

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

**А. И. Голембиевский**

**СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА ПОЗНАНИЯ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2021

УДК 621.9.06:530.1(035.3)  
ББК 34.63я9  
Г60

Рекомендована к изданию советом учреждения образования  
«Полоцкий государственный университет» в качестве монографии  
(протокол № 5 от 29.01.2021)

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Металлорежущие станки и инструменты»  
Белорусского национального технического университета

**В. А. ДАНИЛОВ;**

д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Технология и оборудование  
машиностроительного производства»

Полоцкого государственного университета

**Н. Н. ПОПОК**

**Голембиевский А. И.**

Г60 Современная парадигма познания металлорежущих станков / А. И. Голембиевский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 224 с.  
ISBN 978-985-531-764-8.

В монографии излагается достаточно подробная версия современной парадигмы познания металлорежущих станков. Ее структура включает три логически связанные части: теория формообразования реальных поверхностей в машиностроении, понятие о кинематической структуре, функции, теории настройки металлорежущих станков и методика функционального проектирования кинематической структуры по законам функционирования, задаваемым виртуальными техническими решениями (способами формообразующей обработки). На конкретных примерах показывается, что изложенные научные положения парадигмы приемлемы при анализе и синтезе кинематической структуры металлорежущих станков с механическими, механико-гидравлическими и мехатронными связями.

Предназначена для аспирантов, докторантов, научных работников, преподавателей университетов, занимающихся систематизацией, исследованием и созданием технологического оборудования. Будет полезна студентам и магистрантам конструкторско-технологических специальностей и инженерно-техническим специалистам, занимающимся проектированием и эксплуатацией станочного оборудования.

**УДК 621.9.06:530.1(035.3)**

**ББК 34.63я9**

**ISBN 978-985-531-764-8**

© Голембиевский А. И., 2021

© Полоцкий государственный университет, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Основы теории воспроизведения реальных поверхностей в машиностроении .....	10
1.1 Понятие о характеристическом образе инструмента.....	10
1.2 Геометрические классы воспроизведения реальных поверхностей.....	14
1.3 Осуществимые классы воспроизведения реальных поверхностей .....	19
1.4 Классификация движений в металлорежущих станках.....	22
Глава 2. Теория кинематической структуры металлорежущих станков .....	25
2.1 Понятие о кинематической структуре и функции металлорежущих станков.....	25
2.2 Объединение частных структурных схем металлорежущих станков в общую структурную схему станка.....	35
2.3 Основы теории настройки металлорежущих станков .....	38
Глава 3. Анализ кинематической структуры станка для обработки червяков чашечным резцом .....	45
3.1 Пионерный способ обработки червяков чашечным резцом типа зуборезного долбяка .....	45
3.2 Анализ структурной схемы базового станка для обработки червяков чашечным резцом .....	46
3.3 Расширение технических возможностей кинематической структуры базового станка для обработки червяков .....	50
Глава 4. Функциональное проектирование кинематической структуры металлорежущих станков с электронными связями в формообразующих группах.....	60
4.1 Постановка задачи.....	60
4.2 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме задающая – ведомая координаты.....	61
4.3 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме равнозначных координат .....	66
4.4 Электронная система синхронизации исполнительных органов станка для обработки двухшаговых червяков чашечным резцом .....	75
Глава 5. Зубообрабатывающие станки для обработки зубчатых колес с наклонными зубьями.....	86
5.1 Способы обработки цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями .....	86
5.2 Модернизация базовой кинематической структуры зубодолбежного станка.....	91
5.3 Кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями .....	95
5.4 Кинематическая структура зубофрезерного станка с гибридными формообразующими группами для обработки цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями .....	100
Глава 6. Эволюция развития кинематической структуры зубодолбежных станков .....	110
6.1 Первообразные способы обкатного зубодолбления .....	110
6.2 Типовая структурная схема зубодолбежного станка с радиальным врезанием.....	115

6.3	Зубодолбежный станок для многопроходной обработки зубчатых колес с адаптивным управлением .....	120
6.4	Зубодолбежный станок для одновременной обработки двух зубчатых колес при касательном врезании .....	126
6.5	Зубодолбежный станок для последовательной обработки зубчатых колес при касательном врезании .....	129
6.6	Зубодолбежный двухстоловый станок-автомат с ЧПУ для последовательной обработки зубчатых колес .....	132
6.7	Зубодолбежный станок со спиральным врезанием для многопроходной обработки зубчатых колес.....	144
6.8	Роторный зубодолбежный станок с гибридными кинематическими группами .....	150
Глава 7. Эволюция развития кинематической структуры металлорежущих станков для зуботочения обкатным резцом .....		163
7.1	Анализ способа зуботочения цилиндрических колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка .....	163
7.2	Типовая структурная схема станка для зуботочения цилиндрических колес обкатным резцом .....	166
7.3	Структурная схема станка для зуботочения с гидравлическими связями в формообразующих группах.....	170
7.4	Структурная схема станка для зуботочения с электронными связями в формообразующих группах.....	177
Глава 8. Анализ кинематических схем известных металлорежущих станков .....		185
8.1	Токарно-револьверный станок модели 1Г340 .....	185
8.2	Зубошлифовальный станок модели 5В833 .....	190
8.3	Шлицефрезерный станок модели 5350.....	195
8.4	Универсальный токарно-затыловочный станок модели 1Б811 .....	200
8.5	Резьбофрезерный станок-полуавтомат для обработки коротких резьб модели 5М5Б62 .....	209
Глава 9. Современная парадигма познания металлорежущих станков в экспертизе изобретений .....		213
9.1	Постановка задачи .....	213
9.2	Зубодолбежный станок по патенту ВУ 3343 .....	214
9.3	Зубофрезерный станок по патенту ВУ 6134 .....	215
Заключение .....		217
Словарь специфических терминов .....		219
Библиографический список.....		221

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из свойств виртуальной технической идеи (способа формообразующей обработки) является промышленное применение, под которым в научно-технической экспертизе изобретений понимается реализация способа в соответствующем реальном техническом решении – технологической машине. Следовательно, в основу любой технологической машины, предназначенной для получения деталей заданной геометрической формы и размеров с требуемыми физико-механическими свойствами, должен быть положен вполне определенный способ или группа однотипных способов формообразующей обработки, различающихся количеством приемов, их последовательностью и правилами выполнения отдельных приемов.

Среди многообразия технологических машин наиболее значительный класс, как по количеству, так и по уровню специализации, разнообразию конструктивных вариантов, сложности кинематической схемы, развитости систем управления, многообразию используемых режущих инструментов и физических явлений, заменяющих традиционный режущий инструмент, составляют металлорежущие станки (альтернативные названия: станочное оборудование, технологическое оборудование).

С точки зрения теории технических систем, металлорежущий станок можно рассматривать в виде объединения кинематической структуры (кинематической схемы), системы управления и компоновки (несущей системы). Однако первичной базой большинства конструкций металлорежущих станков является кинематическая структура, так как назначение такой технологической машины – создание относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданных поверхностей на твердом теле.

Несмотря на разнообразие металлорежущих станков, предназначенных для выполнения не только различных, но и однотипных технологических операций, кинематическая структура любой из них базируется на ряде основных достаточно общих кинематических закономерностей, присущих всем станкам. В конструкции металлорежущих станков кинематическая структура выражается кинематической схемой. Развитость ее, в первую очередь, зависит как от сложности воспроизводимых поверхностей, так и от количества исполнительных органов, используемых источников энергии движения и системы управления.

Современная тенденция – использование в металлорежущих станках для каждого исполнительного органа отдельного электродвигателя, что обеспечивает сокращение количества передач в кинематических цепях и, как следствие, повышение кинематической точности, а также снижение шумовых характеристик технологического оборудования. Применение раздель-

ных приводов обусловлено также развитием систем управления на базе электронной техники, например, программируемых контроллеров, развитых систем ЧПУ и систем непосредственного компьютерного управления.

Металлорежущие станки изучаются на всех уровнях профессионального образования. Существенное значение при этом имеет выбор парадигмы познания, то есть комплекса научных данных или аксиом, принимаемых за истину, на основе которых развивается научная теория, для анализа кинематической структуры и функции (принципа работы) металлорежущих станков.

В мировой практике впервые в 1923 г. в США Генри Д. Бергард опубликовал 2-х томную учебную книгу по металлорежущим станкам. В 1930 г. шестое и седьмое издание этого двухтомника, было переведено на русский язык, переработано и дополнено инженером Н. С. Ачерканом и издано в Советском Союзе [1]. Эта книга длительное время была основным учебником при подготовке специалистов в области обработки металлов резанием. В этом учебнике металлорежущие станки рассматривались, по существу, на интуитивном уровне как совокупности различных механизмов, связывающих источник механической энергии, например, электродвигатель с исполнительными органами (шпинделями, каретками, суппортами, столами, ползунами). А их настройка сводилась к определению скорости главного движения и скорости подачи.

Вероятно, можно утверждать, что парадигма, то есть модель познания станочного оборудования в названной учебной книге обобщила интуитивные знания предшествующих поколений создателей этого оборудования.

Интенсивное развитие станкостроения, увеличение многообразия технологических групп станков со сложными кинематическими связями, повышение требований к точности и производительности станков предопределило объективную необходимость развития ряда научных направлений в станковедении. В итоге в первой половине XX в. начало складываться научное направление, называемое кинематикой металлорежущих станков. Ее основоположником является профессор Московского высшего технического училища (сегодня это Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана) Г. М. Головин. Используя принцип возможных перемещений, известный в теоретической механике как принцип Даламбера, он разработал единую теорию настройки металлорежущих станков, на ее основе ввел в практику учебного процесса курс кинематики металлорежущих станков и разработал соответствующее учебное пособие [2]. Это пособие, по существу, постепенно разделило дисциплину металлорежущие станки на две логически связанные, последовательно изучаемые дисциплины: «Металлорежущие станки» и «Расчет и конструирования металлорежущих станков».

Целевая направленность первой дисциплины – изучение кинематической структуры станочного оборудования, вывод формул настройки для механических органов настройки этого оборудования (гитар сменных зубчатых колес, сменных шкивов и т.д.), расположенных в расчетных цепях, и специфических механизмов, используемых в станочном оборудовании на различных этапах развития станкостроения. Целевая направленность второй дисциплины – теория и практика проектирования станочного оборудования.

По существу, переход от интуитивного подхода в познании и методике преподавания дисциплины «Металлорежущие станки» к подходу, основанному на общепризнанном научном принципе теоретической механики, привел к эволюционной смене парадигмы познания станочного оборудования. Эта парадигма рассматривает кинематическую структуру станка как совокупность составляющих ее кинематических, в том числе расчетных, цепей, связывающих исполнительные органы станка между собой и с источником или источниками механической энергии.

Наряду с этим названная парадигма и в настоящее время используется для объяснения физической сущности работы металлорежущих станков при изучении их не только в средних специальных учебных заведениях (колледжах), но и в ряде высших учебных заведений (университетах).

Определенные сомнения в корректности такого использования теории настройки (более точно данной парадигмы) высказывал ее автор. Описывая работу станка для точения резьбы (червяка) чашечным резцом типа долбяка, он отмечает: «Достоинством здесь оказывается и то обстоятельство, что при выполнении резьбовых работ шаг ( $nt$ ) изготавливаемой резьбы оказывается получающимся независимо от подачи ( $s$ ), при которой производится обработка. Это парадоксальное явление может быть объяснено тем обстоятельством, что возникающий при этом процесс распадается на составляющие его части, одной из которых является копирование инструментом и заготовкой в каждый отдельный момент, независимо от участия в процессе движения подачи, работы червячной передачи, а второй – процесс резания, обеспечиваемый подачей независимо от того, участвует ли инструмент и заготовка в копировании работы червячной передачи или же – нет» [2].

Данное парадоксальное явление, по существу, является противоречием между кинематической структурой технической системы (металлорежущего станка), рассматриваемой на основе принципа возможных перемещений, и функцией (принципом работы) этой системы, основанной на ином законе теоретической механики.

Это противоречие разрешил профессор Московского станкоинструментального института (сегодня это Московский государственный технический университет «СТАНКИН») А. А. Федотенок, разработавший на основе

принципа разветвления энергии движения в механических цепях современную теорию кинематической структуры металлорежущих станков [3]. По этой теории, кинематика станка – это объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит конкретное элементарное (вращательное или поступательное) или сложное, состоящее из элементарных, исполнительное рабочее или вспомогательное движение, характеризующееся вполне определенными настраиваемыми параметрами. В общем случае таких параметров пять: траектория, направление, скорость, исходная точка, путь. Количество параметров, характеризующих конкретное движение, может быть меньше пяти в зависимости от характера движения (простое или сложное) и траектории движения (замкнутая или незамкнутая). При этом основным параметром настройки является траектория, задающая форму воспроизводимой поверхности. По существу, этот параметр дает ответ на вопрос «...участвует ли инструмент и заготовка в копировании работы червячной передачи или же – нет». При этом теория настройки станков кумулятивно, то есть без изменений, вошла в теорию кинематической структуры как ее составная часть.

Теория кинематической структуры металлорежущих станков, основанная на принципе разветвления энергии движения в механических цепях, привела к созданию современной парадигмы познания станочного оборудования. Эта парадигма используется при изучении дисциплины «Металлорежущие станки» в ряде университетов Республики Беларусь и Российской Федерации. На этом основании данную парадигму, вероятно, можно называть университетской.

Методология университетской парадигмы познания металлорежущих станков включает три последовательно изучаемые логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей, понятие о кинематической структуре и функции металлорежущего станка, основы теории настройки металлорежущих станков.

Университетская парадигма познания разрабатывалась на основе анализа кинематических схем известных металлорежущих станков с механическими связями. Вероятно, именно поэтому в учебной литературе для вузов по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» основополагающие понятия парадигмы познания представляются как уже известные, технические решения. Такой подход не стимулирует творческое мышление при создании новых виртуальных технических решений (способов формообразующей обработки) и соответствующих им реальных технических объектов (кинематической структуры металлорежущих станков), являющихся объектами интеллектуальной собственности и защищаемых патентами на изобретения. Данное явление –

противоречие между университетской парадигмой познания и сложившейся методикой ее использования, которое устраняется посредством включения функционального проектирования [4] в методику изучения станочных дисциплин в качестве дополнительной составляющей парадигмы познания. В этом случае, по существу, на лекции или практическом занятии можно проследить путь создания (проектирования или изобретения) реального технического объекта – кинематической структуры металлорежущего станка.

В последующих разделах излагается достаточно подробная версия университетской парадигмы познания металлорежущих станков. На конкретных примерах показывается, что изложенные научные положения парадигмы приемлемы при анализе и синтезе кинематической структуры металлорежущих станков с механическими, механико-гидравлическими и мехатронными связями.

Таким образом, цель предлагаемой работы – дать наиболее полное представление об университетской парадигме познания металлорежущих станков. Вероятно, что основополагающие положения, рассмотренные в данной работе, могут быть распространены на иные технологические машины машиностроительного комплекса, например, на кузнечно-прессовое и литейное оборудование.

# ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

## 1.1 Понятие о характеристическом образе инструмента

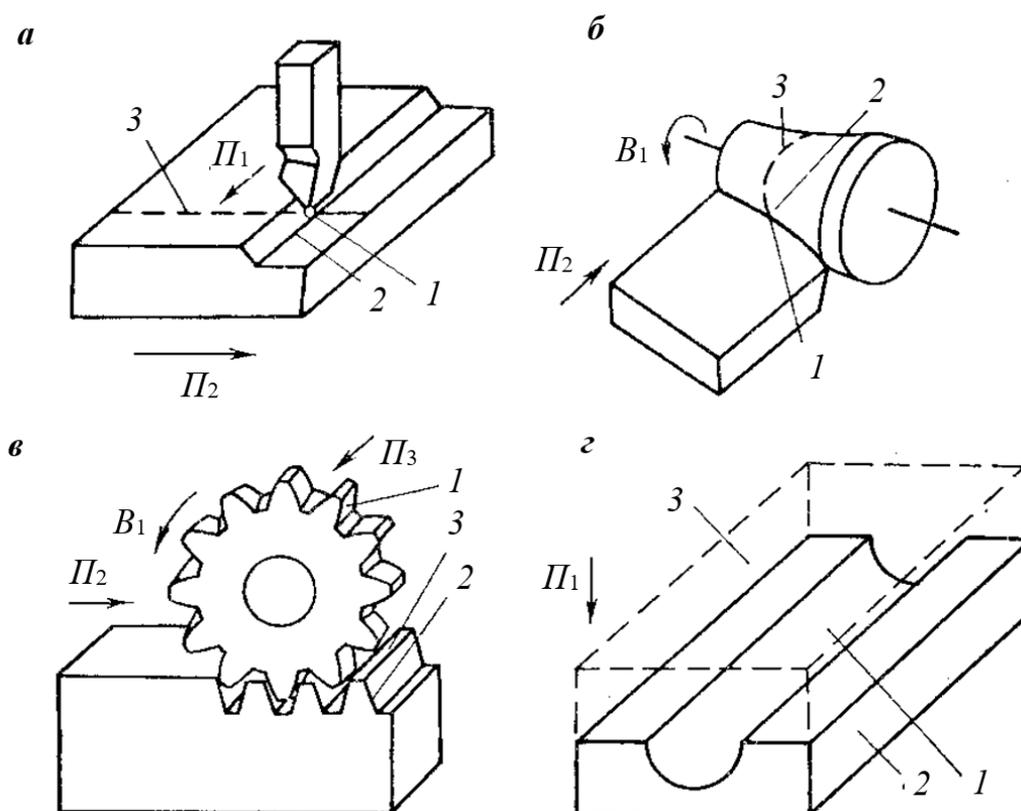
Форма любой детали есть замкнутое пространство, ограниченное реальными геометрическими поверхностями, которые образованы в результате обработки тем или иным технологическим способом: резанием, штамповкой, литьем, наплавкой и т.д. При этом, какой бы способ формообразующей обработки ни был применен, реальные поверхности детали всегда отличаются от идеальных геометрических поверхностей, которыми мысленно оперируют при конструировании изделий. Реальные поверхности, полученные на технологическом оборудовании, в том числе на металлорежущих станках, отличаются от идеальных формой, размерами и шероховатостью. Теоретически процесс формообразования реальных поверхностей на технологическом оборудовании аналогичен процессу формирования идеальных поверхностей в проективной геометрии, то есть базируется на идеальных геометрических представлениях. Таким образом, формообразование реальной поверхности в металлообработке любым способом представляет собой, по существу, процесс образования соответствующей геометрической поверхности, под которой (по Г. Монжу) обычно понимают след, оставляемый одной производящей линией, называемой образующей, при ее движении по другой производящей линии – направляющей. Производящие линии реальных поверхностей создаются при помощи вспомогательных элементов [3], материализованных на рабочей части инструмента. Вспомогательным элементом могут быть материальная точка, линия или некоторая поверхность (рисунок 1.1).

При строгании плоскости вспомогательным элементом (рисунок 1.1, *a*) является точка  $I$  – вершина резца. Обе воспроизводящие линии (образующая  $2$  и направляющая  $3$ ) в этом случае воспроизводятся соответственно движением  $P_1$  резца и движением  $P_2$  заготовки.

Вспомогательный элемент – линия – по форме и протяженности может соответствовать форме и протяженности образуемой линии. При точении фасонной поверхности (рисунок 1.1, *б*) режущая кромка  $I$  резца является копией образующей  $2$  получаемой поверхности. В этом случае воспроизведение образующей происходит без движения формообразования, необходимо только установочное движение  $P_2$  для перемещения вспомогательного элемента в исходное положение. Направляющая  $3$  воспроизводится движением  $V_1$  заготовки.

Вспомогательный элемент – линия – по форме и протяженности может не соответствовать форме и протяженности образуемой линии. Например, при долблении зубчатой рейки (рисунок 1.1, *в*) режущая кромка 1 долбяка представляет собой последовательно чередующиеся дуги окружностей, левой и правой эвольвент, а воспроизводимая во время обработки направляющая 2 зубчатой поверхности рейки – ломаную линию. Направляющая 2 в этом случае получается качением  $B_1$  долбяка, согласованным с поступательным движением  $\Pi_2$  заготовки. Образующая 3 воспроизводится движением  $\Pi_3$  долбяка.

Вспомогательный элемент – поверхность – по форме и протяженности соответствует образуемой поверхности. Например, при штамповке рабочая поверхность 1 инструмента (матрицы 2 и пуансона 3) является копией воспроизводимой поверхности (рисунок 1.1, *г*). В этом случае образование поверхности происходит без движений формообразования. Необходимо только установочное движение  $\Pi_1$  для перемещения вспомогательного элемента в конечное положение.



*а* – точка; *б* – линия, по форме и протяженности аналогичная воспроизводимой линии; *в* – линия, соответствующая боковой стороне зуба; *г* – поверхность, соответствующая воспроизводимой поверхности.

**Рисунок 1.1. – Виды вспомогательных элементов, материализованные на рабочей части инструмента**

Отметим, что в приведенной геометрической интерпретации образования реальной поверхности темп воспроизведения образующей выше темпа воспроизведения направляющей. Поэтому во всех последующих рассуждениях, когда речь будет идти о схемах образования поверхностей, первой будем указывать образующую, а затем – направляющую получаемой поверхности.

Различные инструменты (например, токарный резец) имеют один вспомогательный элемент, другие (например, фреза или многошариковая раскатка) – несколько расположенных последовательно вспомогательных элементов. Будем рассматривать вспомогательный элемент как множество материальных точек  $M_3$ . Тогда в общем виде совокупность вспомогательных элементов любого инструмента – это вполне определенный класс  $P$  множеств  $M_3$ :

$$P = \{M_3\}_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k). \quad (1.1)$$

В работе [5] класс  $P$  назван характеристическим образом инструмента, так как именно этот класс определяет поведение производящих линий в процессе формообразования реальных поверхностей.

Характеристический образ резца содержит одно множество  $M_3$  материальных точек, мощность которого у острозаточенного резца (см. рисунок 1.1, а) равна единице (точка – вершина резца). При строгании широким резцом мощность множества  $M_3$  больше единицы и равна мощности ширины получаемой строки. Мощность множества  $M_3$  фасонного резца (см. рисунок 1.1, б) равна мощности образующей обрабатываемой поверхности. Характеристический образ зуборезного долбяка (см. рисунок 1.1, в) есть  $K$ -элементный класс равномошных множеств  $M_3$ . Характеристический образ штампа для объемной штамповки (см. рисунок 1.1, г) – декартово произведение

$$P_{шт} = \{M_{эо} \times M_{эн}\},$$

где  $M_{эо}$  и  $M_{эн}$  – однопараметрические множества, мощность которых равна соответственно мощности образующей и направляющей получаемой поверхности.

Понятие о характеристическом образе определено применительно к инструменту, посредством которого осуществляют воздействие на твердое тело. Однако в формообразующей обработке значительную группу составляют способы, в которых воздействие на твердое тело осуществляют посредством объекта, мало напоминающего инструмент в традиционном его представлении. Например, при дробеструйной обработке поверхностным пластическим деформированием функцию инструмента выполняет струя дроби. Известны также способы формообразующей обработки, в которых функцию инструмента выполняет какое-либо физическое явление. Например, при лазерном сверлении отверстий сверхмалого диаметра (к примеру, капиллярных) сфоку-

сированный луч, прожигая твердое тело в течение какого-то времени, образует в нем заданное цилиндрическое отверстие. Окружность, ограничивающая сфокусированный луч, является характеристическим образом. Его отображение на обрабатываемой заготовке – одновременно воспроизведенная образующая. Перемещение образующей вдоль получаемой поверхности воспроизводит направляющую – прямую линию. Таким образом, характеристический образ лазерного луча есть множество  $M_3$ , мощность которого равна образующей получаемой поверхности.

В таблице 1.1 приведен ряд инструментов в традиционном понимании, а также ряд объектов, заменяющих инструмент, с указанием мощности их характеристических образов. В фигурных скобках дана мощность отдельного вспомогательного элемента, индекс при скобках обозначает их количество. Для некоторых инструментов приведены не конкретные значения, а буквенные. Буква  $E$  обозначает, что мощность характеристического образа равна мощности воспроизводимой линии,  $M_3$  – мощность характеристического образа больше единицы, но меньше воспроизводимой линии,  $K$  – целое число, обозначающее количество вспомогательных элементов инструмента. Такая неопределенность объясняется тем, что есть инструменты, которые характеризуются большим разнообразием конструкций, например, зуборезные долбяки имеют различное число режущих зубьев, то есть вспомогательных элементов.

Таблица 1.1. – Мощность характеристического образа  $P$  некоторых инструментов

Название инструмента	Мощность характеристического образа $P$	Название инструмента	Мощность характеристического образа $P$
Острозаточенный резец	$\{1\}_1$	Червячная фреза	$\{M_3\}_K$
Широкий резец	$\{M_3\}_1$	Деформирующий шарик	$\{M_3\}_1$
Фасонный резец	$\{E\}_1$	Шариковая раскатка	$\{M_3\}_K$
Зубострогальный резец	$\{M_3\}_1$	Штамп для объемной штамповки	$\{E \times E\}_1$
Круглый вращающийся резец	$\{M_3\}_1$	Луч лазера – сверло	$\{E\}_1$
Сверло	$\{1\}_2$	Поле центробежных сил	$\{E \times E\}_1$
Развертка, зенкер	$\{1\}_1$	Поток дроби	$\{1\}_K$
Модульная фреза	$\{E\}_K$	Магнитное формующее поле	$\{E \times E\}_1$
Зуборезный долбяк	$\{M_3\}_K$		

Приведенные примеры, взятые из разных областей формообразующей обработки, позволяют утверждать, что понятие о характеристическом образе инструмента или объекта, заменяющего инструмент, является всеобщим, охватывающим все возможные способы обработки независимо от того, каким образом осуществляется воздействие на твердое тело

## 1.2 Геометрические классы воспроизведения реальных поверхностей

Будем рассматривать образующую и направляющую как вполне определенные множества точек  $M_0$  и  $M_n$ . Тогда можно утверждать, что любая реальная поверхность в произвольный момент времени может быть представлена в виде произведения двух одномерных множеств, каждое из которых является однозначным отображением характеристического образа  $P$  инструмента в множества  $M_0$  и  $M_n$  при относительном перемещении характеристического образа по производящим линиям

$$f: P \rightarrow M_0; \quad f: P \rightarrow M_n.$$

В качестве способа, посредством которого каждому  $x \in P$  ставится в соответствие некоторый элемент из  $M_0$  и  $M_n$ , укажем операцию пересечения множеств  $M_0$  и  $M_n$  с характеристическим образом  $P$  [6]. Следовательно, чтобы рассмотреть конкретные классы образования реальных поверхностей во времени, достаточно проследить, как во времени образуются одномерные множества: образующая и направляющая линии.

Рассмотрим отображение характеристического образа  $P$  в множество  $M$  точек отрезка  $L$  плоской кривой, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки  $O$  на этой кривой как однопараметрическое семейство точек, зависящих от времени  $t$ .

В выражении (1.1)  $i = 1$ . Тогда характеристический образ содержит единственное множество

$$M_0 = \{x\}.$$

Пусть характеристический образ  $P$  непрерывно скользит вдоль кривой  $L$ . Тогда единственному элементу  $x \in M_0$  при его отображении в  $M$  будет непрерывно и однозначно соответствовать образ  $f(x)$  в множестве  $M$ , фиксируясь на отрезке  $OL$  (рисунок 1.2) как возрастающая во времени последовательность

$$A_1 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \tag{1.2}$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при скольжении ( $H_{11}^c$ ).

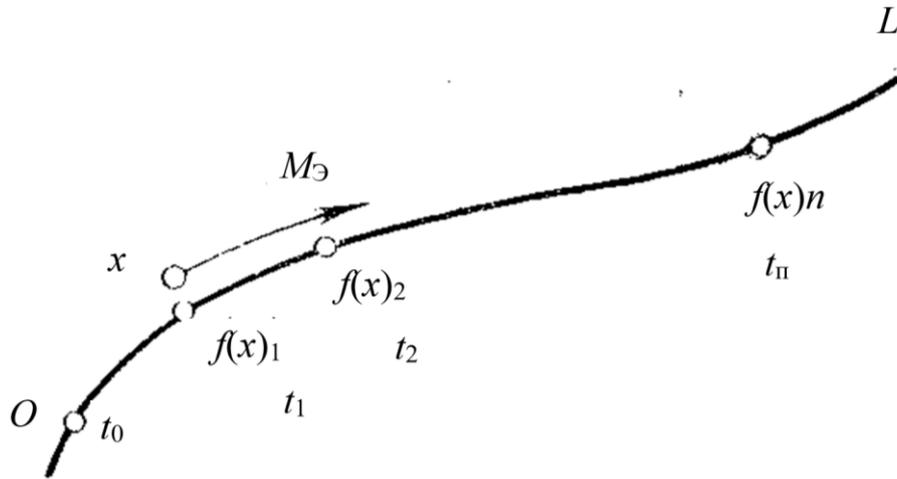


Рисунок 1.2. – Класс образования производящих линий вида  $H_{11}^c$

Пусть характеристический образ  $P$  совершает сложное движение, например, вращается вокруг некоторой точки  $O_1$ , перемещающейся вдоль кривой  $L$  (рисунок 1.3). Тогда элемент  $x \in M_3$  будет отображаться в множество  $M$  через некоторые промежутки времени, определяемые круговой частотой вращения характеристического образа  $P$  относительно точки  $O_1$ . На отрезке  $OL$  будет фиксироваться возрастающая во времени последовательность

$$A_2 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \quad (1.3)$$

Назовем такой вид образования производящей линии прерывистым ( $\Pi_{11}$ ).

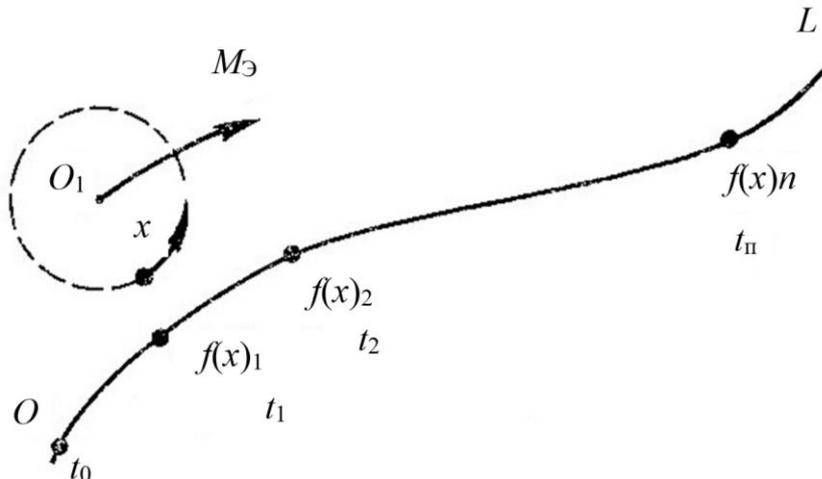


Рисунок 1.3. – Класс образования производящей линии вида  $\Pi_{11}$

Допустим характеристический образ имеет ряд множеств, то есть

$$M_3 = \{x\}_j, \quad (j = 2, 3, \dots, n).$$

Пусть характеристический образ  $P$  обкатывается по кривой  $L$  (рисунок 1.4). Тогда произвольному элементу  $x \in M_3$  при отображении в  $M$  будет однозначно соответствовать образ  $f(x)_j$  в множестве  $M$ . На отрезке  $OL$  образы будут фиксироваться в виде возрастающей во времени последовательности

$$A_3 = \{f(x)_2, f(x)_3, \dots, f(x)_n\}. \quad (1.4)$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при качении ( $H_{1j}^K$ ).

