверхности. В полярной системе координат профиль описывается уравнением

$$\rho = r + l(1 - \cos m\varphi), \quad (1.1)$$

где  $r$  – радиус вписанной в профиль окружности;  $l = 0,5 h$ ;

$h$  – высота выступов профиля;

$\varphi$  – угол поворота заготовки.

Из-за возвратно-поступательного движения резца способ имеет низкую производительность.

Поверхность  $l$  с таким же профилем образуется круглым резцом 2 (рис. 1.5, *b*), геометрическая ось 3 которого установлена с эксцентриситетом  $l$  относительно оси 4 его вращения [4]. Частота вращения  $B_2$  резца задается в  $m$  раз больше частоты вращения  $B_1$  заготовки. Формообразование поверхности в данном случае осуществляется движениями  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3)$ . В их структуре отсутствуют реверсивные элементарные движения, благодаря чему устраняются факторы, ограничивающие производительность обработки в первом случае.

Аналогично, без реверсивного элементарного движения может быть построена кинематика профилирования некруглой поверхности методом касания (рис. 1.6).

При наличии реверсивного движения инструмента 2 (рис. 1.6, *a*), профиль изделия  $l$  формируется сложным движением подачи (профилирования)  $\Phi_s(B_2O_3)$  и простым движением резания  $\Phi_v(B_1)$ . При замене элементарного движения  $O_3$  вращательным  $B_3$  (рис. 1.6, *b*), движение профилирования  $\Phi_s(B_2B_3)$  образуется согласованными вращениями  $B_2$  и  $B_3$ , последнее из которых сообщается инструменту 2 вокруг оси, параллельной его геометрической оси. Для образования профиля многогранной поверхности отношение частот вращательных движений  $B_2$  и  $B_3$  должно быть равно числу граней поверхности. В этом случае вращение  $B_2$  заготовки является также делительным движением.

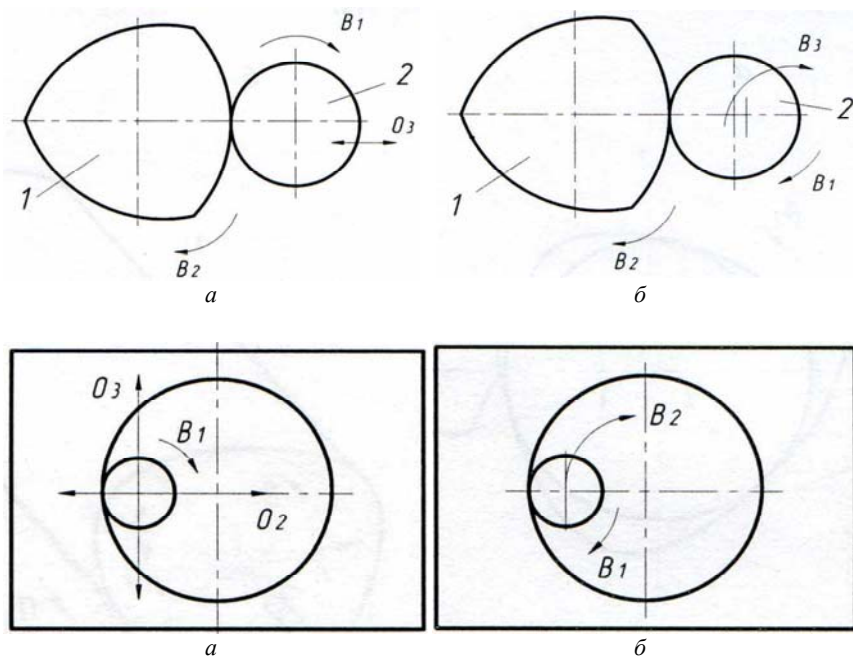


Рис. 1.6. Схемы профилирования при замене одного (а) и двух (б) реверсивных движений одним вращательным (б, з)

В некоторых случаях одним вращательным движением можно заменить два возвратно-поступательных движения. Например, образование окружности методом касания возможно по схемам  $[\Phi_v(B_1), \Phi_s(O_2O_3)]$  (рис. 1.6, б) или  $[\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2)]$  (рис. 1.6, з). Первая схема характерна для копировально-фрезерных станков и станков с ЧПУ, вторая – применяется в шлифовальных станках с планетарным движением шпинделя для обработки цилиндрических отверстий в неподвижных деталях. Движение  $B_2$  во второй схеме выполняет ту же функцию, что два движения  $O_2$  и  $O_3$  в первой схеме.

Замена сложного исполнительного движения  $\Phi_s(O_2O_3)$  простым  $\Phi_s(B_2)$  упрощает кинематическую схему обработки и повышает точность профилирования. Однако первая схема является более универсальной, так как движением  $\Phi_s(O_2O_3)$  могут быть образованы различные плоские линии, тогда как движением  $\Phi_s(B_2)$  – только окружность. Поэтому при выборе структуры исполнительного дви-

жения должны учитываться как конструктивные, так и технологические факторы, в частности требования к универсальности станка.

Эффективными методами оптимизации кинематических схем обработки являются совмещение или разделение движений. *Совмещение* исполнительных движений позволяет уменьшить их количество и упростить кинематическую схему обработки [4]. Совмещены могут быть движения одинакового или разного функционального назначения – формообразования, деления и др. На этом принципе основаны схемы зубообработки с образованием профиля зубьев методом обката, характерным для которых является совмещение сложного движения профилирования зубьев с простым движением деления и обеспечение тем самым непрерывности процесса зубонарезания.

Принципиальное значение при синтезе кинематики формообразования имеет совмещение или разделение движений профилирования и резания, так как от этого существенно зависят сложность кинематической и инструментальной подсистем обрабатывающей системы станка, а также технико-экономические показатели способа обработки.

Следует отметить, что при независимых движениях профилирования и резания возможно управление шероховатостью обработанной поверхности. Например, нарезание узких цилиндрических колес методом обката гребенчатой фрезой  $I$  (рис. 1.7, *a*), когда заготовке  $2$  сообщается вращение  $B_2$ , согласованное с её относительным перемещением  $\Pi_3$  вдоль оси вращения фрезы, осуществляется разделенными движениями  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$ . Скорость каждого из этих движений может регулироваться независимо, что позволяет управлять высотой огранки обработанной поверхности.

Рассмотренная схема обработки упрощается при совмещении исполнительных движений  $\Phi_v$  и  $\Phi_s$ , что достигается благодаря перенесению функции кинематики формообразования на режущий инструмент. Поэтому для нарезания тех же колес червячной фрезой (рис. 1.7, *б*) требуется одно исполнительное движение  $\Phi_{vs}(B_1B_2)$ . В данном случае движение  $\Pi_3$  обеспечивается конструкцией инструмента (расположением режущих зубьев по винтовой линии), а движения  $B_1$  и  $B_2$  совмещены. В результате конструкция станка упрощается, а инструмента – усложняется, и исключается возможность кинематическим методом управлять высотой огранки обработанных поверхностей зубьев.



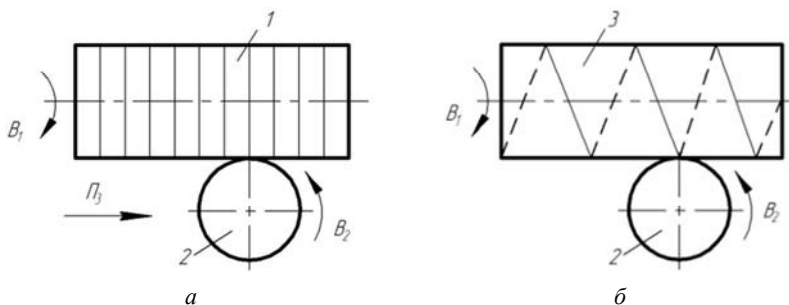


Рис. 1.7. Схемы нарезания зубчатого колеса при разделенных (а) и совмещенных (б) движениях профилирования и резания

В обоих случаях одновременно с профилированием непрерывно выполняется процесс деления, который осуществляется за счет вращения  $B_2$  заготовки. Таким образом, движение деления  $D(B_2)$  совмещено с движением  $\Phi(B_1B_2)$ . Совмещение исполнительных движений особенно эффективно, если оно не связано с усложнением конструкции инструмента. Рассмотренные методы оптимизации структуры исполнительных движений и кинематических схем обработки рекомендует-ся использовать при выполнении индивидуального задания.

### **1.2.5. Определение настраиваемых параметров исполнительных движений**

Каждое исполнительное движение характеризуется соответствующими параметрами [3], которые должны быть установлены при разработке кинематической схемы обработки и обеспечиваться при проектировании станка за счет введения соответствующих органов настройки. Пространственными параметрами движения являются:

- траектория ( $T$ ) – форма пути, по которому движется фиксированная точка;
- исходное положение ( $O$ ), соответствующее началу движения по траектории;
- путь ( $L$ ) – протяженность траектории между начальной и конечной точками;
- скорость ( $V$ ) перемещения точки по траектории;
- направление движения в положительном (+) или отрицательном (–) направлении;

– относительное геометрическое положение траектории рассматриваемого движения;

– абсолютное геометрическое положение траектории.

Параметры ( $T, O, L, V, \pm$ ) характеризуют само движение, остальные – положение траектории данного движения в пространстве.

Во времени движение оценивается двумя параметрами:

– моментом начала движения, характеризующим положение данного движения в общем цикле или последовательности движений;

– характером движения в смысле непрерывности.

Траектория исполнительного движения зависит от числа и параметров образующих его элементарных движений: формы траекторий и их исходных геометрических положений; законов изменения скоростей; сочетания направлений и др. Изменение хотя бы одного из элементарных движений приводит к иной траектории сложного исполнительного движения.

Из указанных два последних пространственных параметра обычно обеспечиваются конструктивно – компоновкой станка, а остальные параметры – соответствующими органами настройки, которые должны быть предусмотрены при проектировании кинематики станка. Исполнительное движение настраивается максимум по пяти параметрам – траектории, пути, скорости, направлению и исходному положению. Количество настраиваемых параметров в общем случае зависит от характера движения (табл. 1.1) [3].

Таблица 1.1

### Настраиваемые параметры в зависимости от характера движения

Движение	Траектория движения			
	замкнутая		незамкнутая	
	Настраиваемые параметры движения			
	количество	наименование	количество	наименование
Простое	2	скорость направление	4	исходное положение путь скорость направление
Сложное	3	траектория скорость направление	5	траектория исходное положение путь скорость направление

При выполнении индивидуального задания для каждого исполнительного движения следует установить настраиваемые параметры, что необходимо для введения в кинематическую структуру станка соответствующих органов настройки параметров движений.

### ***1.2.6. Распределение элементарных движений между заготовкой и инструментом***

Кинематика формообразования может быть реализована множеством кинематических схем обработки, каждая из которых при одинаковых исполнительных движениях отличается распределением составляющих их элементарных движений между инструментом и заготовкой. Например, формообразование цилиндрической поверхности методом двойного следа в зависимости от распределения исполнительных движений  $\Phi_s(B_1)$  и  $\Phi_s(P_2)$  между резцом и заготовкой возможно четырьмя кинематическими схемами обработки:

– оба движения сообщаются заготовке (обработка на автоматах продольного течения);

– движение  $B_1$  сообщается заготовке,  $P_2$  – резцу (обработка на универсальных токарных станках);

– движение  $B_1$  сообщается резцу,  $P_2$  – заготовке (обработка на бесцентровых токарных станках);

– оба движения сообщаются резцу (обработка на специальных станках шеек коленчатых валов и других деталей).

Каждая из данных схем имеет область эффективного применения. От распределения движений зависят компоновка, универсальность, жесткость и другие характеристики станка. Поэтому кинематическая схема обработки должна приниматься на основе анализа возможных вариантов распределения элементарных движений между исполнительными органами станка с учетом технологических и конструктивных факторов.

В большинстве случаев предпочтительно сообщать движения одновременно инструменту и заготовке, чем, например, одному из них сложного движения (планетарного), так как кроме упрощения конструкции улучшаются динамические условия работы оборудования и расширяются его технологические возможности. Учитывая это, иногда целесообразно простое или одно из элементарных движений разлагать на два, которые сообщаются инструменту и заготовке навстречу друг другу.

В данном случае хотя и усложняется кинематика оборудования, однако существенно уменьшаются значения абсолютных скоростей исполнительных органов. Например, разложение простого вращательного движения  $\Phi(B)$  на два, сообщаемых одно сверлу, а второе – заготовке, в противоположных направлениях, позволяет при той же скорости резания в 2 раза уменьшить значения частот вращения исполнительных органов станка. Этот прием применяется, например, в многошпиндельных токарных автоматах.

При разработке и оптимизации кинематической схемы обработки сложной поверхности требуется также установить соотношение скоростей элементарных движений для стабилизации скорости исполнительного движения и, следовательно, точности и производительности формообразования. Важно также проанализировать изменение рабочих углов инструмента из-за переменной кривизны производящих линий и возможность их стабилизации за счет введения дополнительных ориентирующих движений [4].

### ***1.2.7. Графическое изображение и описание кинематической схемы обработки***

Графическое изображение кинематической схемы обработки должно отражать взаимное расположение инструмента и заготовки и сообщаемые им движения. В качестве примера на рис. 1.8 показана кинематическая схема фрезерования некруглого вала  $1$  эксцентрично установленной цилиндрической фрезой  $3$  [4].

В процессе обработки заготовке  $1$  сообщается вращение  $B_1$  вокруг ее оси  $2$ , а инструменту  $3$  – согласованное с ним вращение  $B_2$  вокруг оси  $5$ , параллельной его геометрической оси  $4$ , с частотой, в  $m$  раз большей частоты вращения заготовки, где  $m$  – число граней (выступов) у обработанной поверхности.

Формируемая некруглая поверхность профилируется методом прерывистого обката, а по длине образуется методом касания.

Согласованные вращательные движения инструмента  $B_1$  и заготовки  $B_2$ , образуют сложное движение профилирования  $\Phi_v(B_1B_2)$  с незамкнутой траекторией, которое должно настраиваться на траекторию, скорость и направление. Формирование некруглой цилиндрической поверхности по длине обеспечивается прямолинейным движением подачи  $\Phi_s(P_3)$ , которое должно настраиваться на скорость, направление, исходную точку и длину пути.

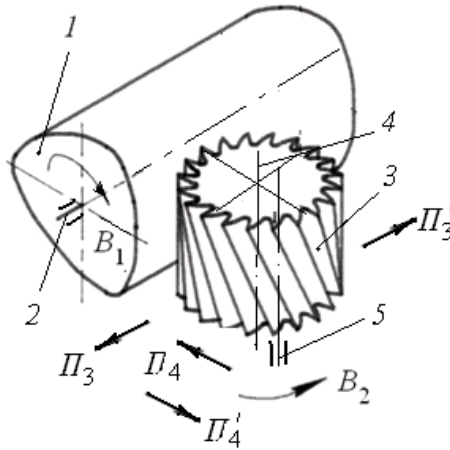


Рис. 1.8. Кинематическая схема обработки некруглого вала эксцентрично установленной цилиндрической фрезой

Для обеспечения цикла обработки поверхности кроме указанных движений формообразования на станке должны выполняться также:

- относительное перемещение инструмента и заготовки в радиальном направлении – установочное движение Уст( $\Pi_4$ ) и вспомогательное движение Всп<sub>1</sub>( $\Pi'_4$ ) – перемещение в обратном направлении в исходное положение;

- вспомогательное перемещение Всп<sub>2</sub>( $\Pi'_3$ ) вдоль оси заготовки, противоположное движению  $\Phi_s(\Pi_3)$ , для перемещения инструмента в исходное положение.

### 1.3. Пример выполнения индивидуального задания

В качестве примера составим кинематическую схему нарезания многозаходной резьбы на вале дисковой фрезой. Задача решается в последовательности, изложенной в п. 1.2.