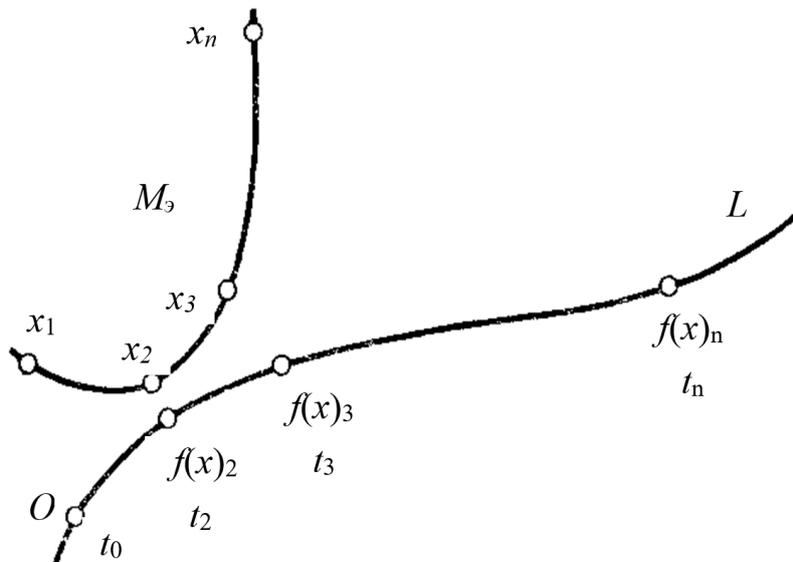


Рисунок 1.4. – Класс образования производящей линии вида  $H_{1j}^K$

При отображении характеристического образа  $P$  одновременно каждому  $x_j \in M_3$  ставится в соответствие  $f(x)_j \in M_3$ . Следовательно, на отрезке  $OL$  (рисунок 2.5) одновременно фиксируется множество

$$A_4 = \{f(x)_j\}, \quad (j = 2, 3, \dots, n). \quad (1.5)$$

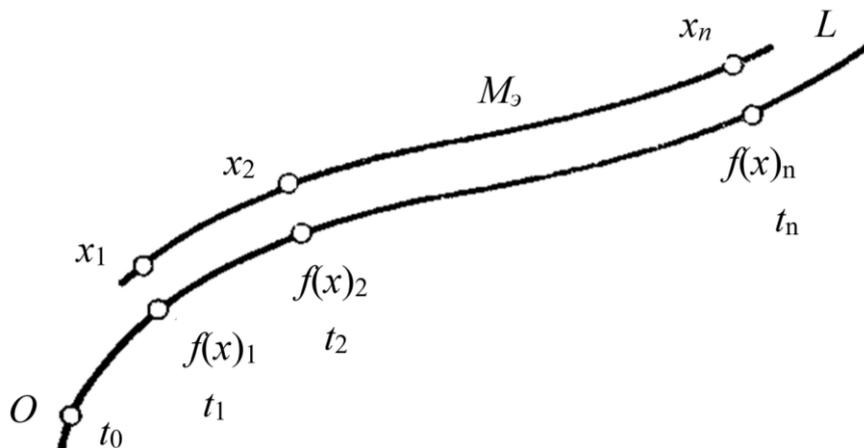


Рисунок 1.5. – Класс образования производящей линии вида  $E$

Таким образом, получим схему единовременного ( $E$ ) образования производящей линии. Характерная особенность данной схемы – зеркальное отображение характеристического образа на множестве  $M$ . Рассматривая линию как поверхность, у которой ширина бесконечно мала, можно воспользоваться также термином «покрытие», который используется в теории множеств.

В выражении (1.1)  $i = 2, 3, \dots, k$ . Тогда характеристический образ  $P$  представляет собой последовательность равномоощных множеств  $M_{\alpha i}$ :

$$M_{\alpha i} = \{X\}.$$

Пусть характеристический образ  $P$  совершает сложное движение – вращается вокруг мгновенного центра  $O_1$ , перемещающегося вдоль кривой  $L$  так, что каждому элементу  $x \in M_{\alpha i}$  будет однозначно соответствовать образ  $f(x)_i \in M$ . На отрезке  $OL$  (рисунок 1.6) через промежутки времени, определяемые частотой вращения  $P$  относительно  $O_1$ , будет фиксироваться возрастающая во времени последовательность семейства одноэлементных образов

$$A_5 = \{f(x)\}_i, \quad (i = 2, 3, \dots, k). \quad (1.6)$$

Назовем такой вид образования производящей линии прерывистым ( $\Pi_{i1}$ ).

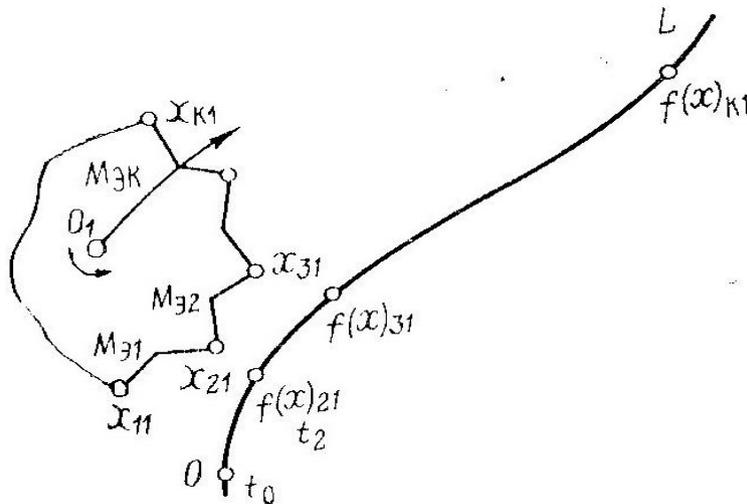


Рисунок 1.6. – Класс образования производящей линии вида  $\Pi_{i1}$

Пусть характеристический образ  $P$  обкатывается по кривой  $L$  так, что каждому  $x_j \in M_{\alpha}$  при отображении в  $M$  взаимно однозначно соответствует образ  $f(x)_{ij}$ . Тогда на отрезке  $OL$  (рисунок 1.7) будет фиксироваться непрерывно возрастающая во времени последовательность

$$A_6 = \{ \{f(x)_{22}, f(x)_{23}, \dots, f(x)_{2n}\} \{f(x)_{32}, f(x)_{33}, \dots, f(x)_{3n}\} \dots, \{f(x)_{k2}, f(x)_{k3}, \dots, f(x)_{kn}\} \}. \quad (1.7)$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при качении ( $H^k_{ij}$ ).

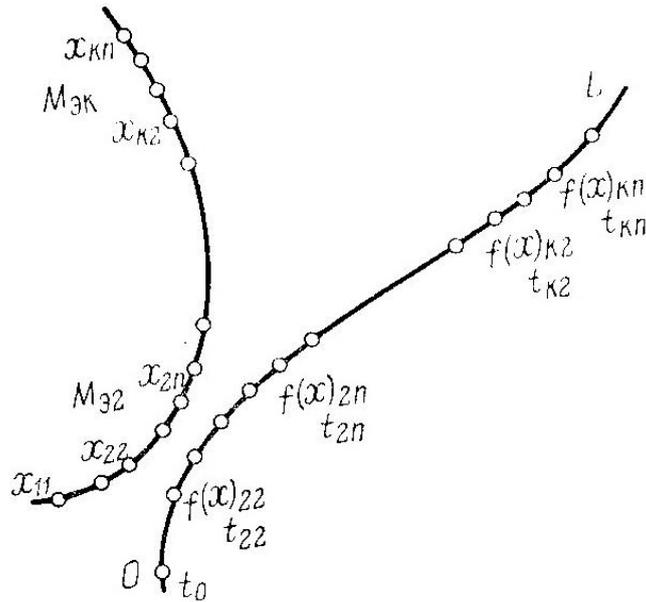


Рисунок 1.7. – Класс образования производящей линии вида  $(H^{k_{ij}})$

Сравнивая схемы образования производящих линий  $H^{k_{1j}}$  и  $H^{k_{ij}}$ , отметим, что они имеют сходную физическую сущность, а индексы при  $H$  отражают структурную особенность характеристического образа  $P$ . Первый индекс обозначает количество вспомогательных элементов, а второй – мощность, то есть протяженность вспомогательного элемента. Следовательно, схемы  $H^{k_{1j}}$  и  $H^{k_{ij}}$  можно считать частными случаями класса  $H^k$ . То же можно отметить и для схем  $\Pi_{11}$  и  $\Pi_{i1}$ , объединяя их в класс  $\Pi$ .

При сравнении схем  $H^{c_{11}}$  и  $H^{k_{ij}}$  видно, что они имеют принципиально различную физическую природу, так как верхний индекс отражает функциональную особенность характеристического образа. Его особенность состоит в том, что в сравниваемых схемах движение характеристического образа принципиально различно. По первой схеме характеристический образ скользит вдоль воспроизводимой линии, а по второй – катится без скольжения.

Будем считать, исходя из условий образования реальных поверхностей, множества (1.2)–(1.7) равномошными, если они рассматриваются на отрезках  $OL$  одинаковой протяженности. Тогда в порядке возрастания теоретической производительности классы образования производящих линий располагаются следующим образом:  $\Pi$ ,  $H^c$ ,  $H^k$ ,  $E$ .

Аналогами полученных классов образования производящих линий являются классы, сформулированные на вербальном языке [3] соответственно касание, след, обкат, копирование.

Сочетая каждый из четырех классов возникновения образующей с каждым из тех же классов возникновения направляющей, получаем 16 теоретически возможных классов образования реальных поверхностей. Их многооб-

разие на вербальном языке и в скобках на языке теории множеств при обработке на металлорежущих станках в порядке возрастания производительности располагаются так: касание – касание ( $\Pi - \Pi$ ), касание – след ( $\Pi - H^C$ ), касание – обкат ( $\Pi - H^K$ ), касание – копирование ( $\Pi - E$ ), след – касание ( $H^C - \Pi$ ), след – след ( $H^C - H^C$ ), след – обкат ( $H^C - H^K$ ), след – копирование ( $H^C - E$ ), обкат – касание ( $H^K - \Pi$ ), обкат – след ( $H^K - H^C$ ), обкат – обкат ( $H^K - H^K$ ), обкат – копирование ( $H^K - E$ ), копирование – касание ( $E - \Pi$ ), копирование – след ( $E - H^C$ ), копирование – обкат ( $E - H^K$ ), копирование – копирование ( $E - E$ ).

Из полученных классов образования реальных поверхностей три практически неосуществимы. Действительно, в теоретических классах  $\Pi - E$ ,  $H^C - E$ ,  $H^K - E$  направляющая производящая линия должна создаваться одновременно, то есть зеркальным отображением характеристического образа. Однако полученная таким образом производящая линия обычно играет роль образующей, так как имеет наиболее высокий темп воспроизведения. Направляющая производящая линия может быть создана зеркальным отображением характеристического образа в том случае, когда образующая производящая линия создается также зеркальным отображением, то есть данный случай соответствует классу  $E - E$  двойного зеркального отображения (покрытия) характеристического образа. Следовательно, в практике формообразующей обработки осуществимы лишь 13 из 16 теоретически возможных геометрических классов образования поверхностей.

### 1.3 Осуществимые классы воспроизведения реальных поверхностей

На рисунке 1.8 приведены примеры, иллюстрирующие осуществимые классы геометрического образования реальных поверхностей. При этом уместно отметить, что приведенные схемы также иллюстрируют пионерные способы формообразующей обработки в машиностроении (виртуальные технические решения), относящиеся к объектам интеллектуальной собственности, защищаемые патентами.

На рисунке 1.8 (*а–в*) показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится прерывисто ( $\Pi$ ).

Так, при планетарном фрезоточении цилиндрической поверхности образующая окружность этой поверхности (рисунок 1.8, *а*) воспроизводится двумя движениями: вращением  $B_1$  заготовки вокруг собственной оси, ее вращением  $B_2$  вокруг оси, параллельной оси заготовки. Направляющая – пря-

мая линия, параллельная оси заготовки, также воспроизводится прерывисто: вращением  $B_3$  резца и его перемещением  $\Pi_4$ . Класс образования поверхности  $\Pi - \Pi$ .

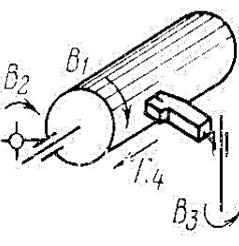
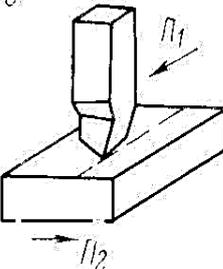
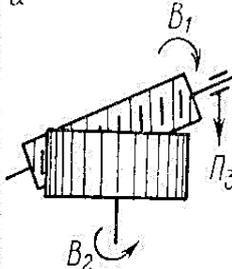
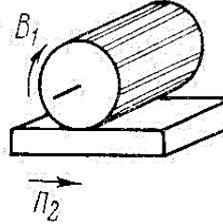
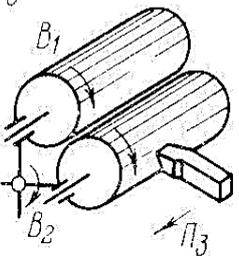
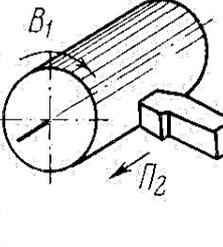
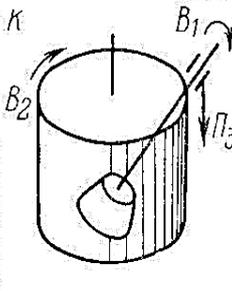
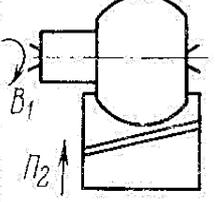
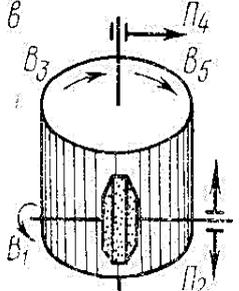
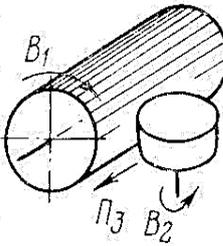
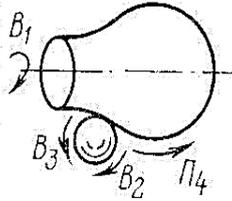
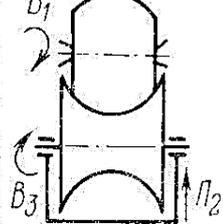
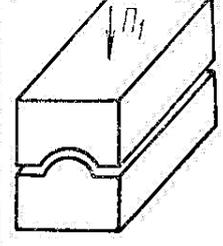
		Классы воспроизведения образующей			
		$\Pi$	$H^C$	$H^K$	$E$
Классы воспроизведения направляющей	$\Pi$	а 	б 	в 	г 
	$H^C$	б 	е 	к 	д 
	$H^K$	в 	ж 	л 	п 
	$E$	з <i>Неосуществим</i>	з <i>Неосуществим</i>	м <i>Неосуществим</i>	р 

Рисунок 1.8. – Классы геометрического образования реальных поверхностей

При планетарном точении цилиндрической поверхности (рисунок 1.8, б) образующая, как и в предыдущем примере, воспроизводится двумя вращениями  $B_1$  и  $B_2$ , а направляющая – скольжением  $\Pi_3$  резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности  $\Pi - H^C$ .

При шлифовании дисковым однониточным кругом с прямолинейным профилем цилиндрического прямозубого колеса (рисунок 1.8, в) образующая (прямая линия) воспроизводится вращением  $B_1$  шлифовального круга и его поступательным перемещением  $П_2$  вдоль образующей, а направляющая (эвольвента) – непрерывно при качении двумя согласованными движениями: вращением  $B_3$  заготовки и ее поступательным перемещением  $П_4$ . Класс образования поверхности  $П – H^K$ .

На рисунке 1.8 (д–ж) показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится непрерывно при скольжении ( $H^C$ ).

Так, при строгании плоскости (рисунок 1.8, д) образующая – прямая линия – воспроизводится поступательным перемещением  $П_1$  резца, а направляющая – также прямая линия – периодическим перемещением  $П_2$  заготовки. Класс образования поверхности  $H^C – П$ .

При точении цилиндрической поверхности детали (рисунок 1.8, е) образующая – окружность – воспроизводится вращением  $B_1$  заготовки, а направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, – непрерывно скольжением  $П_2$  резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности  $H^C – H^C$ .

При точении цилиндрической поверхности детали чашечным вращающимся резцом (рисунок 1.8, ж) образующая, как и в предыдущем примере, воспроизводится вращением  $B_1$  заготовки, а направляющая – качением чашечного резца вдоль заготовки, осуществляемым его вращением  $B_2$  и поступательным перемещением  $П_3$ . Класс образования поверхности  $H^C – H^K$ .

На рисунке 1.8 (и–л) приведены примеры классов образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится непрерывно при качении ( $H^K$ ).

Так, при нарезании цилиндрического прямозубого колеса червячной фрезой (рисунок 1.8, и) образующая – линия, состоящая из упорядоченно расположенных дуг эвольвенты и окружности, – воспроизводится качением (обкатом) из двух согласованных движений: вращения  $B_1$  фрезы и вращения  $B_2$  заготовки, а направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, – вращением  $B_1$  фрезы и ее поступательным перемещением  $П_3$ . Класс образования поверхности  $H^K – П$ .

При зуботочении цилиндрического зубчатого колеса (рисунок 1.8, к) инструментом типа зуборезного долбяка образующая – линия, состоящая из упорядоченно расположенных дуг эвольвенты и окружности, воспроизводится, как в предыдущем примере, согласованными движениями: вращением  $B_1$  инструмента и вращением  $B_2$  заготовки, а направляющая – прямая линия – скольжением  $П_3$  инструмента вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности  $H^K – H^C$ .

При обкатывании фасонной детали шариком (рисунок 1.8, л) образующая – окружность – воспроизводится качением шарика по этой окружности движением  $B_1$  заготовки и  $B_2$  шарика, а направляющая – кривая линия – качением шарика движениями  $B_3$  вращения шарика и  $P_4$  его перемещения вдоль кривой, эквидистантной к направляющей. Класс образования поверхности  $H^K - H^K$ .

Последняя группа примеров (рисунок 1.8, н-р) иллюстрирует классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится одновременно ( $E$ ) как зеркальное отображение характеристического образа. Этой группе образования поверхностей воспроизведение образующей движений не требуется.

При фрезеровании плоскости цилиндрической фрезой (рисунок 2.8, н) направляющая – прямая линия – воспроизводится прерывисто вращением  $B_1$  фрезы и поступательным перемещением  $P_2$  заготовки. Класс образования поверхности  $E - P$ .

При точении фасонным резцом (рисунок 1.8, о) направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при скольжении вращением  $B_1$  заготовки. Класс образования поверхности  $E - H^C$ .

При обкатывании полноконтактным роликом фасонной поверхности (рисунок 1.8, н) направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при качении вращением  $B_1$  заготовки и вращением  $B_2$  ролика. Класс образования поверхности  $E - H^K$ .

При объемной штамповке (рисунок 1.8, р) направляющая, как и образующая, воспроизводится одновременно ( $E$ ) как зеркальное отображение характеристического образа. Следовательно, для образования поверхности движений не требуется. Класс образования поверхности  $E - E$ . Отметим, что движение закрывания штампа не является формообразующим, оно только подготавливает формообразование. В станковедении такое движение называют движением врезания. В других отраслях знания это движение не имеет определенного названия.

#### 1.4 Классификация движений в металлорежущих станках

Все движения в станках принято называть исполнительными. По целевому признаку их можно разделить на движения: формообразования  $\Phi$ , врезания  $Bp$ , деления  $D$ , позиционирования  $Pз$ , управления  $Uпр$ , вспомогательные  $Bс$ .

*Формообразование  $\Phi$*  – согласованные относительные движения заготовки и режущего инструмента, которые непрерывно создают производящие линии, и, следовательно, поверхность заданной формы. В зависимости от формы производящей линии и класса ее образования движения формообразования могут быть простыми (элементарными) и сложными. К простым движениям формообразования относят вращательное –  $\Phi(B)$  и прямолинейное –  $\Phi(\Pi)$ .

Сложными формообразующими движениями являются те, траектории которых образуются в результате согласованности функционально связанных двух и более вращательных или прямолинейных движений, а также их сочетаний. Примеры условной записи сложных формообразующих движений:  $\Phi(B_1B_2)$ ,  $\Phi(B_1\Pi_2)$ ,  $\Phi(B_1\Pi_2\Pi_3)$  и т.п. Такая запись двух и более элементарных движений указывает на то, что они функционально связаны и тем самым создают единое сложное двухэлементарное, трехэлементарное и т.п. движение. Примером сложного двухэлементарного движения является движение  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящее профиль зубьев при зубофрезеровании червячной фрезой (см. рисунок 1.8, и).

*Врезание  $Vp$*  – движение инструмента или заготовки, устанавливающее их в процессе резания в исходное для процесса формообразования положение. Примером движения врезания является движение  $Vp(\Pi_2)$  при точении сферической поверхности (см. рисунок 1.8, о).

*Деление  $D$*  – движение, перемещающее траекторию движения формообразования на определенную, в большинстве случаев постоянную, величину для образования нескольких одинаковых по форме поверхностей. Например, при шлифовании цилиндрического зубчатого колеса дисковым шлифовальным кругом (см. рисунок 1.8, в) после шлифования очередной впадины движением  $D(B_5)$  обрабатываемую заготовку поворачивают на угловой шаг зубьев.

Движения деления могут быть периодическими или непрерывными, что зависит в основном от конструкции режущего инструмента. В приведенном примере это движение периодическое. Непрерывные движения деления по своей структуре совпадают с одним из формообразующих движений, которое выполняет одновременно процессы формообразования.

*Позиционирование  $\Pi_3$*  – движение, обеспечивающее перемещение траектории движений формообразования и врезания в новое геометрическое положение.

К движениям управления ( $Upr$ ) относят те, которые совершают органы управления, регулирования и координации всех других исполнительных движений станка. К таким органам относятся муфты, реверсивные механизмы, кулачки, ограничители хода и др.

К вспомогательным движениям (*Вс*) относят движения, обеспечивающие установку, зажим, освобождение, транспортирование заготовки и режущего инструмента в зону обработки, охлаждение, смазывание, удаление стружки, правку инструмента и т.п.

Определяющую роль в формировании кинематической структуры станка играют движения формообразования, врезания и деления. Эти движения требуют точной настройки.

В общем случае любое исполнительное движение в станке характеризуется пятью параметрами пространства и времени: траекторией, скоростью, направлением, путем и исходным положением или исходной точкой. Наиболее важными параметрами любого движения являются траектория и скорость. Параметр траектория определяет точность формы воспроизводящих линий и, как следствие, воспроизводимой поверхности, а параметр скорость – темп воспроизведения поверхности.

В зависимости от характера исполнительного движения, формы его траектории, схемы резания, вида и конструкции инструмента теоретически движение может настраиваться по двум, трем, четырем или пяти параметрам. Наибольшее число параметров настройки потребуется лишь сложному движению с незамкнутой траекторией. По четырем параметрам (за исключением настройки на траекторию) осуществляется настройка простого движения с незамкнутой траекторией, по трем параметрам (на траекторию, скорость и направление) – сложное движение с замкнутой траекторией.

## ГЛАВА 2. ТЕОРИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

### 2.1 Понятие о кинематической структуре и функции металлорежущих станков

Парадигма познания технологического оборудования, в том числе металлорежущих станков, это не только изучение кинематической структуры оборудования, но и его синтез, то есть проектирование кинематической или кинематико-компоновочной структуры. Синтез – это функциональное проектирование реального технического решения (кинематической структуры металлорежущего станка) по заданному функциональному назначению или по закону его функционирования, задаваемому виртуальным техническим решением, то есть способом формообразующей обработки. В учебном процессе при изучении основополагающих понятий о кинематической структуре и функции металлорежущих станков предпочтительно использование закона функционирования реального технического решения, получаемого на основе анализа виртуального технического решения – способа формообразующей обработки. В этом случае функциональное проектирование пересекается с научно-технической экспертизой изобретений, так как позволяет проследить путь создания, или «изобретения» кинематической структуры металлорежущего станка, при определенных условиях защищаемого патентом.

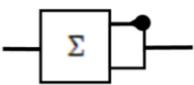
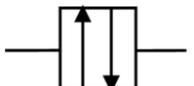
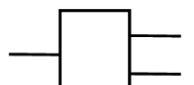
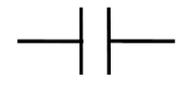
Процесс функционального проектирования носит итерационный характер, то есть от этапа к этапу, начиная с анализа соответствующего способа формообразующей обработки, последовательно приближает к решению поставленной задачи. Методику функционального проектирования рассмотрим на примерах токарной обработки. При этом для изображения структурных схем металлорежущих станков будем использовать условные обозначения конструктивных элементов этих схем (таблица 2.1).

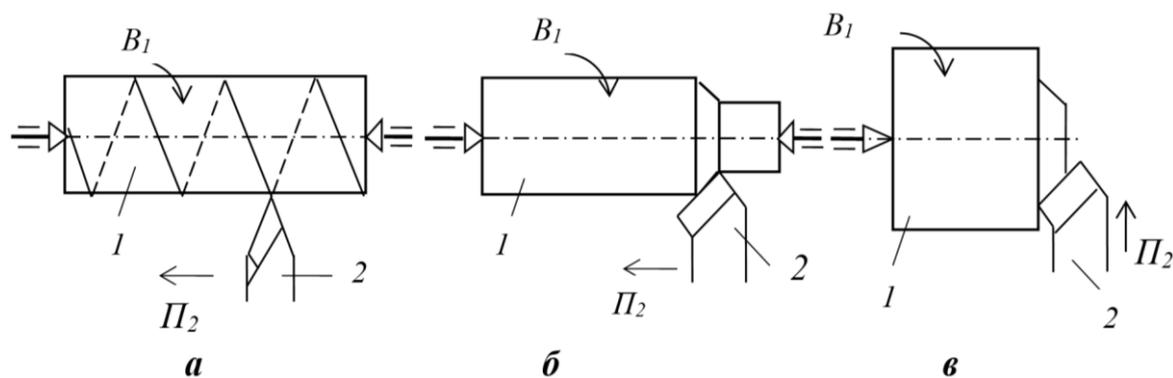
*На первом этапе* анализируем способы формообразующей обработки, подлежащие реализации в кинематической структуре станка.

На рисунке 2.1, *а* показана схема пионерного способа нарезания резьбы фасонным резцом. Характеристический образ фасонного резца  $\{E\}_1$ . По этой схеме заготовке  $1$ , определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу  $2$ , профиль которого соответствует профилю нарезаемой резьбы, – поступательное движение  $P_2$ , согласо-

ванное с движением  $B_1$  заготовки. Класс образования резьбы (винтовой поверхности) копирование – след ( $E - H^C$ ). Причем сложное исполнительное движение  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , состоящее из двух согласованных между собой элементарных движений (вращательного  $B_1$  и поступательного  $\Pi_2$ ) воспроизводит направляющую (винтовую линию) обрабатываемой поверхности. Следовательно, частная винторезная структура станка должна выполнять только одно сложное формообразующее движение  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , состоящее из функционально связанных простых (элементарных) движений  $B_1$  и  $\Pi_2$ .

Таблица 2.1. – Условные обозначения элементов структурных схем

Элемент	Название элемента	Элемент	Название элемента
	Суммирующий механизм		Механическая кинематическая связь между элементами структурной схемы
	Реверсивный механизм		Немеханическая связь между элементами структурной схемы
	Переключающий механизм		Орган настройки с постоянным передаточным отношением
	Соединительная муфта		Орган настройки с переменным передаточным отношением



***a* – нарезание резьбы; *б* – точение цилиндрической поверхности; *в* – точение торцевой поверхности.**

**Рисунок 2.1. – Схемы способов формообразующей обработки**

На рисунке 2.1, *б* приведена схема пионерного способа механической обработки цилиндрической поверхности острозаточенным резцом. Характеристический образ острозаточенного резца  $\{I\}_1$ . По этой схеме заготовке  $I$ ,

ориентированной в пространстве так же, как в предыдущей схеме, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 – поступательное движение  $P_2$ . Класс образования поверхности след – след ( $H^C - H^C$ ). При этом элементарное движение  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую геометрической поверхности (окружность), а элементарное движение  $\Phi_s(P_2)$  – направляющую (прямую линию, параллельную оси заготовки). Следовательно, частная токарная структура станка для продольного точения должна выполнять два простых (элементарных) формообразующих движений  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(P_2)$ .

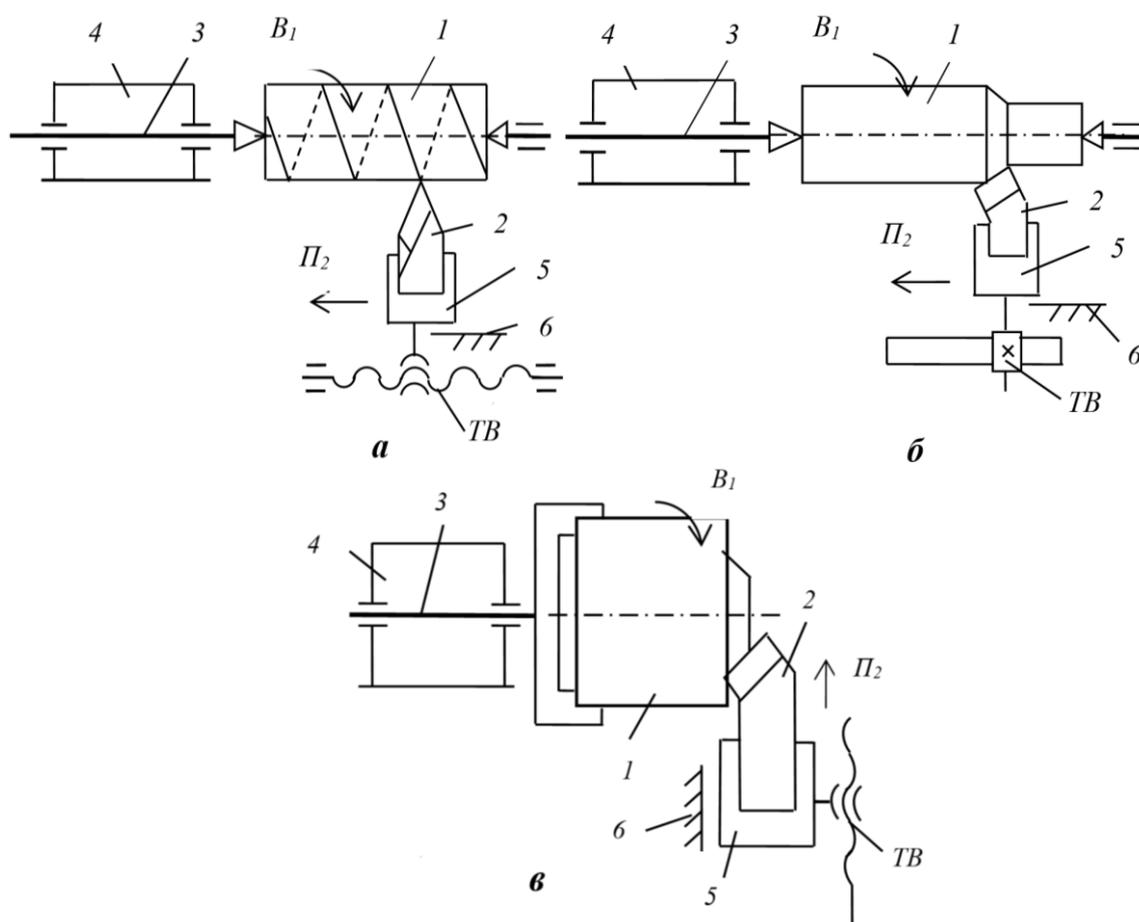
На рисунке 2.1, в приведена схема способа обработки, используемая для проточки торцов деталей типа фланцев, при проточке канавок, снятии фасок и отрезке. По этому способу заготовке 1, ориентированной в пространстве так же, как при нарезании резьбы и при продольном точении, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 – поступательное движение  $P_2$ , перпендикулярно оси заготовки. Характеристический образ инструмента  $\{I\}_1$ . Класс образования поверхности след – след ( $H^C - H^C$ ). При этом элементарное движение  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую геометрической поверхности (окружность), а элементарное движение  $\Phi_s(P_2)$  – направляющую (прямую линию, перпендикулярную оси заготовки). Следовательно, частная кинематическая структура станка для поперечного точения должна выполнять два простых формообразующих движения  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(P_2)$ .