*Относительное расположение заготовки 1 и инструмента 2 (дисковой фрезы) (рис. 1.9) примем характерным для резьбофрезерных станков: в процессе обработки вращательные движения инструмента и заготовки должны осуществляться вокруг осей, скрещивающихся под углом  $\eta$  (рис. 1.9, б), равным углу  $\beta$  подъема витков резьбы.*

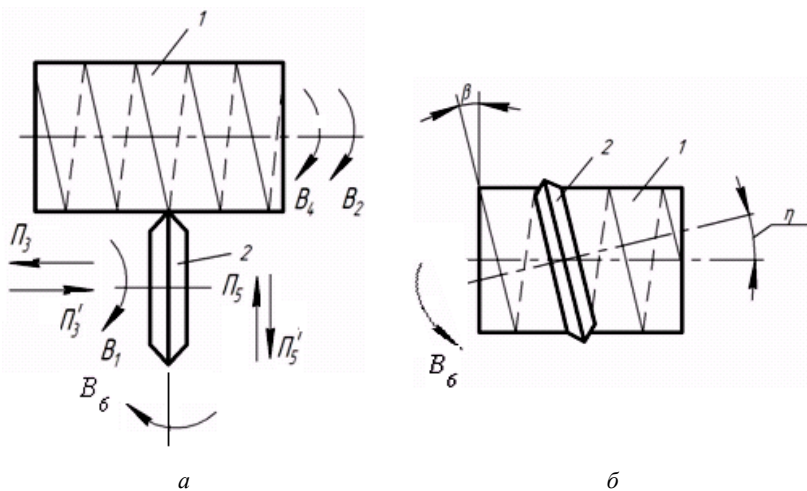


Рис.1.9. Кинематическая схема резьбофрезерования:  
а – кинематическая схема обработки;

б – схема установки инструмента относительно заготовки

*Метод формообразования поверхности.* Винтовая поверхность резьбы образуется в данном случае сочетанием метода копирования, которым формируется профиль резьбы (образующая), и метода касания для формирования направляющей в виде винтовой линии.

*Исполнительные движения, их структура и настраиваемые параметры.* Для обеспечения угла скрещивания  $\eta$  между осями инструмента и заготовки необходимо установочное движение  $Уст_1(B_6)$  – поворот инструмента вокруг оси, перпендикулярной этим осям, которое выполняется при наладке станка. Для расположения инструмента на определенном расстоянии от оси вращения заготовки необходимо установочное движение  $Уст_2(П_5)$ .

Для получения образующей винтовой канавки движение формообразования не требуется, так как профиль резьбы создается методом копирования за счет формы режущей части инструмента. Направляющая (винтовая линия) винтовой канавки создается методом касания, поэтому необходимы два движения формообразования: простое движение резания  $\Phi_v(B_1)$ , образуемое вращением  $B_1$  инструмента 2, и сложное винтовое движение подачи  $\Phi_s(B_2П_3)$ , создаваемое вращением  $B_2$  заготовки 1 и согласованным с ним относительным перемещением  $П_3$  инструмента и заготовки.

Движение  $\Phi_v(B_1)$  должно настраиваться по скорости и направлению, а движение  $\Phi_s(B_2P_3)$  – по пяти параметрам: траектории, скорости, направлению, исходной точке и длине пути (см. табл. 1.1).

После обработки каждой винтовой канавки (захода) заготовке необходимо сообщить поворот  $B_4$  на угол  $\alpha = 2\pi/k$ , где  $k$  – число заходов резьбы, т. е. простое дискретное движение деления  $D(B_4)$ . Примем, что это движение на станке выполняется вручную, поэтому оно настраивается по одному параметру – пути (углу  $\alpha$  поворота заготовки).

Для отвода инструмента от заготовки после окончания хода необходимо вспомогательное движение  $V_{сп1}(P'_5)$ , которое образуется элементарным движением  $P'_5$ , обратным по направлению движению  $P_5$ . При автоматическом выполнении оно настраивается по скорости, направлению, исходной точке и длине пути, например, на станке с ЧПУ эти параметры задаются в управляющей программе. На станке с ручным управлением они выполняются станочником. Требуемая скорость установочных и вспомогательных движений обеспечивается параметрами кинематической цепи ускоренных перемещений или управляющей программой станка с ЧПУ.

Для обработки винтовой канавки за несколько ходов (черновая и чистовая обработка) между движениями  $V_{сп1}(P'_5)$  и  $Уст_2(P_5)$  необходимо винтовое вспомогательное движение  $V_{сп2}(B'_2P'_3)$ , обратное по направлению движению формообразования  $\Phi_s(B_2P_3)$ . Посредством движения  $V_{сп2}(B'_2P'_3)$  инструмент и заготовка возвращаются в исходное положение для выполнения следующего хода. При наладке станка, а также после окончания обработки винтовой канавки перемещение инструмента в исходное положение вдоль оси заготовки осуществляется вспомогательным движением  $V_{сп3}(P'_3)$ .

*Распределение движений между инструментом и заготовкой.* Примем, что инструмент совершает вращательное движение  $B_1$ , поступательные движения  $P_3$ ,  $P_5$ , обратные им движения  $P'_3$  и  $P'_5$ , и движение  $B_6$ , а заготовка совершает вращательные движения  $B_2$ ,  $P'_2$  и  $B_4$ . Исходя из этого и установленных движений, составлена кинематическая схема обработки (см. рис. 1.9).

## 1.4. Варианты индивидуальных заданий

№ п/п	Обработанная поверхность (деталь)	Режущий инструмент (метод обработки)
1	Цилиндрическое зубчатое колесо	Долбяк, метод радиального врезания
2		Долбяк, метод тангенциального врезания
3		Дисковая модульная фреза
4		Концевая модульная фреза
5		Червячная фреза
6		Диagonальное зубофрезерование
7	Червячное колесо	Червячная фреза, метод радиального врезания
8		Червячная фреза, метод тангенциального врезания
9		Червячная фреза, обработка одновременно двух колес
10	Червяк цилиндрический многозаходный	Фасонный резец
11		Дисковая фреза
12		Концевая фреза
13		Чашечный резец (долбяк)
14	Червяк глобоидный	Фасонный резец
15		Чашечный резец (долбяк)
16	Винт ходовой	Фасонный резец
17		Дисковая фреза
18		Вихревая головка
19	Кулачок дисковый	Концевая фреза
20	Кулачок цилиндрический	Концевая фреза
21	Некруглая поверхность с регулярным профилем (циклоидальным, синусоидальным, в виде многоугольника Рело и др.).	Резцовая головка
22		Дисковая фреза
23		Дисковая эксцентрично установленная фреза
24		Цилиндрическая фреза
25		Цилиндрическая эксцентрично установленная фреза



№ п/п	Обработанная поверхность (деталь)	Режущий инструмент (метод обработки)
26	Некруглая поверхность с регулярным профилем (циклоидальным, синусоидальным, в виде многоугольника Рело и др.).	Эксцентрично установленный вращающийся круглый резец
27		Вращающийся резец с винтовой режущей кромкой
28		Фреза червячная
29		Долбяк (профилирование методом прерывистого обката)
30		Долбяк (профилирование методом прерывистого следа)

### 1.5. Контрольные вопросы

1. Понятие кинематической схемы обработки.
2. Последовательность разработки кинематической схемы обработки.
3. Виды исполнительных движений, их назначение.
4. Структура простых и сложных исполнительных движений.
5. Настраиваемые параметры исполнительных движений.
6. Распределение движений между инструментом и заготовкой.
7. Пути оптимизации структуры исполнительных движений и кинематических схем обработки.

## **2. СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА**

### **2.1. Содержание индивидуального задания**

Разработать кинематическую структуру станка для реализации кинематической схемы обработки поверхности по заданию к работе 1 или по индивидуальному заданию.

Составить отчет о выполнении задания.

### **2.2. Методические указания по выполнению задания**

#### ***2.2.1. Основные понятия и определения***

Кинематическая структура станка представляет совокупность механических, электрических, гидравлических и других элементов, объединенных в кинематические связи для создания исполнительных движений, настройки их параметров, передачи энергии и информации. Она устанавливает функциональные связи, необходимые для реализации принятой схемы формообразования заданной поверхности, и служит основой разработки кинематики и конструкции станка. Кинематические связи могут быть механического, немеханического и комбинированного типов. В общем случае кинематическая структура станка состоит из нескольких кинематических групп, определенным образом соединенных между собой, каждая из которых служит для создания определенного исполнительного движения, необходимого для обработки заданной поверхности. [3].