Для рассматриваемых способов формообразующей обработки характерно одинаковое относительное положение траектории движения  $B_1$ , а траектории движений  $P_2$  расположены в одной плоскости. Одинаково также абсолютное геометрическое положение взаимодействующих объектов – заготовки и инструмента в горизонтальной плоскости. На этом основании устанавливаем технологическую компоновку проектируемых частных кинематических структур, или расположение исполнительных органов (подвижных блоков). Такими органами являются блок шпинделя (передняя бабка), несущий заготовку, и инструментальный блок (суппорт), несущий резец.

*На втором этапе* осуществляем графическое оформление (рисунок 2.2) исполнительных органов (подвижных блоков).

Для проектируемых структурных схем исполнительные органы, несущие заготовку 1 и резец 2, конструктивно одинаковы и, следовательно, взаимозаменяемы. Исполнительный орган, несущий заготовку 1, представляет собой шпиндель 3, смонтированный с возможностью вращения  $B_1$  в стационарном блоке 4, называемом передней бабкой. Исполнительный орган, несущий резец 2 (рисунки 2.2, а, и 2.2, б), – это подвижный блок 5, называемый продольным суппортом (кареткой), смонтированным с возможностью поступательного перемещения  $P_2$  по направляющим 6 параллельно линии цен-

тров станка. Поступательное перемещение суппорта обеспечивается посредством тягового вала (*ТВ*). По сложившейся традиции в токарно-винторезных станках с механическими связями в частной кинематической структуре для нарезания резьбы (см. рисунок 2.2, *а*) в качестве *ТВ* используют передачу винт – гайка. А в частной кинематической структуре для точения цилиндрической поверхности (см. рисунок 2.2, *б*) в качестве *ТВ* – передачу зубчатое колесо – рейка. В современных токарно-винторезных станках с ЧПУ в обеих названных структурах используют, как правило, передачу винт – гайка с телами качения.



*а* – для нарезания резьбы; *б* – для точения цилиндрической поверхности;  
*в* – для точения торцевой поверхности.

**Рисунок 2.2. – Исполнительные органы структурных схем**

Исполнительный орган (рисунок 2.2, *в*), несущий резец 2, – это подвижный блок 5, называемый поперечным суппортом, смонтированным с возможностью поступательного перемещения  $\Pi_2$  по направляющим 6 продольного суппорта (каретки) перпендикулярно линии центров станка. Поступательное перемещение  $\Pi_2$  поперечного суппорта обеспечивается посредством тягового вала *ТВ* (передача винт – гайка).

На третьем этапе решаем вопрос о количестве источников механической энергии, выполняем графическое оформление связей между источниками механической энергии и исполнительными органами, устанавливаем органы настройки параметров исполнительных движений.

Для создания траектории сложного исполнительного движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , воспроизводящего на заготовке 1 направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы (рисунок 2.3), соединяем шпиндель 3, смонтированный в подшипниках передней бабки 4, с ТВ каретки 5, несущей резец 2, посредством жесткой кинематической связи в виде штриховой линии 6–7. Эта связь, состоящая из последовательно соединенных передач, накладывает ограничения на шпиндель 3 и каретку 5, не позволяющие им занимать произвольные положения относительно друг друга и иметь произвольные скорости. Данная связь (структурная или кинематическая цепь) создает потенциальную возможность винтового движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ . Для реализации этой возможности соединяем произвольное промежуточное звено 9 связи 6–7 с электродвигателем  $M$  (кинематическая связь 8–9).

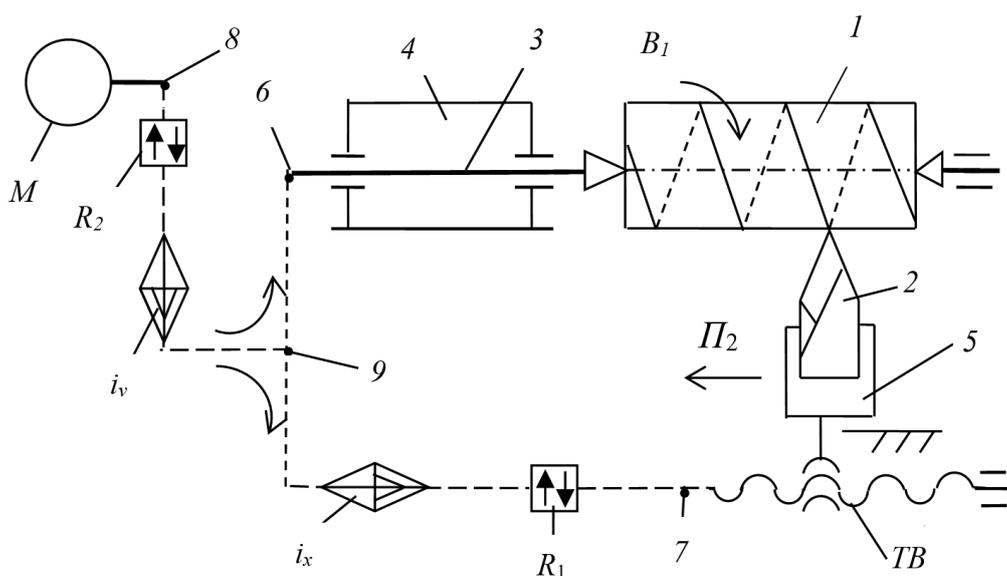


Рисунок 2.3. – Частная структурная схема станка для нарезания резьбы

При включении электродвигателя энергия движения по кинематической связи 8–9 будет сообщаться через звено 9 в кинематическую связь 6–7. Это вызовет вращение  $B_1$  шпинделя, несущего заготовку, и продольное перемещение  $\Pi_2$  каретки, несущей резец. В итоге характеристический образ резца будет совершать относительно заготовки винтовое движение  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ . При этом соотношение элементарных движений  $B_1$  и  $\Pi_2$  зависит только от произведения передаточных отношений передач, образующих кинематическую связь 6–7. Таким образом, эта связь при функционировании имитирующая

передачу винт – гайка будет обеспечивать качественную характеристику движения  $\Phi_v(B_1P_2)$ , то есть его траекторию. Кинематическая связь, воспроизводящая траекторию исполнительного движения, называется внутренней связью. Количественную характеристику исполнительного движения, то есть скорость (темп) воспроизведения направляющей винтовой поверхности, обеспечивает кинематическая связь 8–9. Такую связь принято называть внешней связью. Внутренняя и внешняя связи имеют общее звено 9, называемое звеном соединения связей.

Совокупность источника энергии движения исполнительных органов, внутренней и внешней связей принято называть *кинематической группой* [3], с названием, соответствующим названию движения, которое создает эта группа.

Сложное винтовое движение  $\Phi_v(B_1P_2)$  имеет незамкнутую траекторию. Следовательно, оно должно настраиваться по всем пяти параметрам. Для этого во внутреннюю связь установим два органа настройки:  $i_x$  и  $R_1$ . Посредством первого из них настраивают шаг нарезаемой резьбы, а посредством второго – возможность нарезания левой или правой резьбы. Во внешней связи установим орган настройки на скорость  $i_v$  воспроизведения направляющей и технологический реверс  $R_2$ , предназначенный для реверсирования движения формообразования при многопроходной обработке в исходное положение или при задании направления нарезания резьбы к передней бабке или от нее.

Расположение звена соединения связей 9 имеет принципиальное значение и зависит от расчетной цепи для органа настройки  $i_v$ . Элементарные движения  $B_1$  и  $P_2$ , образующие сложное винтовое движение  $\Phi_v(B_1P_2)$ , всегда одновременны и одинаковы по продолжительности. Это позволяет оценивать скорость сложного исполнительного движения через скорость одного из входящих в него элементарных движений. По сложившейся традиции в теории резания это движение исполнительного органа, имеющего большую скорость и потребляющего большую мощность. В рассматриваемой структурной схеме это шпиндель 3. Следовательно, звено соединения связей 9 целесообразно располагать между шпинделем 3 и органом настройки на траекторию  $i_x$ .

Органы настройки исполнительного движения на путь и исходную точку, как правило, на схемах не показывают. Регулирование этих параметров на станках с ручным управлением обычно осуществляют вручную по лимбам (упорам), на станках-автоматах с механическими связями – жесткими программноносителями (кулачками), на станках, оснащенных системами ЧПУ, программно, например, непосредственно на дисплее устройства ЧПУ.

Описание связей структурной схемы винторезного станка, состоящего из одной сложной формообразующей группы, приведено на вербальном языке. При системном анализе и синтезе кинематической структуры следует отдать предпочтение языку символов, так как это обеспечивает большую наглядность и компактность описания. Приведем описание рассмотренной кинематической структуры станка на языке символов, используемом в научной литературе по станковедению [3; 4] и в учебной литературе для вузов.

Внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 6 \leftarrow 9 \rightarrow i_x \rightarrow R_1 \rightarrow 7 \rightarrow TB \rightarrow 5 \rightarrow \Pi_2.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow 8 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 9.$$

Разнонаправленные стрелки в описании внутренней связи показывают направление разветвления энергии движения после звена соединения связей 9 по обеим ветвям внутренней связи.

Выше при анализе способов обработки было показано, что кинематическая структура станка для обработки цилиндрической поверхности должна выполнять два простых (элементарных) формообразующих движения  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(\Pi_2)$ . На основе исполнительных органов (см. рисунок 2.2, б) спроектируем формообразующие группы, выполняющие эти движения, и объединим их в частную структурную схему токарного станка с общим электродвигателем (рисунок 2.4). Обычно внутренняя связь простой кинематической группы – это вращательная или поступательная кинематическая пара. В этом случае траектория исполнительного движения (окружность или прямая линия) обеспечивается конструкцией исполнительного органа.

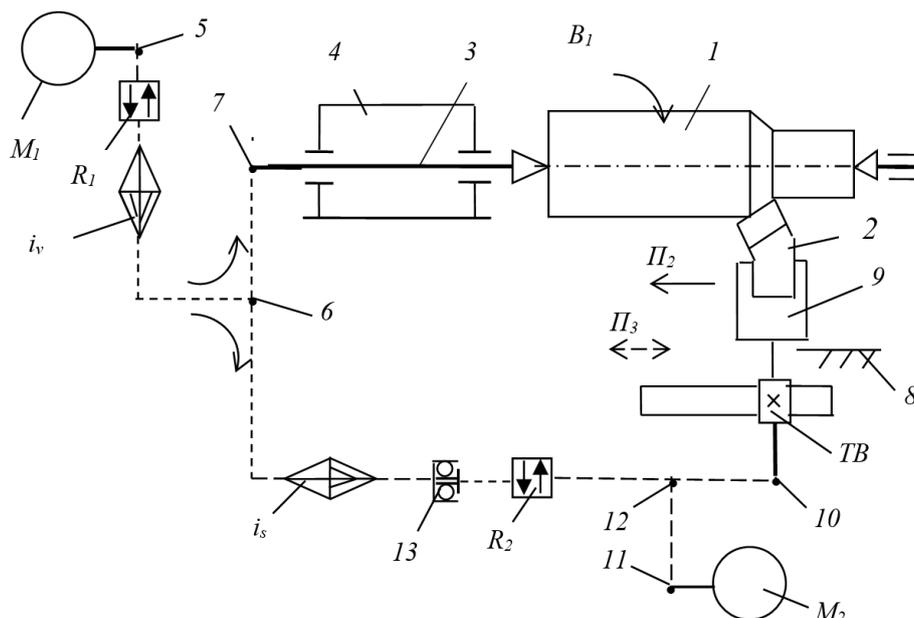


Рисунок 2.4. – Частная структурная схема станка для обработки цилиндрической поверхности

Группа  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую (окружность) цилиндрической поверхности. Ее внутренняя связь – вращательная кинематическая пара *корпус передней бабки 4* → *шпиндель 3, несущий заготовку 1* ( $B_1$ ).

Эта связь создает потенциальную возможность движения  $\Phi_v(B_1)$  и обеспечивает его качественную характеристику, то есть траекторию. Соединим вращающееся звено внутренней связи (шпиндель 3) посредством кинематической связи 5–6–7 с электродвигателем  $M_1$ . Вращательное движение  $B_1$  имеет замкнутую траекторию и настраивается по двум параметрам – на скорость воспроизведения образующей и направление. Поэтому установим в указанной связи соответствующие органы настройки  $i_v$  и  $R_1$ .

Таким образом, внешняя связь группы  $\Phi_v(B_1)$  будет иметь вид:

$$M_1 \rightarrow 5 \rightarrow R_1 \rightarrow i_v \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow \text{шпиндель 3 } (B_1).$$

Группа  $\Phi_s(P_2)$  воспроизводит направляющую (прямую линию) цилиндрической поверхности. Внутренняя связь этой группы – поступательная кинематическая пара

*направляющие 8 станины станка* → *каретка 9, несущая резец 2* ( $P_2$ ).

Эта связь создает потенциальную возможность движения  $\Phi_s(P_2)$  и обеспечивает его качественную характеристику, то есть траекторию.

Соединим  $TB$  (зубчато-реечная передача), преобразующий вращательное движение ведущего звена (реечное колесо) в поступательное движение каретки 9 посредством кинематической связи 5–6–10 с электродвигателем  $M_1$ . Поступательное движение  $P_2$  каретки имеет незамкнутую траекторию и должно настраиваться по четырем параметрам. Поэтому установим в этой связи орган настройки  $i_s$  на скорость воспроизведения направляющей и орган настройки  $R_2$  на направление движения. Настройку на путь и исходную точку (исходное положение) осуществляют, как и в винторезной структуре, по упорам.

Таким образом, внешняя связь группы  $\Phi_s(P_2)$  будет иметь вид:

$$M_1 \rightarrow 5 \rightarrow R_1 \rightarrow i_v \rightarrow 6 \rightarrow i_s \rightarrow R_2 \rightarrow TB \rightarrow \text{каретка 9 } (P_2).$$

В частной структуре токарного станка обе формообразующие группы соединены через общий электродвигатель  $M_1$  и межгрупповую связь (общую часть внешних связей 5–6 обеих групп). В токарных станках с общим электродвигателем по традиции, сложившейся задолго до создания теории кинематической структуры, принято скорость подачи задавать относительно одного оборота шпинделя. По существу, скорость воспроизведения направляющей (прямой, параллельной оси воспроизводимой поверхности) задается относительно абсолютной скорости воспроизведения образующей (окружности). В этом случае проявляется противоречие между понятием функции кинема-

тической структуры станка и его настройкой. В токарных станках с ЧПУ, оснащаемых отдельным приводом групп скорости резания и подачи, такого противоречия нет. При проектировании в этих станках скорость подачи воспроизведения направляющей задается абсолютным значением.

В кинематической структуре современных токарных станков для ускоренного перемещения (позиционирования) каретки используется ненастраиваемая вспомогательная группа с приводом от отдельного электродвигателя. Встроим такую группу в проектируемую структурную схему. Для этого электродвигатель  $M_2$  соединим с  $TB$  и во внешнюю связь группы  $\Phi_s(\Pi_2)$  между органом настройки  $i_s$  и реверсом  $R_2$  установим обгонную муфту 13. При этих условиях внутренняя связь вспомогательной группы  $Vc(\Pi_3)$  будет совпадать с внутренней связью группы подачи. Внешняя связь вспомогательной группы будет иметь вид:

$$M_2 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow TB \rightarrow \text{каретка } 9 (\Pi_3).$$

Таким образом, группа  $Vc(\Pi_3)$  связана с группой  $\Phi_s(\Pi_2)$  посредством общего исполнительного органа – каретки 9. Вспомогательная группа настраивается только на направление. В современных станках управление вспомогательной группой осуществляется мнемонической рукояткой, совмещающей управление реверсом  $R_2$ , имеющим нейтральное положение, и включение-выключение электродвигателя  $M_2$ .

Выше при анализе способов обработки было показано, что кинематическая структура станка для обработки торцовой поверхности должна выполнять два простых (элементарных) формообразующих движения  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(\Pi_2)$ . На основе исполнительных органов (см. рисунок 2.2, в) спроектируем формообразующие группы  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(\Pi_2)$  и объединим их в структурную схему токарного станка для торцового или поперечного точения (рисунок 2.5).

Кинематическая структура группы  $\Phi_v(B_1)$  совпадает с кинематической структурой такой же группы станка для продольного точения. Следовательно, внутренняя связь группы:

$$\text{корпус передней бабки } 4 \rightarrow \text{шпиндель } 3 (B_1).$$

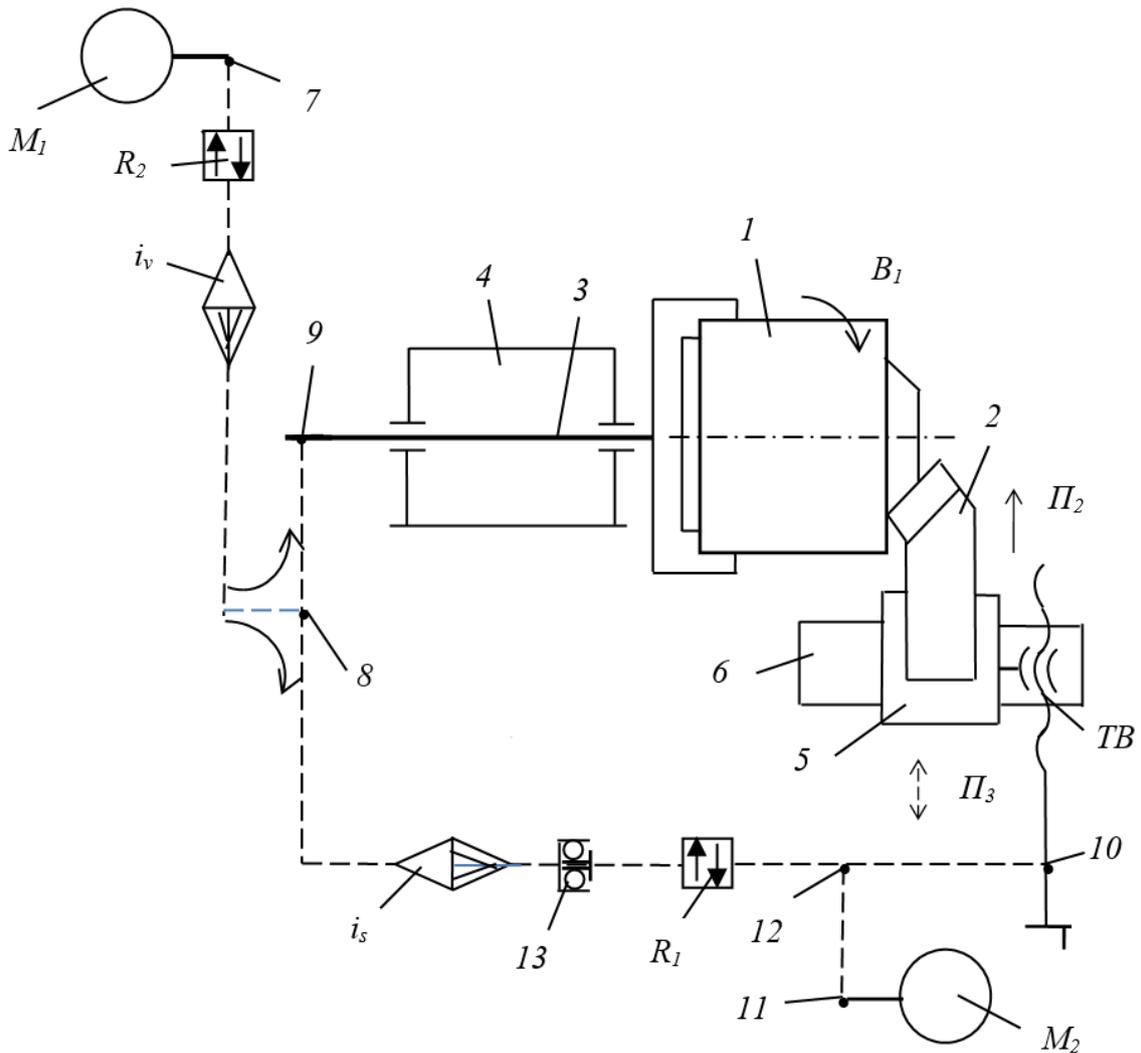
Внешняя связь имеет вид:

$$M_1 \rightarrow 7 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow \text{шпиндель } 3 (B_1).$$

Вращательное движение  $B_1$  имеет замкнутую траекторию и настраивается по двум параметрам – на скорость и направление соответственно органами настройки  $i_v$  и  $R_2$ .

Группа  $\Phi_s(\Pi_2)$ . Внутренняя связь этой группы – поступательная кинематическая пара:

$$\text{направляющие продольного суппорта } 6 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 5 (\Pi_2).$$



**Рисунок 2.5. – Частная структурная схема станка для обработки торцовой поверхности**

Соединим  $TB$ , преобразующий вращательное движение ведущего звена (винта) в поступательное движение поперечного суппорта 5, с электродвигателем  $M_1$  посредством внешней связи 7–8–10. Поступательное движение  $\Pi_2$  поперечного суппорта 5 имеет незамкнутую траекторию и должно настраиваться по четырем параметрам. Поэтому введем во внешнюю связь орган настройки на скорость  $i_s$  и орган настройки на направление  $R_1$ . Настройка на путь и исходную точку (исходное положение) осуществляется так же, как и в структуре для продольного точения, по упорам.

Таким образом, внешняя связь группы  $\Phi_s(\Pi_2)$  будет иметь вид:

$$M \rightarrow 7 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 8 \rightarrow i_s \rightarrow R_1 \rightarrow 10 \rightarrow TB \rightarrow \text{поперечный суппорт } 5 (\Pi_2).$$

В структуре станка обе формообразующие группы соединены через общий электродвигатель  $M_1$ . При этом, межгрупповая связь обеспечивается общим участком 7–8, входящим во внешние связи обеих формообразующих групп.

Встроим в разрабатываемую структурную схему вспомогательную группу  $Vc(\Pi_3)$  с приводом от отдельного электродвигателя. Для этого электродвигатель  $M_2$  соединим с  $TB$  и во внешнюю связь группы поперечной подачи  $\Phi_s(\Pi_2)$  между органом настройки  $i_s$  и реверсом  $R_1$  установим обгонную муфту  $13$ . При этих условиях внутренняя связь вспомогательной группы будет совпадать с внутренней связью группы поперечной подачи. Внешняя связь вспомогательной группы будет иметь вид:

$$M_2 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 10 \rightarrow TB \rightarrow \text{поперечный суппорт 5} (\Pi_3).$$

Таким образом, группа  $Vc(\Pi_3)$  соединена с группой  $\Phi_s(\Pi_2)$  посредством общего исполнительного органа – поперечного суппорта 5. Вспомогательная группа настраивается только на направление. В современных станках управление вспомогательной группой осуществляется мнемонической рукояткой, совмещающей управление реверсом  $R_1$ , имеющим нейтральное положение, и включение-выключение электродвигателя  $M_2$ .

## **2.2 Объединение частных структурных схем металлорежущих станков в общую структурную схему станка**

Частные структурные схемы металлорежущих станков по рисункам 2.3, 2.4, 2.5 объединим в обобщенную структурную схему универсального токарно-винторезного станка. На этом этапе с целью уменьшения «длины» кинематических связей необходимо максимально использовать межгрупповые связи [7], рационально размещать органы настройки и переключающие механизмы. С учетом этого на рисунке 2.6 представлена структурная схема токарно-винторезного станка, объединяющая представленные выше частные структурные схемы. При объединении частных структурных схем учтен также современный уровень развития кинематической структуры универсальных токарно-винторезных станков с механическими связями. В частности, органы настройки  $i_x$  и  $i_s$  объединены в общий орган настройки  $(i_x; i_s)$ . При этом объединенный орган настройки разделен на два –  $(i_{x1}; i_{s1})$  и  $(i_{x2}; i_{s2})$ , расположенных последовательно. Первый орган настройки – это четырехколесная гитара сменных зубчатых колес, используемая для установки метрического (дюймового) или модульного (питчевого) исчисления и для настройки шага резьбы (параметр настройки «траектория») при нарезании точной и нестандартной резьбы. Второй орган настройки – это развитая ко-

робка подач, используемая для настройки на стандартные шаги нарезаемой резьбы (параметр настройки «траектория») и на подачу (параметр настройки «скорость») при продольном и поперечном точении. При этом коммутация кинематических связей обеспечивается сцепными муфтами.

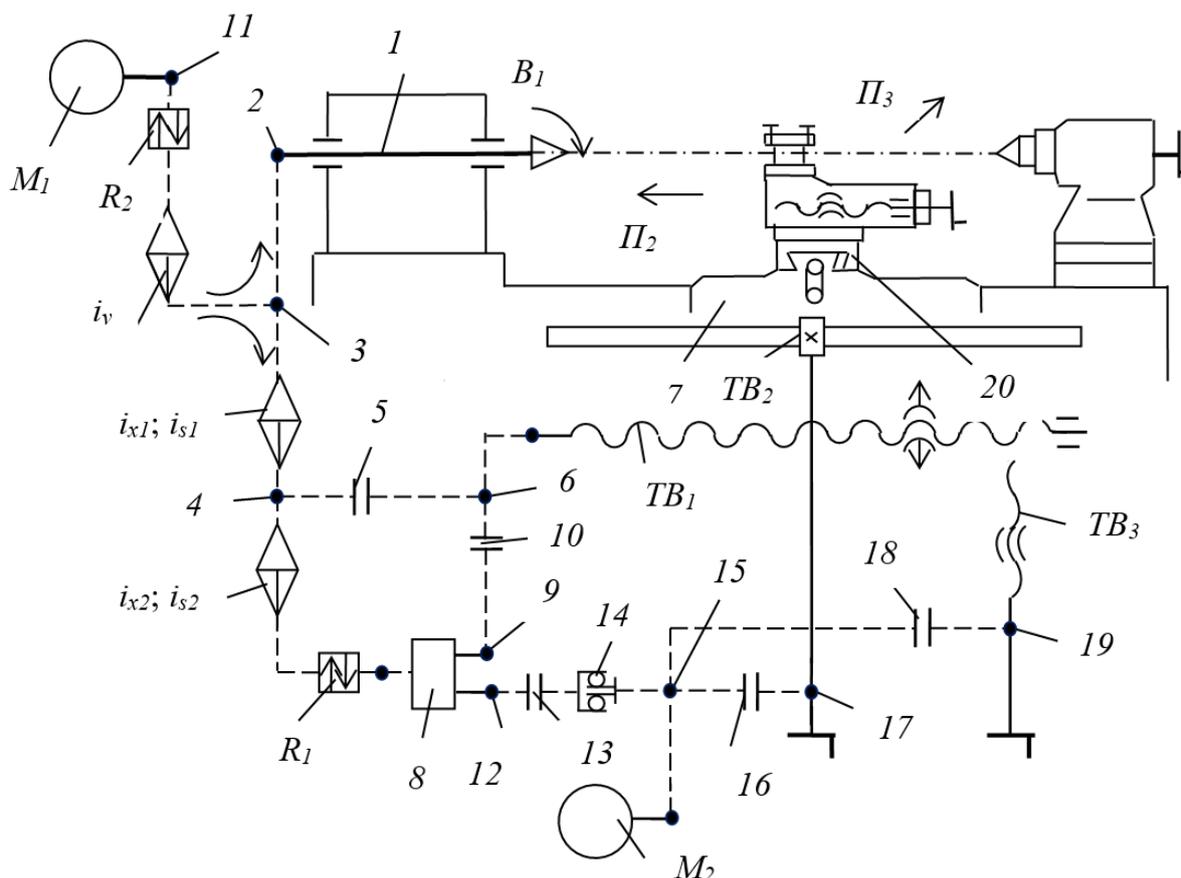


Рисунок 2.6. – Структурная схема токарно-винторезного станка

Обобщенная структурная схема токарно-винторезного станка включает две частных винторезных структурных схемы, структурную схему для продольного точения и структурную схему для поперечного точения.

Первая винторезная структурная группа  $\Phi_{v1}(B_1\Pi_2)$ , предназначена для нарезания точной и нестандартной резьбы. Ее внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow 1 \leftarrow 2 \leftarrow 3 \rightarrow i_{x1} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow TB_1 \rightarrow \text{каетка } 7 \rightarrow \Pi_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3.$$

Группа настраивается на траекторию органом настройки  $i_{x1}$ , на направление – реверсом, совмещенным с органом настройки на траекторию, на скорость – органом настройки  $i_v$ , на путь и исходную точку – по упорам.

Вторая винторезная структурная группа  $\Phi_{v2}(B_1\Pi_2)$  предназначена для нарезания стандартной резьбы. Ее внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow 1 \leftarrow 2 \leftarrow 3 \rightarrow i_{x1} \rightarrow i_{x2} \rightarrow R_1 \rightarrow \text{переключающий механизм } 8 \rightarrow 9 \rightarrow \\ \rightarrow 10 \rightarrow 6 \rightarrow TB_1 \rightarrow \text{каретка } 7 \rightarrow \Pi_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3.$$

Группа настраивается на траекторию органом настройки  $i_{x2}$ , на направление – реверсом  $R_1$ , на скорость – органом настройки  $i_v$ , на путь и исходную точку – по упорам.

Частная структурная схема для продольного точения состоит из группы скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  и группы продольной подачи  $\Phi_s(\Pi_2)$ .

Внутренняя связь группы скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  имеет вид:

$$\text{подшипниковые опоры передней бабки} \rightarrow \text{шпиндель } 1.$$

Внешняя связь этой группы:

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow \text{шпиндель } 1 (B_1).$$

Группа настраивается на скорость резания органом настройки  $i_v$ , на направление – реверсом  $R_2$ .