Построение кинематической структуры станка, независимо от используемых методов обработки (лезвийная, абразивная, комбинированная и др.), видов функциональных связей и системы управления (аналоговая, числовая и др.), базируется на следующих общих принципах:

- каждое исполнительное движение в станке создается соответствующей кинематической группой; простое движение создается простой, а сложное движение – сложной кинематической группой;
- структура кинематической группы должна обеспечивать настройку создаваемого ею исполнительного движения по необходимым параметрам, в общем случае по скорости, траектории, направлению, начальной точке и длине пути;

– любая кинематическая группа в общем случае содержит источник движения, соединенные между собой внешнюю и внутреннюю кинематические связи, один, если группа простая, или несколько, если группа сложная, исполнительных органов; в частных случаях внешняя и внутренняя связи могут быть совмещены;

– внутренняя связь обеспечивает траекторию создаваемого движения, а внешняя связь – его остальные параметры, а также передачу энергии от источника движения через звено соединения связей во внутреннюю связь;

– настройка параметров исполнительного движения, создаваемого группой, осуществляется размещенными во внешней и внутренней связях соответствующими органами настройки (механическими, гидравлическими, электронными и т. п.), при этом внутренняя связь должна содержать только органы настройки траектории исполнительного движения.

Применение указанных принципов позволяет с единых позиций проводить синтез кинематической структуры различных станков.

На кинематическую структуру станка существенно влияет принятый способ соединения групп между собой [3], который зависит от кинематических, конструктивных и технологических факторов, таких как:

– наличие или отсутствие в соединяемых группах общих исполнительных кинематических пар;

– одновременность или разновременность исполнительных движений;

– размерность скорости движений подачи (минутная, оборотная);

– количество двигателей и другие факторы.

Наиболее часто применяются следующие способы соединения кинематических групп:

– через общее неподвижное звено, например, станину, на которой располагаются кинематически не связанные между собой приводы различных движений. Такое конструктивное соединение кинематических групп имеют фрезерные, токарные с ЧПУ и другие станки;

– через общее промежуточное исполнительное звено, например, подвижный стол. Так соединены у круглошлифовального станка размещенная на столе кинематическая группа вращения заготовки (круговой подачи) и кинематическая группа перемещения стола (движения продольной подачи);

– через общий двигатель, что характерно для универсальных токарных, сверлильных и других станков, у которых главное движение и движение подачи осуществляются от одного двигателя, а размерность подачи – оборотная (мм/об шпинделя);

– через общую исполнительную кинематическую пару, принадлежащую двум кинематическим группам. Исполнительное звено этой пары, например, стол зубофрезерного станка при нарезании косозубых цилиндрических колес одновременно участвует в двух движениях – в движении обката для профилирования нарезаемых зубьев и в винтовом движении для формирования зубьев по длине. При этом, в зависимости от последовательности выполнения исполнительных движений, группы могут соединяться между собой параллельно (зубофрезерные станки, работающие по методу обкатки), последовательно (токарные, фрезерные и шлифовальные станки для нарезания многозаходных резьб) или смешанно (токарно-затыловочные станки, станки для шлифования методом обкатки зубчатых колес дисковым кругом);

– через внутригрупповые (внутреннюю и внешнюю) кинематические связи и др.

Возможны также комбинации разных способов соединения групп. Соединение кинематических групп осуществляется соответствующими устройствами, например, суммирующими механизмами при параллельном соединении групп, муфтами при последовательном соединении, специальным реверсивным механизмом при смешанном соединении.

При выполнении индивидуального задания рекомендуется в разрабатываемой кинематической структуре станка принимать такой же способ соединения кинематических групп, что и в аналогичных станках.

Различают частную и общую кинематические структуры станка [3]. Частная кинематическая структура представляет собой совокупность кинематических групп, создающих исполнительные движения, необходимые для обработки на станке заданной поверхности. Например, на универсальном зубофрезерном станке могут нарезаться прямозубые и косозубые цилиндрические шестерни, а также червячные колеса различными технологическими методами. Обработке каждого из этих изделий определенным методом соответствует частная кинематиче-

ская структура станка. Объединение множества частных структур образует общую (полную) кинематическую структуру станка.

Таким образом, для разработки кинематической структуры станка вначале, исходя из обрабатываемых на нем поверхностей и реализуемых схем обработки, разрабатываются соответствующие частные кинематические структуры, объединяя которые составляют общую кинематическую структуру станка. Если на станке реализуется одна схема обработки, т. е. обрабатываются поверхности одного типа, то общая и частная кинематические структуры станка совпадают. Этот случай имеет место во всех вариантах индивидуального задания по данному практическому занятию.

### ***2.2.2. Последовательность выполнения задания***

Кинематическая структура станка проектируется на основе схемы обработки, разработанной при выполнении первого практического занятия, руководствуясь изложенными ниже методическими указаниями и условными обозначениями исполнительных органов, кинематических цепей, органов настройки и других механизмов, (рис. 2.1). Исходными являются данные, полученные при разработке кинематической схемы обработки: количество исполнительных движений и их настраиваемые параметры (в общем случае траектория, путь, скорость, направление, исходная точка); распределение элементарных движений между исполнительными органами станка. Учитываются также требования к универсальности станка, степени его автоматизации, способу регулирования скорости исполнительных органов (ступенчатое или бесступенчатое), тип системы управления (аналоговая, цикловая, числовая) и другие факторы.

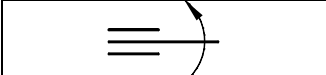


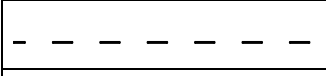






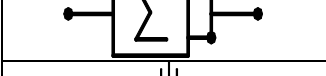
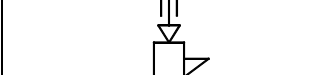
	кинематическая пара вращения
	кинематическая пара поступательного движения
	винтовая кинематическая пара (общее обозначение тягового устройства)
	кинематическая цепь с механическими элементами (передачами)
	кинематическая цепь с немеханическими элементами (электрическими, гидравлическими, пневматическими, мехатронными и др.)
	орган настройки передаточного отношения кинематической цепи (гитара сменных колес, коробка передач)
	орган настройки для бесступенчатого изменения передаточного отношения (вариатор и т. п.)
	реверсивный механизм
	суммирующий механизм
	делительный механизм
	переключающий механизм
	механизм замыкания (размыкания) кинематической цепи

Рис. 2.1. Условные обозначения кинематических цепей и их элементов на структурных схемах

Рекомендуется следующая последовательность разработки частной структурной схемы станка:

1. На основании кинематической схемы обработки определить количество кинематических групп исполнительных движений (формообразования, ориентации, делания, врезания, вспомогательных), необходимых для ее реализации, их тип (простые, сложные).

2. Для всех настраиваемых параметров движений выбрать органы (средства) их настройки. Например, в зависимости от степени универсальности и автоматизации станка органами настройки скорости движения могут быть коробка передач, гитара сменных зубчатых колес или система управления регулируемым двигателем. Траектория движения может обеспечиваться гитарой сменных зубчатых колес или соответствующим элементом системы управления (копиром в копировальной системе, интерполятором в системе ЧПУ). Направление движения может задаваться реверсивным механизмом или системой управления реверсивным двигателем. При выборе органов настройки рекомендуется учитывать решение этой задачи в аналогичных станках.

3. Задаться способом соединения кинематических групп между собой, руководствуясь типовыми решениями в аналогичных станках.

4. Построить кинематическую структуру каждой группы и станка в целом с учетом принятого способа соединения кинематических групп.

5. Выполнить расчет кинематической настройки станка, руководствуясь общей методикой, включающей определение для каждой настраиваемой цепи определение конечных звеньев и их расчетных перемещений, составление уравнения кинематического баланса цепи и определение по нему формулы настройки.

Примеры структурных схем станков приведены в [1–5].

В отчете необходимо изобразить и описать кинематическую структуру станка, дать ее общую характеристику (количество и назначение кинематических групп, способ их соединения), описать структуру каждой кинематической группы (выделить внешнюю и внутреннюю связи, расположенные в них органы настройки параметров создаваемого данной группой движения), вывести в общем виде формулы настройки этих органов.

### **2.2.3. Методика синтеза структуры кинематических групп**

Структуру кинематической группы рекомендуется разрабатывать в следующей последовательности:

- выбрать технологическую компоновку станка, т. е. относительное расположение его исполнительных органов (шпинделей, суппортов и т. п.) и распределить между ними элементарные движения в соответствии с кинематической схемой обработки;

- выбрать и изобразить исполнительные кинематические пары (вращательные, поступательные) в соответствии с создаваемыми группой элементарными движениями и тяговое устройство (для группы движения подачи);

- соединить между собой кинематическими цепями внутренней связи подвижные звенья исполнительных пар (для сложных групп);

- выбрать положение звена соединения внутренней и внешней связей группы;

- соединить кинематической цепью внешней связи двигатель и звено соединения связей;

- разместить во внешней и внутренней связях органы настройки параметров создаваемого группой исполнительного движения.

Органы настройки параметров исполнительного движения, не влияющие на кинематику станка (настройка на исходную точку и длину пути), допускается на структурной схеме не изображать.

Построение внешней и внутренней связей должно учитывать принятый способ соединения кинематических групп между собой.

В зависимости от структуры создаваемого исполнительного движения кинематическая группа может быть простой или сложной. Простая группа создает простое движение, например  $\Phi_v(B_1)$ ,  $\Phi_s(\Pi_2)$ , а сложная группа – сложное движение  $\Phi_v(B_1B_2)$ ,  $\Phi_s(\Pi_2\Pi_3)$ .

#### ***Примеры синтеза структуры простых кинематических групп.***

Простая кинематическая группа создает простое исполнительное движение, образованное обычно вращательным или поступательным элементарным движением, которое сообщается исполнительному органу станка (шпинделю, суппорту). В обоих случаях траектория исполнительного движения обеспечивается кинематической парой, соответственно вращательной или поступательной, подвижным звеном которой является исполнительный орган станка.



Следует учитывать, что простое исполнительное движение с замкнутой траекторией настраивается по двум параметрам – скорости и направлению, а с незамкнутой траекторией – дополнительно по исходной точке и длине пути.

*Пример 2.1. Построение структуры кинематической группы вращательного движения  $\Phi_v(B_1)$  (рис. 2.2). Движение настраивается по скорости и направлению, а его траектория (окружность) обеспечивается вращательной исполнительной парой. Внутренняя связь данной группы изображается в виде вращательной пары между шпинделем 1 и корпусом 2. Для сообщения шпинделю 1 вращательного движения служит двигатель  $M$ , который соединяют со шпинделем кинематической цепью 4-3 внешней связи. Для настройки частоты вращения шпинделя внешняя связь снабжается соответствующим органом  $i_v$ , а для настройки направления вращения шпинделя – реверсивным механизмом  $P$ . Таким образом, внешняя связь кинематической группы представляет кинематическую цепь 4- $P$ - $i_v$ -3 между двигателем  $M$  и шпинделем 1.*

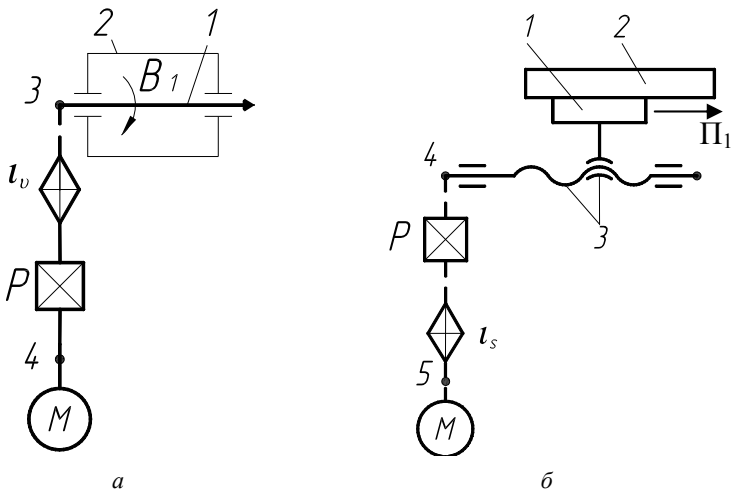


Рис. 2.2. Структурные схемы простых кинематических групп:  
 а – группа вращательного движения; б – группа поступательного движения

*Пример 2.2. Построение структуры кинематической группы прямолинейного движения  $\Phi(\Pi_1)$  (рис. 2.2, б). Прямолинейное пе-*

ремещение  $\Pi_1$  исполнительного органа  $I$  по неподвижным направляющим  $2$  осуществляется тяговым устройством, например, передачей винт-гайка  $3$ . В общем случае движение настраивается по скорости, направлению, исходной точке и длине пути. Траектория движения (прямая линия) обеспечивается внутренней связью в виде поступательной пары  $I-2$  между направляющими подвижного  $1$  и неподвижного  $2$  узлов станка.

Для создания движения  $\Pi_1$  тяговое устройство  $3$  соединяют с двигателем  $M$  кинематической цепью  $5-4$ , в которой размещают органы настройки скорости  $i_s$  и направления  $P$ . Внешняя связь кинематической группы представляет кинематическую цепь  $5-i_s-P-4-3$  между двигателем  $M$  и шпинделем  $I$ . Настройка на путь и исходное положение исполнительного органа  $I$  осуществляется, например, посредством упоров, воздействующих на путевые переключатели (на рис. не показаны).

При использовании регулируемых по частоте и направлению вращения двигателей, функции органов настройки скорости и направления движения в рассмотренных примерах выполняет система управления двигателем.

### ***Примеры синтеза структуры сложных кинематических групп.***

*Пример 2.3.* Рассмотрим эту задачу на примере синтеза структуры кинематической группы для создания винтового движения формообразования  $\Phi_v(V_1\Pi_2)$  с возможностью нарезания резцом левой или правой цилиндрической резьбы по схеме с вращательным движением  $V_1$  заготовки и поступательным перемещением  $\Pi_2$  резца. Движение  $\Phi_v(V_1\Pi_2)$  сложное с незамкнутой траекторией и поэтому должно настраиваться на траекторию, скорость, направление, длину пути и исходное положение.

Для создания и обеспечения траекторий движений  $V_1$  и  $\Pi_2$  необходимы, соответственно, вращательная и поступательная кинематические пары. Первая из них расположена между корпусом  $1$  (рис. 2.3) и шпинделем  $2$ , несущим заготовку  $3$ , а вторая образована прямолинейными направляющими станины  $4$  и суппорта  $5$ , несущего резец  $6$ . Перемещение  $\Pi_2$  суппорта обеспечивается винтовым тяговым устройством  $7$ .

Указанные кинематические пары и соединяющая их кинематическая цепь  $8-7$  образуют внутреннюю кинематическую связь группы движения  $\Phi_v(V_1\Pi_2)$ . Для создания этого движения двигатель  $M$  со-





ской поверхности (прямая или обратная); на скорость –  $i_v$ ; на направление – реверсивным механизмом  $P_3$ ; на путь и исходное положение – упорами (аналогично тому, как показано на рис. 2.3).

Так как в данном случае взаимосвязаны три элементарных движения и, следовательно, три исполнительных органа – шпиндель 4, продольный 7 и поперечный 11 суппорты, то внутренняя связь этой группы должна содержать вращательную и две поступательные исполнительные кинематические пары и две кинематические цепи, соединяющие между собой подвижные звенья этих кинематических пар.

Первая цепь 3-2- $i_x$ - $P_1$ -5-6 связывает между собой шпиндель 4 и продольный суппорт 7, совершающие согласованные, посредством органа настройки  $i_x$ , движения  $B_1$  и  $\Pi_2$  в соответствии с шагом нарезаемой резьбы.

Вторая кинематическая цепь 6-8- $i_y$ - $P_2$ -9-10 соединяет между собой подвижные звенья поступательных кинематических пар, т. е. продольный 7 и поперечный 11 суппорты, обеспечивая посредством органа настройки  $i_y$  функциональную связь движений  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$  в соответствии с заданной конусностью.