Внутренняя связь группы продольной подачи  $\Phi_s(\Pi_2)$  имеет вид:

$$\text{направляющие станины} \rightarrow \text{каретка } 7.$$

Внешняя связь этой группы:

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow i_{s1} \rightarrow 4 \rightarrow i_{s2} \rightarrow R_1 \rightarrow 8 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow \\ \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow TB_2 \rightarrow \text{каретка } 7 (\Pi_2).$$

Группа настраивается на подачу органом настройки  $i_{s2}$ , на направление – реверсом  $R_1$ , на путь и исходную точку – по упорам. При этом орган настройки  $i_{s1}$  рассматривается как механизм с постоянным передаточным отношением.

Частная структурная схема станка для поперечного точения состоит из группы скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  и группы поперечной подачи  $\Phi_s(\Pi_3)$ . Причем группа скорости резания данной структурной схемы совпадает с группой скорости резания структурной схемы станка для продольного точения.

Внутренняя связь группы поперечной подачи  $\Phi_s(\Pi_3)$  имеет вид:

$$\text{направляющие каретки } 7 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 20.$$

Внешняя связь группы:

$$M_1 \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow i_{s1} \rightarrow 4 \rightarrow i_{s2} \rightarrow R_1 \rightarrow 8 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow \\ \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow TB_3 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 20 (\Pi_3).$$

Группа настраивается теми же органами настройки, что и группа продольной подачи, рассмотренная выше.

Обобщенная структурная схема станка содержит также две вспомогательные группы  $Vc_1(P_2)$  и  $Vc_2(P_3)$  для ускоренных перемещений (позиционирования) соответственно каретки 7 и поперечного суппорта 20.

Внутренняя связь формообразующей группы  $\Phi_s(P_2)$  является также внутренней связью группы  $Vc_1(P_2)$ .

Внешняя связь вспомогательной группы  $Vc_1(P_2)$  имеет вид:

$$M_2 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow TB_2 \rightarrow \text{каретка } 7.$$

Аналогично внутренняя связь формообразующей группы  $\Phi_s(P_3)$  является также внутренней связью группы  $Vc_2(P_3)$ . Внешняя связь вспомогательной группы  $Vc_2(P_3)$  имеет вид:

$$M_2 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow TB_3 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 20.$$

Привод обеих вспомогательных групп осуществляется от общего электродвигателя  $M_2$ . Часть внешних связей этих групп одновременно является частью соответствующих групп подач. В современных токарно-винторезных станках включение-выключение формообразующих групп подач и вспомогательных групп ускоренных перемещений осуществляется общей мнемонической рукояткой, переключающей двухсторонние сцепные муфты 16 и 18, имеющие нейтральное положение. По существу, данные муфты являются элементами реверсивных механизмов. Электрическая кнопка, встроенная в мнемоническую рукоятку, используется для включения-выключения электродвигателя  $M_2$  ускоренных перемещений исполнительных органов – каретки 7 и поперечного суппорта 20.

Изложенное развитие основ теории формообразования реальных поверхностей, введение понятия характеристического образа инструмента, понятия траектория исполнительного движения, использование принципа разветвления энергии движения в кинематических цепях, по существу, создало предпосылки для эволюционной смены парадигмы познания металлорежущих станков.

## 2.3 Основы теории настройки металлорежущих станков

Под кинематической настройкой станка понимают настройку его расчетных кинематических цепей, обеспечивающую требуемые скорости движений исполнительных органов станка, а также, при необходимости, усло-

вия кинематического согласования перемещений или скоростей исполнительных органов между собой (параметр траектория сложного исполнительного движения). Цель таких согласований – образование поверхности с заданными формой, размерами, точностью и шероховатостью.

В большинстве металлорежущих станков с механическими связями для настройки расчетных кинематических цепей применяют органы настройки в виде гитар сменных зубчатых колес, ременных передач, регулируемых электродвигателей, регулируемых гидродвигателей, коробок скоростей и подач, характеристикой которых является общее передаточное отношение типа  $i_v$ ,  $i_s$ ,  $i_x$ ,  $i_y$  и т.п.

Значение передаточного отношения органа настройки определяется по формуле настройки (ФН) и затем реализуется в гитарах сменных зубчатых колес подбором и установкой соответствующих колес в гитаре, а в коробках скоростей и подач – зацеплением соответствующих зубчатых колес.

Для вывода ФН по кинематической (структурной) схеме намечают расчетную кинематическую цепь, под которой понимают ряд последовательно расположенных передач, включая орган настройки, связывающих исполнительные органы или между собой, или с источником движения. В расчетной кинематической цепи, называемой в ряде литературных источников цепью согласования, один исполнительный орган рассматривают в качестве ведущего, а другой – в качестве ведомого. По расчетной кинематической цепи составляют уравнение кинематической цепи (УКЦ), называемое в ряде источников уравнением кинематического баланса. В этом уравнении неизвестным является передаточное отношение органа настройки. При этом необходимо учитывать, что при совпадении порядка записи с направлением передачи движения через орган настройки символ его передаточного отношения записывается в числитель, а при отсутствии этого условия – в знаменатель. УКЦ можно записывать от любого конца расчетной цепи. Решение этого уравнения относительно передаточного отношения органа настройки представляет собой ФН. Для каждого конкретного станка ФН постоянны.

В общем виде ФН показывает зависимость передаточного отношения от переменных параметров условия кинематического согласования перемещений конечных исполнительных органов расчетной кинематической цепи и ее постоянной, то есть:

$$i = f(c, \text{переменные параметры условия согласования}),$$

где  $i$  – передаточное отношение органа настройки;

$c$  – константа УКЦ, зависящая от передаточных отношений промежуточных передач расчетной цепи и постоянных параметров условия согласования перемещений.

Для того чтобы составить УКЦ необходимо задать расчетные перемещения (РП) ее конечных исполнительных органов. Под РП понимают перемещение ведущего исполнительного органа расчетной цепи в совокупности с результирующим перемещением ведомого органа этой же цепи. РП определяют в зависимости от того, где расположен орган настройки – во внутренней или во внешней кинематической связи.

Если орган настройки расположен во внутренней связи, то конечными исполнительными органами расчетной цепи будут подвижные исполнительные звенья исполнительных органов. Абсолютные перемещения этих звеньев неизвестны. Однако известны их относительные перемещения, соответствующие относительным перемещениям в какой-либо механической передаче, имитирующей зацепление обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. Поэтому для определения РП одному из элементов передачи (заготовке или инструменту) дают вполне определенное движение: при вращении – один оборот, а при поступательном движении –  $L$  мм линейного перемещения. Зная передаточное отношение передачи, которую моделируют заготовка и инструмент, определяют перемещение второго элемента (инструмента или заготовки).

В таблице 2.2 приведены наиболее распространенные РП для внутренних связей различных станков.

Таблица 2.2. – Расчетные перемещения внутренних связей

Зацепление	Исполнительное движение	Расчетное перемещение конечных звеньев
Цилиндрических или конических зубчатых колес	$\Phi(B_1B_2)$	$1$ об. колеса $Z_1 \rightarrow \frac{Z_1}{Z_2}$ об. колеса $Z_2$
Ходового винта и гайки	$\Phi(B_1П_2)$	$1$ об. ходового винта $\rightarrow P$ мм продольного перемещения гайки
Рейки с колесом	$\Phi(П_1B_2)$	$L$ мм перемещение рейки $\rightarrow \frac{L}{\pi \cdot m \cdot z}$ об. колеса $Z$
Червяка с червячным колесом	$\Phi(B_1B_2)$	$1$ об. червяка $\rightarrow \frac{K}{Z}$ об. колеса
Червяка с реечным колесом	$\Phi(П_1B_2)$	$L$ мм перемещение рейки $\rightarrow \frac{L}{\pi \cdot m \cdot z}$ об. колеса
Червяка с рейкой	$\Phi(B_1П_2)$	$1$ об. червяка $\rightarrow \pi \cdot k \cdot m$ перемещению рейки

При расположении органа настройки во внешней связи расчетная цепь по своему составу может как совпадать, так и не совпадать с внешней связью. Как правило, это зависит от формы траектории исполнительного дви-

жения. Расчетная цепь для определения передаточного отношения органа настройки на скорость резания связывает источник энергии движения с подвижным звеном исполнительного органа, создающего движение резания. Например, расчетная цепь во всех частных структурах токарно-винторезного станка по рисунку 2.6 соединяет электродвигатель со шпинделем заготовки. При этом в обеих частных резьбонарезных структурах расчетная цепь и внешняя связь по своему составу не совпадают, а в частных структурах для обработки цилиндрических и торцовых поверхностей совпадают. Причем РП для всех названных, частных структур записываются следующим образом:

$$n_m \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя} \rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1} \text{ шпинделя заготовки } (B_1).$$

Для органов настройки, расположенных в расчетных цепях подач, расчетные перемещения (таблица 2.3) зависят от характера задания скорости подачи (минутная, оборотная, цикловая) и формы траектории движения подачи (линейная, круговая).

Таблица 2.3. – Расчетные перемещения для цепей подач

Вид подачи	Линейная	Круговая
Минутная	$n_m \text{ мин}^{-1}$ двигателя $\rightarrow S$ мм/мин перемещение исполнительного органа подачи	$n_m \text{ мин}^{-1}$ двигателя $\rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1}$ исполнительного органа подачи
Оборотная	1 об. исполнительного органа группы резания $\rightarrow S$ мм перемещение исполнительного органа подачи	1 об. исполнительного органа группы резания $\rightarrow S_d$ мм дуговое перемещение исполнительного органа подачи
Цикловая	Для временных (кулачковых) СУ 1,3,4 группы $\frac{n_m}{60} t_u$ об. двигателя $\rightarrow$ 1 об. РВ Для временных (кулачковых) СУ 2 группы $\frac{n_m}{60} t_p$ об. двигателя $\rightarrow \frac{\alpha_p^\circ}{360}$ об. РВ где $t_u$ и $t_p$ – соответственно время выполнения цикла и время выполнение рабочих переходов; $\alpha_p^\circ$ – угол поворота РВ для выполнения рабочих ходов	

Рассмотрим вывод ФН для органов настройки частных структур токарно-винторезного станка (см. рисунок 2.6).

Частная структура для нарезания точной и нестандартной резьбы. Орган настройки  $i_{x1}$ . Внутренняя связь сложной кинематической группы  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  содержит один орган настройки. Поэтому расчетная цепь для этого органа

настройки совпадает с внутренней связью группы. Следовательно, РП для органа настройки  $i_{x1}$  имеют вид:

$1$  оборот заготовки ( $B_1$ )  $\rightarrow P$  мм перемещения инструмента ( $\Pi_2$ ),

где  $P$  – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда УКЦ:

$$P = 1 \cdot i_{x1} \cdot i_{01} \cdot P_{ТВ},$$

где  $i_{01}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$P_{ТВ}$  – шаг тягового вала.

Откуда ФН:

$$i_{x1} = P/c_1,$$

где  $c_1 = i_{01} \cdot P_{ТВ}$  – константа.

Частная структура для нарезания стандартной резьбы. Орган настройки  $i_{x2}$ . При этом орган настройки  $i_{x1}$  рассматривается как механизм с постоянным передаточным механизмом. Внутренняя связь сложной кинематической группы  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  содержит один орган настройки, но большее число постоянных передач. Расчетная цепь для этого органа настройки совпадает с внутренней связью группы. Следовательно, РП для органа настройки  $i_{x2}$  имеют вид:

$1$  оборот заготовки ( $B_1$ )  $\rightarrow P$  мм перемещения инструмента ( $\Pi_2$ ),

где  $P$  – шаг нарезаемой стандартной резьбы.

Тогда УКЦ:

$$P = 1 \cdot i_{x2} \cdot i_{02} \cdot P_{ТВ},$$

где  $i_{01}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$P_{ТВ}$  – шаг тягового вала.

Откуда ФН:

$$i_x = P/c_2,$$

где  $c_2 = i_{02} \cdot P_{ТВ}$  – константа.

Частные резьбонарезные структуры содержат общий орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь для этого органа настройки, связывающая электродвигатель  $M_1$  со шпинделем  $3$  станка, включает внешнюю связь и часть общей внутренней связи групп  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  от звена соединения связей  $3$  до шпинделя  $1$ . РП для органа настройки  $i_v$  имеют вид:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1} (B_1).$$

Тогда УКЦ:

$$n_{и} = n_M \cdot i_v \cdot i_{03},$$

где  $i_{02}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_v = n_{и}/c_3,$$

где  $c_3 = n_M \cdot i_{03}$  – константа.

Частные структуры  $\Phi_v(B_1) - \Phi_s(\Pi_2)$  для продольного течения и  $\Phi_v(B_1) - \Phi_s(\Pi_3)$  для торцового течения содержат общую простую группу  $\Phi_v(B_1)$ , воспроизводящую образующую – окружность воспроизводимых поверхностей соответственно цилиндрической и торцовой. Группа настраивается на скорость органом настройки  $i_v$ , на направление – реверсом  $R_2$ . Расчетная цепь для органа настройки  $i_v$  совпадает с внешней связью этой группы. При этом вывод ФН для этого органа настройки совпадает с выводом ФН для аналогичного органа настройки винторезных структур.

Группа  $\Phi_s(\Pi_2)$  воспроизводит направляющую – прямую линию, параллельную оси заготовки. Эта группа настраивается на скорость органом настройки  $i_{s2}$ , на направление органом настройки  $R_1$ , на путь и исходное положение по упорам. При этом орган настройки  $i_{s1}$  используется как зубчатый механизм с постоянным передаточным отношением.

По сложившейся традиции для токарных станков с общим электродвигателем формообразующих групп принято назначать линейную подачу за один оборот заготовки. Из этого следует, что расчетная цепь для органа настройки  $i_{s2}$  – это структурная цепь, связывающая шпиндель  $I$  с кареткой (продольным суппортом) 7. Тогда РП для органа настройки  $i_{s2}$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя } I \rightarrow s \text{ мм перемещения каретки } 7 (\Pi_2).$$

Тогда УКЦ:

$$s = I \cdot i_{s2} \cdot i_{04} \cdot [P_{ТВ} = \pi m z],$$

где  $P_{ТВ}$  – шаг тягового вала;

$m$  и  $z$  – модуль и число зубьев колеса зубчато-реечной передачи, выполняющей функцию  $ТВ_2$ ;

$i_{04}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_s = s/c_4,$$

где  $c_4 = i_{04} \cdot \pi \cdot m \cdot z$  – константа.

Группа  $\Phi_s(\Pi_3)$  при торцовой обработке воспроизводит направляющую – прямую линию, перпендикулярную оси заготовки. Расчет настройки этой группы осуществляется так же, как при настройке группы  $\Phi_s(\Pi_2)$ . По аналогии, расчетная цепь для органа настройки  $i_{s2}$ , группы  $\Phi_s(\Pi_3)$  – это структурная цепь, связывающая шпиндель  $1$  с поперечным суппортом  $20$ . Следовательно, РП для органа настройки  $i_{s2}$  имеют вид:

*1 оборот шпинделя  $1 \rightarrow s$  мм перемещения поперечного суппорта  $20$  ( $\Pi_3$ ).*

Тогда УКЦ:

$$s = 1 \cdot i_{s2} \cdot i_{05} \cdot P_{TB3},$$

$$i_{s2} = s/c_5,$$

где  $c_5 = i_{03} \cdot P_{TB3}$  – константа.

На этапе интуитивного познания металлорежущих станков в виде совокупности кинематических цепей, частные структурные схемы для нарезания резьбы и обработки цилиндрической поверхности из-за отсутствия понятия «траектория исполнительного движения» практически неразличимы, а орган настройки на траекторию исполнительного движения при нарезании резьбы рассматривался как орган настройки на скорость подачи инструмента. В итоге, сложное двухэлементарное движение, воспроизводящее винтовую линию (направляющую резьбовой поверхности), разлагается на два элементарных движения – вращательное и поступательное, не согласованные между собой жесткой функциональной связью. По существу, винторезная структура станка трансформируется в структуру станка для продольного точения.