Органы настройки скорости  $i_v$  и направления  $P_3$  движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2\Pi_3)$  расположены в кинематической цепи 1- $P_3$ - $i_v$ -2 внешней связи, соединяющей двигатель  $M$  с внутренней связью через звено 2 соединения связей.

Совершенствование кинематики станков в направлении ее упрощения и повышения точности достигается совмещением внешней и внутренней связей кинематических групп, что обеспечивается в структурах электромеханического и мехатронного типов.

*Пример 2.5.* Построение структуры сложной кинематической группы электромеханического типа. На рис. 2.5 изображена структура этого типа кинематической группы движения обкатки  $\Phi_v(B_1B_2)$  зубофрезерного станка.

Двигатель  $M_1$  служит для вращения инструментального шпинделя I, а двигатель  $M_2$  – стола II с заготовкой через сменные зубчатые колеса гитары  $i_x$ . Оба двигателя вращаются с одинаковой частотой, что обеспечивается их электрической связью с общим преобразователем частоты тока ПЧ. В результате создается движение обкатки  $\Phi_v(B_1B_2)$ , настраиваемое органом  $i_x$  на траекторию (число обрабатываемых зубьев).



### ***Примеры выполнения индивидуального задания.***

*Пример 2.6.* Разработать кинематическую структуру станка для фрезерования многозаходной цилиндрической резьбы, реализующего изображенную на рис. 1.9 схему обработки. Необходимые исполнительные движения и их настраиваемые параметры определены при разработке этой схемы обработки (см. п. 1.3). Принять, что делительное, установочные и вспомогательные движения выполняются вручную, а параметры движения  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  – исходная точка и длина, пути обеспечиваются станочником. Задача решается в соответствии с п. 2.2.3.

### ***Проектирование кинематической структуры станка.***

*Определение количества кинематических групп и их характеристика.* В соответствии с назначением и структурой исполнительных движений кинематическая структура резбозерного станка должна содержать: две группы движений формообразования – простую группу движения резания  $\Phi_v(B_1)$  и сложную группу движения подачи  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$ , группу движения деления  $D(B_4)$ , и группы установочных и вспомогательных движений.

*Органы настройки параметров движений.* Движение  $\Phi_v(B_1)$  настраивается по скорости коробкой скоростей  $i_v$ , а направление вращения инструментального шпинделя с фрезой задается электродвигателем, что характерно для фрезерных станков. Движение  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  настраивается по скорости коробкой подач  $i_s$ , по направлению – реверсивным механизмом  $P_1$ , по траектории (на шаг резьбы – гитарой сменных зубчатых колес  $i_x$  и на направление резьбы – реверсивным механизмом  $P_2$ ), а исходная точка и длина пути задаются станочником. В соответствии с заданием движение деления  $D(B_4)$  выполняется вручную с обеспечением длины пути (угла поворота заготовки) при переходе к обработке следующего захода резьбы. Также выполняются станочником установочные движения  $Уст_1(B_6)$ ,  $Уст_2(\Pi_5)$  и вспомогательные движения  $Всп_1(\Pi'_5)$ ,  $Всп_3(\Pi'_3)$ .

*Соединение кинематических групп между собой.* Группы движений  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  не имеют общих исполнительных звеньев и совмещенных по траектории элементарных движений, поэтому для этих групп принимается характерное для фрезерных станков соединение через промежуточные звенья без межгрупповой связи.

Группы движений  $\Phi_3(B_2\Pi_3)$  и  $D(B_4)$  должны быть соединены последовательно, т. к. имеют общее исполнительное звено (шпindel с заготовкой), которое поочередно участвует в обоих движениях: в первом оно выполняет элементарное движение  $B_2$ , а в другом –  $B_4$ .

Группы вспомогательных и установочных движений связаны с группами остальных движений через промежуточные исполнительные и неподвижные звенья.

*Описание кинематической структуры станка.* Группа движения резания  $\Phi_v(B_1)$  – простая, ее внутренняя связь состоит из одной вращательной кинематической пары между инструментальным шпинделем I (рис. 2.7) и корпусом фрезерной головки III. Внешняя связь представляет кинематическую цепь  $1-i_v-2$ , которая соединяет электродвигатель  $M_1$  с инструментальным шпинделем I.

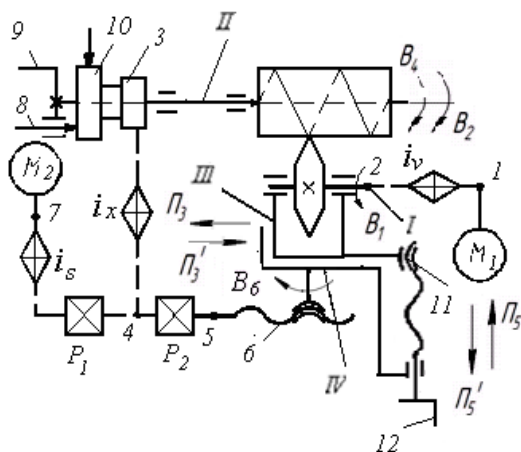


Рис. 2.7. Кинематическая структура резьбофрезерного станка с механическими связями

Для настройки движения  $\Phi(B_1)$  по скорости во внешнюю связь кинематической группы этого движения введен орган настройки  $i_v$ . Настройка направления движения осуществляется переключением электродвигателя  $M_1$ . При использовании регулируемого двигателя  $M_1$  с достаточным диапазоном регулирования отпадает необходимость в органе настройки  $i_v$ , функцию которого в этом случае выполняет система управления двигателем.



Группа движения подачи  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  сложная, поэтому ее внутренняя связь содержит вращательную и поступательную кинематические пары и кинематическую цепь  $3-i_x-4-P_2-5-6$ , связывающую между собой шпиндель II и продольный суппорт IV, совершающие элементарные движения, соответственно,  $B_2$  и  $\Pi_3$ .

Внутренняя связь обеспечивает траекторию исполнительного движения (винтовую линию определенного шага и направления), поэтому в ней расположены: орган настройки  $i_x$  шага нарезаемой резьбы; реверсивный механизм  $P_2$  для настройки станка на обработку левой или правой резьбы.

Внешняя связь  $7-i_s-P_1-4$  соединяет двигатель  $M_2$  через органы настройки скорости ( $i_s$ ) и направления (реверсивный механизм  $P_1$ ) подачи с внутренней связью. При применении реверсивного двигателя  $M_2$  с достаточным диапазоном регулирования, органы настройки  $i_s$  и  $P_1$  во внешней связи не требуются.

Вспомогательное движение  $Всп_2(B'_2\Pi'_3)$  создается группой движения  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  при переключении реверсивного механизма  $P_1$ . Установочное и вспомогательное движения фрезерной головки III в поперечном направлении осуществляются вручную (механизм этого перемещения на рис. не показан).

Установочное движение  $Уст_2(\Pi_5)$  и обратное ему вспомогательное движение  $Всп_1(\Pi'_5)$  осуществляются тяговым устройством 11 при вращении его ходового винта рукояткой 12.

После обработки одного захода движение  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  отключается, за счет вспомогательных и установочного движений инструмент возвращается в исходное положение, и выполняется операция деления. Для этого фиксатор 8 выводится из отверстия неподвижного делительного диска 10, отключая тем самым шпиндель II от внутренней связи, и с помощью рукоятки 9 шпиндель с заготовкой поворачивают на угол  $2\pi/k$ , где  $k$  – число заходов нарезаемой резьбы. Затем фиксатор 8 вводят в отверстие делительного диска, т. е. замыкают винторезную цепь, и обрабатывают второй заход и т. д.

### ***Расчет настройки кинематических цепей.***

*Настройка цепи вращения инструментального шпинделя.* Конечными звеньями этой цепи являются электродвигатель  $M_1$  и инструментальный шпиндель I с фрезой. Цепь содержит один орган настройки  $i_v$  частоты вращения шпинделя.

Расчетные перемещения для рассматриваемой цепи:

$$\text{РП: } n_3 \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{\text{шп}} \text{ мин}^{-1},$$

где  $n_3$  – частота вращения электродвигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$n_{\text{шп}}$  – настраиваемая частота вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$  (определяется по режимам резания).

Уравнение кинематической цепи

$$\text{УКЦ: } n_{\text{шп}} = n_3 i_0 i_v. \quad (2.1)$$

Формула настройки органа  $i_v$

$$\text{ФН: } i_v = C_v n_{\text{шп}},$$

где  $C_v$  – постоянная рассматриваемой кинематической цепи, определяемая после проектирования кинематической схемы станка.

*Группа винтового движения  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  содержит две настраиваемые кинематические цепи: цепь подач, которая через органы настройки  $i_s$  и  $P_1$  связывает вращение двигателя  $M_2$  с вращением шпинделя  $\Pi$ , и винторезную цепь, связывающую через органы настройки  $i_x$  и  $P_2$  вращение шпинделя  $\Pi$  с перемещением продольного суппорта  $IV$ .*

*Настройка цепи подач.*

РП:  $n_3 \text{ мин}^{-1} \rightarrow s \text{ мм/мин}$  перемещения фрезы относительно заготовки по винтовой линии, где  $n_3$  – частота вращения двигателя  $M_2$ .

$$\text{УКЦ: } s = n_3 i_{os} i_s \frac{\pi D}{\cos \beta}, \quad (2.2)$$

где  $i_{os}$  – передаточное отношение постоянных передач кинематической цепи между двигателем  $M_2$  и шпинделем  $\Pi$ ,

$i_s$  – передаточное отношение органа настройки данной цепи;

$D$  – диаметр заготовки, мм;

$\beta = \arctg \frac{P}{\pi D}$  – угол наклона витков резьбы;

$P$  – шаг резьбы.

Следовательно,

$$\Phi\text{Н: } i_s = \frac{s \cos \beta}{n_3 i_{os} \pi D}. \quad (2.3)$$

Поскольку подача не влияет на шаг резьбы, то величина  $i_s$  может настраиваться приближенно.

*Настройка винторезной цепи.*

Конечными звеньями винторезной цепи являются несущий заготовку шпиндель II и продольный суппорт IV. Поэтому имеем:

РП: 1 обороту шпинделя II  $\rightarrow$  P мм перемещения суппорта IV;

$$\text{УКЦ: } P = I i_{ox} i_x S_T, \quad (2.4)$$

где  $i_{ox}$  – постоянная винторезной кинематической цепи;

$i_x$  – передаточное отношение органа настройки шага резьбы;

$S_T$  – шаг тягового вала (шаг ходового винта кинематической цепи продольного перемещения суппорта IV).

Из УКЦ получаем формулу настройки органа  $i_x$ :

$$\Phi\text{Н } i_x = C_x P, \quad (2.5)$$

где  $C_x = 1 / i_{ox} S_T$  – постоянная винторезной кинематической цепи.

*Пример 2.7.* Рассмотрим вариант выполнения предыдущего задания, основанный на применении в станке мехатронных связей (рис. 2.8).

В простой группе главного движения  $\Phi_v(B_1)$  установлен регулируемый реверсивный электродвигатель  $M_1$ , поэтому настройка этого движения по скорости и направлению осуществляется системой управления двигателем.

В группе винтового движения  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  функциональная связь между вращением  $B_2$  шпинделя II и поступательным перемещением  $\Pi_3$  суппорта III осуществляется внутренней связью мехатронного типа, содержащей датчик  $D_1$  угла поворота шпинделя, систему управления (СУ), регулируемый двигатель  $M_3$ , тяговое устройство 3 типа винт-гайка качения и линейный датчик  $D_2$  обратной связи по положению, подключенной к системе управления. Настройка движения  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  на шаг и направление нарезаемой резьбы осуществляется посредством СУ.

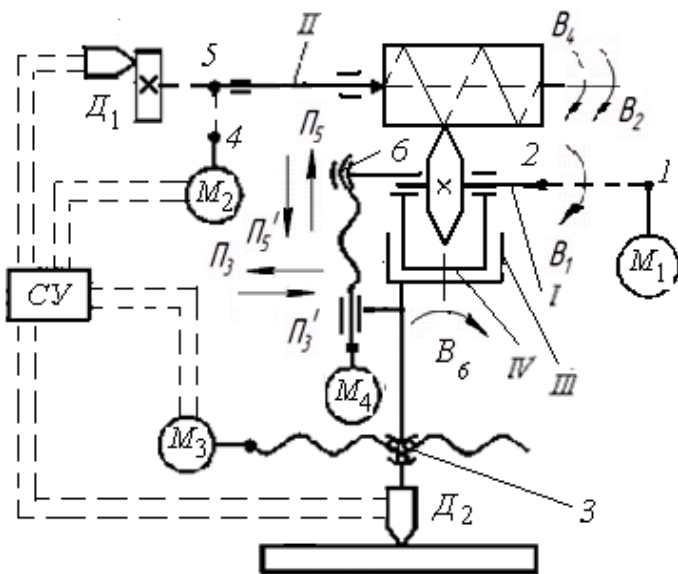


Рис. 2.8. Кинематическая структура резьбофрезерного станка с мехатронными связями

Внешняя связь рассматриваемой группы в виде кинематической цепи 4-5 соединяет регулируемый по скорости и направлению двигатель  $M_2$  с внутренней связью.

Группа движения деления  $D(B_4)$  – простая, ее внутренняя связь состоит из вращательной кинематической пары между шпинделем II и корпусом шпиндельной бабки. Внешняя связь 4-5 соединяет двигатель  $M_2$  со шпинделем. Требуемый угол поворота шпинделя задается СУ и обеспечивается с помощью датчика  $D_1$ .

Группы движений  $Уст_2(\Pi_5)$  и  $Всп_1(\Pi'_5)$  – простые. Они имеют общую внутреннюю связь в виде поступательной пары между направляющими поперечного IV и продольного III суппортов и общую внешнюю связь в виде тягового устройства 6, соединенного с двигателем  $M_4$ . Аналогичная структура и у группы движения  $Всп_3(\Pi'_3)$ , имеющей с группой движения  $\Phi_5(B_2\Pi_3)$  общие тяговое устройство 3 и двигатель  $M_3$ , связанный с системой управления. Все параметры этих движений (скорость, направление, исходная точка и длина пути) обеспечиваются системой управления.

*Пример 2.8.* Разработать структурную схему специализированного станка для обработки некруглых цилиндрических поверхностей эксцентрично установленной цилиндрической фрезой по схеме обработки, изображенной на рис. 1.8). Необходимые для ее реализации движения приведены в п. 1.2.7.

Для распределения элементарных движений между исполнительными органами станка для обработки деталей типа валов принимается технологическая компоновка станка, которая включает четыре подвижных органа (по количеству необходимых координатных перемещений): инструментальный шпиндель I, совершающий вращение  $B_1$ ; несущий заготовку шпиндель I, совершающий вращение  $B_2$ ; продольный III и поперечный IV суппорты, совершающие поступательные движения, соответственно,  $\Phi_s(\Pi_3)$ ,  $Всп_2(\Pi'_3)$  и  $Уст(\Pi_4)$ ,  $Всп_1(\Pi'_4)$ . Для упрощения конструкции станка элементарные движения, образующие сложное движение  $\Phi_v(B_1B_2)$ , распределены между шпинделями I и II. Движение подачи, установочное и вспомогательные движения сообщаются инструменту.

#### ***Построение структурной схемы станка.***

*Определение количества и характеристика кинематических групп.* Все указанные выше исполнительные движения выполняются при обработке некруглой цилиндрической поверхности и реализуются одной кинематической структурой станка, следовательно, частная и общая кинематические структуры совпадают.

Исходя из состава исполнительных движений, кинематическая структура станка должна содержать кинематические группы движений  $\Phi_v(B_1B_2)$ ,  $\Phi_s(\Pi_3)$ ,  $Уст(\Pi_4)$ ,  $Всп_1(\Pi'_4)$  и  $Всп_2(\Pi'_3)$ .

Группа движения резания  $\Phi_v(B_1B_2)$  – сложная, ее внутренняя связь выполнена в виде двух вращательных пар и кинематической цепи  $I-2-M_1-ПЧ-M_2-3-i_x-4$  (рис. 2.9), связывающей между собой их подвижные звенья – шпиндели I и II, совершающие элементарные движения, соответственно,  $B_1$  и  $B_2$ . Внутренняя связь обеспечивает траекторию исполнительного движения, зависящую от числа граней (выступов)  $m$  у обработанной некруглой поверхности, поэтому в ней расположен орган настройки  $i_x$  на число граней. Соотношение направлений элементарных движений  $B_1$  и  $B_2$  целесообразно настраивать органом  $i_x$ , т. к. введение во внутреннюю связь реверсирующего механизма связано с увеличением ее кинематической погрешности.

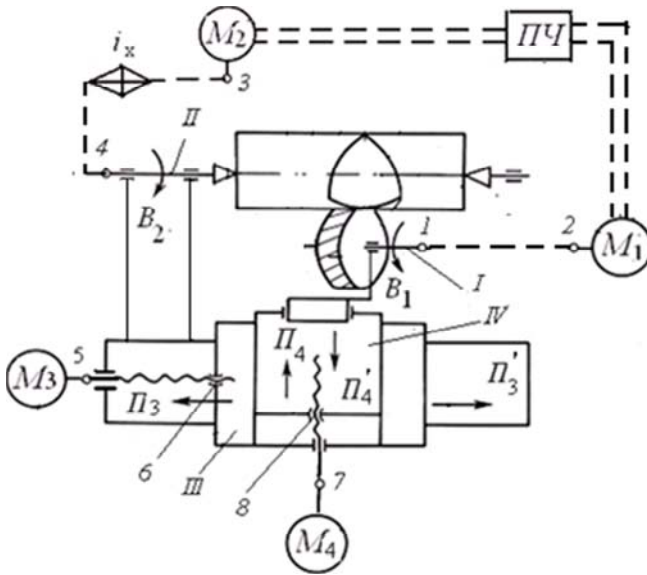


Рис. 2.9. Структурная схема станка для обработки некруглых валов

Так как двигатели расположены во внутренней связи, то она совмещена с внешней связью кинематической группы.

Группа движения подачи  $\Phi_s(\Pi_3)$  – простая, ее внутренняя связь состоит из поступательной кинематической пары, подвижным звеном которой является продольный суппорт III. Внешняя связь этой группы 5-6 снабжена тяговым устройством в виде винтовой передачи 6, ходовой винт которой соединен через звено 5 с регулируемым по скорости и направлению двигателем  $M_3$ , что характерно для современных станков.

Группа вспомогательного движения  $Всп_2(\Pi'_3)$  конструктивно совмещена с группой движения подачи  $\Phi_s(\Pi_3)$ .

Аналогичную структуру имеют группы движений  $Уст(\Pi_4)$  и  $Всп_1(\Pi'_4)$ , которые сообщаются поперечному суппорту IV посредством тягового устройства 8, соединенного через звено 7 с регулируемым по скорости и направлению двигателем  $M_4$ .

*Органы настройки параметров движений.* Сложное движение  $\Phi_v(V_1V_2)$  настраивается по скорости преобразователем частоты тока ПЧ, а необходимое направление вращения инструментального

шпинделя I с фрезой обеспечивается электродвигателем  $M_3$ , что характерно для фрезерных станков. Скорость, направление, исходная точка и длина пути движения подачи  $\Phi_s(P_3)$ , а также установочных и вспомогательных движений исполнительных органов III и IV задаются системой управления (на рис. 2.9 не показана).

*Разработка и описание кинематической структуры станка.* Требуется составить структурные схемы отдельных кинематических групп, обосновать способ их соединения между собой и размещение в них органов настройки, вывести для них формулы настройки.

*Соединение кинематических групп между собой.* Группы движений  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3)$  не имеют общих исполнительных звеньев и совмещенных по траектории элементарных движений, поэтому они соединены между собой через неподвижные звенья без межгрупповых связей.

При реверсировании двигателя  $M_3$  вместо движения  $\Phi_s(P_3)$  выполняется вспомогательное движение  $Всп_2(P'_3)$ . Настройка параметров этих движений осуществляется системой управления программными средствами. Группы движений  $\Phi_s(P_3)$  и  $Всп_2(P'_3)$  конструктивно совмещены. Аналогично совмещены между собой и группы движений  $Уст(P_4)$  и  $Всп_1(P'_4)$ , которые осуществляются двигателем  $M_4$ , связанным с внутренней связью кинематической цепи внешней связи 7-8.

#### ***Расчет кинематической настройки станка.***

*Настройка цепи между шпинделями I и II.* Цепь содержит орган настройки  $i_x$  на число выступов (граней) некруглой поверхности и функционально является цепью деления. Поэтому расчетные перемещения для этой цепи:

РП:  $1 \text{ оборот шпинделя I} \rightarrow 1/m \text{ оборота шпинделя II}$ ,  
где  $m$  – число граней некруглой поверхности.

$$\text{УКЦ: } 1/m = 1_{i_{0x}} i_x,$$

где  $i_{0x}$  – постоянная расчетной цепи;

$i_x$  – передаточное отношение органа настройки.

$$\text{ФН: } i_x = C/m,$$

где значение постоянной  $C$  определяется исходя из параметров передач, входящих в цепь деления.

### 2.3. Контрольные вопросы

1. Условные обозначения исполнительных органов и элементов кинематических цепей на структурных схемах.
2. Кинематические связи в станках. Структура кинематической группы, методика ее разработки.
3. Настраиваемые параметры простого и сложного исполнительных движений с замкнутой и незамкнутой траекторией.
4. Органы настройки параметров движения, их рациональное размещение во внешней и внутренней связях.
5. Способы соединения кинематических групп. Примеры применения последовательного, параллельного и смешанного соединения кинематических групп.
6. Последовательность разработки структурной схемы станка.
7. Определение параметров настраиваемых кинематических цепей.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Металлорежущие станки: учебник / под ред. В. Э. Пуша. – М.: Машиностроение, 1985. – 575 с.
2. Русецкий, А. М. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316 с.
3. Федотенок, А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
4. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 264 с.
5. Данилов, В. А. Проектирование кинематики металлорежущих станков: пособие по курсу «Конструирование и расчет станков» / В. А. Данилов. – Новополоцк, 2008. – 228 с.
6. Родин, П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. – Киев: Вища школа, 1977. – 192 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ .....	4
1.1. Содержание индивидуального задания .....	4
1.2. Методические указания по выполнению задания .....	4
1.2.1. Выбор производящих линий поверхности .....	4
1.2.2. Характеристика метода формообразования производимых линий и поверхностей .....	6
1.2.3. Определение необходимых исполнительных движений .....	8
1.2.4. Задание и оптимизация структуры исполнительных движений .....	11
1.2.5. Определение настраиваемых параметров исполнительных движений .....	17
1.2.6. Распределение элементарных движений между заготовкой и инструментом .....	19
1.2.7. Графическое изображение и описание кинематической схемы обработки .....	20
1.3. Пример выполнения индивидуального задания .....	21
1.4. Варианты индивидуальных заданий .....	24
1.5. Контрольные вопросы .....	25
2. СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА .....	26
2.1. Содержание индивидуального задания .....	26
2.2. Методические указания по выполнению задания .....	26
2.2.1. Основные понятия и определения .....	26
2.2.2. Последовательность выполнения задания .....	29
2.2.3. Методика синтеза структуры кинематических групп .....	32
2.3. Контрольные вопросы .....	48
ЛИТЕРАТУРА .....	49

Учебное издание

**ДАНИЛОВ** Виктор Алексеевич  
**ДАНИЛОВ** Александр Алексеевич

**СИНТЕЗ СХЕМ ОБРАБОТКИ  
И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ  
СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ  
СТАНКОВ**

Пособие

к практическим занятиям для студентов специальностей  
1-36 01 01 «Технология машиностроения»  
и 1-36 01 03 «Технология и оборудование  
машиностроительного производства»

Редактор *Е. О. Германович*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 08.06.2020. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,96. Уч.-изд. л. 2,32. Тираж 100. Заказ 821.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.