## ГЛАВА 3. АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЧЕРВЯКОВ ЧАШЕЧНЫМ РЕЗЦОМ

### 3.1 Пионерный способ обработки червяков чашечным резцом типа долбяка

Автор теории настройки металлорежущих станков сомневался в корректности ее использования для объяснения сущности их функционирования на примере анализа кинематической схемы станка для обработки резьбы (червяка) чашечным резцом типа зуборезного долбяка. Поэтому представляется целесообразным выполнить кинематический анализ структурной схемы такого станка, используя парадигму познания, рассмотренную в предыдущих разделах.

Для решения данной задачи предварительно рассмотрим виртуальное техническое решение – способ формообразующей обработки червяка чашечным резцом типа зуборезного долбяка, реализуемый в кинематической структуре соответствующего станка.

На рисунке 3.1 показана схема взаимодействия обкатного чашечного резца 1 и нарезаемой заготовки 2. Для ее реализации необходимо чашечный резец в виде зубчатого колеса с профилем зуба, форма которого является сопряженной при обкате с профилем резьбы нарезаемого червяка 2, катить без скольжения относительно обрабатываемого червяка. В этом случае характеристический образ каждого зуба чашечного резца имеет форму равнобокой трапеции, у которой боковые режущие кромки выполнены в виде дуг левой и правой эвольвент, а вершинная режущая кромка выполнена в виде дуги окружности.

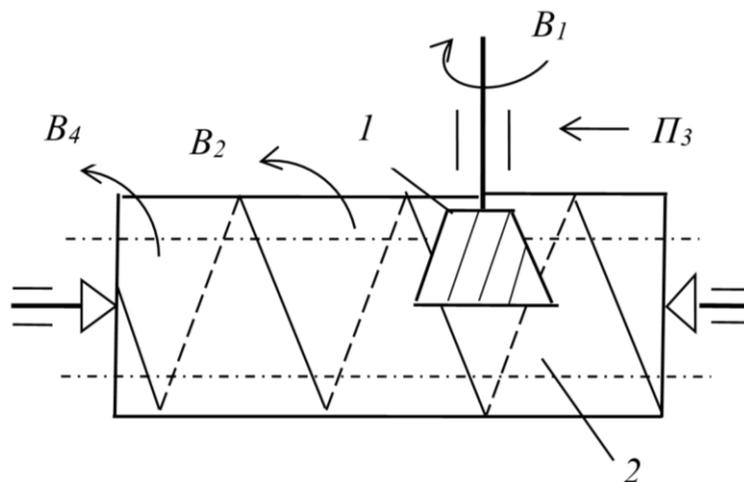


Рисунок 3.1. – Схема способа нарезания цилиндрических червяков

При обработке профиль витка (образующая) червяка воспроизводится сложным двухэлементарным движением обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , состоящим из согласованных элементарных вращательных движений  $B_1$  чашечного резца 1 и  $B_2$  заготовки 2. Движение обката имитирует зацепление червячной передачи. Линия витка (направляющая) воспроизводится сложным двухэлементарным винтовым движением  $\Phi_s(P_3B_4)$ , состоящим из согласованных элементарных поступательного движения  $P_3$  чашечного резца 1 и вращательного движения  $B_4$  заготовки 2. Винтовое движение имитирует зацепление передачи винт – гайка. Класс образования винтовой поверхности обкат – след ( $H^K - H^C$ ). При этом заготовка 2 одновременно участвует в движениях  $B_1$  и  $B_4$ . Следовательно, кинематическая структура станка для нарезания червяков чашечным резцом должна обеспечивать сложение двух элементарных движений на одном исполнительном органе – заготовке обрабатываемого червяка.

### 3.2 Анализ структурной схемы базового станка для обработки червяков чашечным резцом

На рисунке 3.2 приведена классическая структурная схема станка для точения червяков чашечным резцом типа зуборезного долбяка, реализующая рассмотренный способ формообразующей обработки. Данная схема является аналогом кинематической схемы базового станка модели ЕЗ-10А.

Формообразующая часть кинематической структуры анализируемого станка включает группу обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящую профиль витка червяка, и винторезную группу  $\Phi_s(P_3B_4)$ , воспроизводящую линию витка по длине.

Группу обката  $\Phi_v(B_1B_2)$  имитирует зацепление червячной передачи. Ее внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель 1 чашечного резца} \leftarrow 2 \leftarrow R_1 \leftarrow i_x \leftarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow \\ \rightarrow \text{суммирующий механизм} 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow \text{шпиндель 9 заготовки} \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 9 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \text{ (звено соединения с внутренней связью)}.$$

Группа настраивается на траекторию (профиль витка червяка) и скорость воспроизведения профиля витка (скорость резания) органами настройки  $i_x$  и  $i_v$  соответственно, на направление – реверсом  $R_1$ .

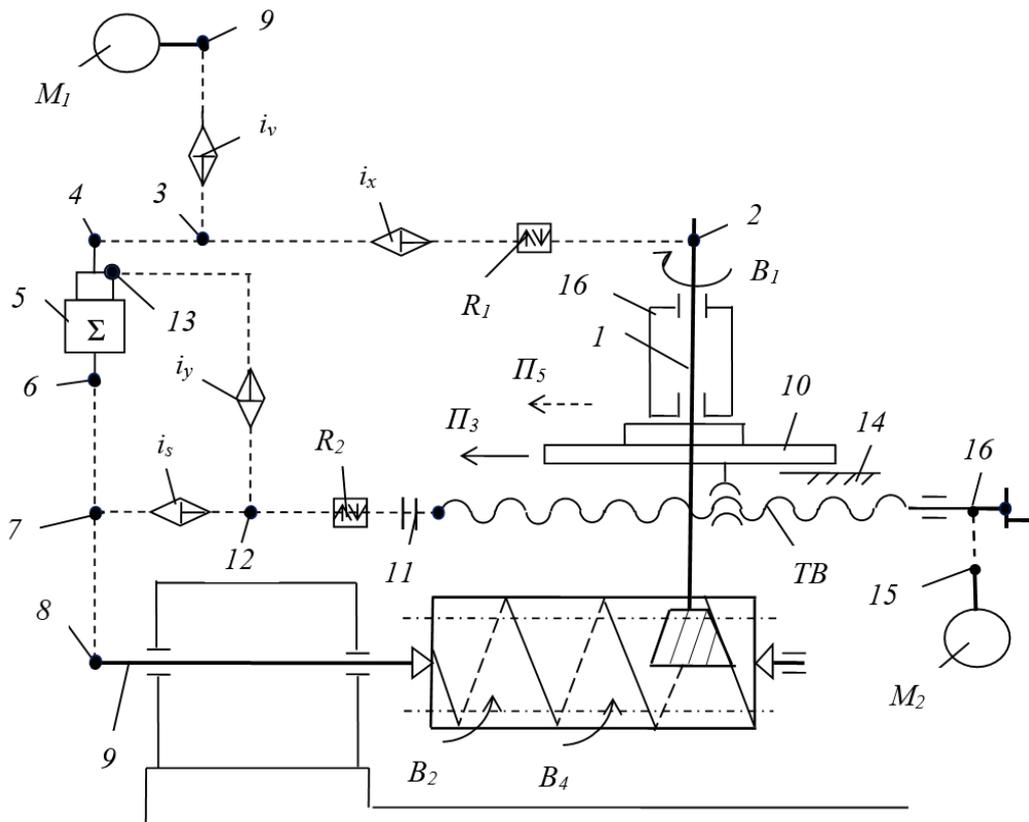
Группа  $\Phi_s(\Pi_3 B_4)$ , имитирующая зацепление передачи винт – гайка, осуществляет перемещение траектории движения чашечного резца по начальной цилиндрической поверхности витков червяка. Внутренняя связь этой группы:

$\Pi_3 \leftarrow \text{каретка } 10 \leftarrow \text{тяговый вал } TB \leftarrow \text{муфта } 11 \leftarrow R_2 \leftarrow 12 \rightarrow i_y \rightarrow 13 \rightarrow$   
 $\rightarrow \text{суммирующий механизм } 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow \text{шпиндель } 9 \text{ заготовки} \rightarrow B_4.$

Внешняя связь:

$M_1 \rightarrow 9 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow i_s \rightarrow 12$  (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию (винтовую линию червяка) и скорость воспроизведения винтовой линии (скорость подачи) органами настройки  $i_y$  и  $i_s$  соответственно, на направление – реверсом  $R_2$ , на путь и исходное положение – путевыми упорами системы управления.



**Рисунок 3.2. – Дифференциальная структурная схема станка для точения червяков чашечным резцом**

В кинематической структуре станка предусмотрена вспомогательная группа  $Bc(\Pi_5)$  для установочных перемещений каретки 10 при наладке станка. Ее внутренняя связь элементарная поступательная пара:

$\text{направляющие } 14 \text{ станины станка} \rightarrow \text{каретка } 10 \rightarrow \Pi_5.$

Внешняя связь:

$M_2 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow TB \rightarrow \text{каретка } 10$  (звено соединения связей).

Механическое и ручное управление установочными перемещениями каретки осуществляется при выключенной муфте 11.

В специализированных станках для обработки червяков органы настройки на траекторию и скорость обоих формообразующих движений, как правило, выполняют в виде гитар сменных зубчатых колес.

Нормируемыми параметрами при обработке червяков обкатным резцом являются скорость резания, задаваемая по круговой частоте заготовки (движение  $B_2$ ) и продольная подача инструмента (движение  $П_3$ ).

Кинематическая настройка параметров исполнительных движений станка. Органы настройки  $i_x, i_v, i_y, i_s$ .

Орган настройки  $i_x$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящей червячное зацепление. Следовательно, РП для органа настройки  $i_x$  имеют вид:

$1 \text{ оборот шпинделя заготовки } (B_2) \rightarrow k/z \text{ поворота резца } (B_1),$

где  $k$  – количество заходов нарезаемого червяка;

$z$  – число зубьев чашечного резца.

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$k/z = 1 \cdot i_{01} \cdot i_x,$$

где  $i_{01}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_x = i_{01} \cdot k/z.$$

Орган настройки  $i_y$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью винторезной группы  $\Phi_s(П_3B_4)$ , воспроизводящей линию витка по длине. Следовательно, РП для органа настройки  $i_y$  имеют вид:

$T \text{ мм перемещение резца в движении } П_3 \rightarrow 1 \text{ дополнительному обороту заготовки в движении } B_4,$

где  $T$  – шаг нарезаемого червяка.

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$1 = i_{02} \cdot T/t_{TB} \cdot i_y,$$

где  $i_{02}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$t_{TB}$  – шаг тягового вала.

Откуда ФН:

$$i_v = t_{TB} / i_{02} \cdot T.$$

Орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь связывает электродвигатель  $M_1$  со шпинделем 9 заготовки. Следовательно, РП имеют вид:

$$n_m \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{\text{штн}} \text{ заготовки мин}^{-1}.$$

Тогда УКЦ:

$$n_{\text{штн}} = n_m \cdot i_{03} \cdot i_v,$$

где  $i_{03}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_v = n_{\text{штн}} / i_{03} \cdot n_m.$$

Орган настройки  $i_s$ . Расчетная цепь связывает шпиндель 9 заготовки с  $TB$  каретки 10. Следовательно, РП имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя заготовки} \rightarrow s \text{ мм перемещения каретки } 10.$$

Тогда УКЦ:

$$s = l \cdot i_{04} \cdot i_s \cdot t_{TB},$$

где  $i_{04}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_s = s / i_{04} \cdot t_{TB}.$$

Станок работает следующим образом. После наладки органов настройки и установки обрабатываемой заготовки по линии центров станка по циклу обработки включается электродвигатель  $M_1$ . Движение от электродвигателя по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 3 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель чашечного резца получает вращательное движение  $B_1$ , а шпиндель заготовки – движение  $B_2$ . Согласованные движения шпинделей воспроизводят профиль червяка. Одновременно при включенной муфте 11 движение от электродвигателя по внешней связи группы подачи через звено соединения связей 12 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге каретка 10 и шпиндель 9 заготовки получают движения  $P_3$  и  $B_4$  соответственно. Функциональная связь этих движений обеспечивает перемещение траектории движения чашечного резца по винтовой линии витка червяка. При этом посредством суммирующего механизма 5 на шпинделе заготовки физически складываются движения  $B_2$  и  $B_4$ .

Современная тенденция при проектировании кинематической структуры – замена физического сложения двух движений на одном исполнительном органе математическим сложением. Такая замена возможна, если слагаемые движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их одинакова и создаются они одним источником движения. Рассмотренная структурная схема этим условиям удовлетворяет. Следовательно, данную схему можно упростить, исключив из нее суммирующий механизм 5 и участок кинематической связи 12– $i_y$ –13. В итоге формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3B_4)$  преобразуются к виду  $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$  и  $\Phi_s(P_3)$ . При этом на основе следующего вывода изменяются также РП для органа настройки  $i_x$ .

При нарезании червяка за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) чашечный резец совершает  $k/z$  оборотов (движение  $B_1$ ) и перемещается на величину  $s$  мм (движение  $P_4$ ). Для получения винтовой линии червяка при перемещении чашечного резца на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $s/T$  оборота (движение  $B_4$ ), что соответствует дополнительному повороту чашечного резца на величину  $+(k/z) \cdot (s/T)$ . Следовательно, РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката  $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$ , преобразуются к виду:

*1 оборот шпинделя заготовки ( $B_2 + B_4$ )  $\rightarrow k/z(1 + s/T)$  оборота чашечного резца ( $B_1$ ).*

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$k/z(1 + s/T) = 1 \cdot i_{01} \cdot i_x.$$

Откуда ФН:

$$i_x = i_{01} \cdot k/z \cdot (1 + s/T).$$

При этом РП для органа настройки  $i_s$  не изменяются.

### 3.3 Расширение технических возможностей кинематической структуры базового станка для обработки червяков

В конце 50-х годов прошлого столетия была разработана двухшаговая червячная передача (дуплекс-пара), позволяющая регулировать боковой зазор посредством осевого смещения червяка. Такие передачи используют в червячных передачах, от которых требуется высокая кинематическая точность, например, в реверсируемых, отсчетных и делительных механизмах металло-режущих станков. В дуплекс-паре [8] двухшаговый червяк с цилиндрической начальной поверхностью его витков находится в зацеплении с двухшаговым

червячным колесом. В [9] предложена менее трудоемкая и более технологичная червячная передача, состоящая из двухшагового червяка и взаимодействующего с ним традиционного одношагового червячного колеса. Разношаговость червяка [10] данной передачи обусловлена заменой цилиндрической начальной поверхности его витков конической начальной поверхностью. Шаг витка такого червяка по противоположным сторонам его профиля зависит от угла расположения образующей начальной конической поверхности [11].

Рассмотрим возможные варианты модернизации кинематической структуры базового станка для нарезания двухшагового червяка с конической начальной поверхностью [12; 13]. В основу методики модернизации положен принцип кинематического воспроизведения траектории движения чашечного резца по конической начальной поверхности червяка при его обработке.

На рисунке 3.3 приведен бездифференциальный вариант модернизации структурной схемы специализированного станка. Кинематическая структура станка включает двухэлементарную группу обката  $\Phi_v(B_1B_2)$  и трехэлементарную винторезную группу  $\Phi_s(B_3\Pi_4\Pi_5)$ , связанные между собой общим электродвигателем. В кинематической структуре станка не предусмотрен планетарный дифференциал для физического сложения элементарных движений  $B_2$  и  $B_3$  на шпинделе заготовки, входящем в обе формообразующие группы. Слагаемые движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их одинакова, и создаются они общим электродвигателем. Названные условия обеспечивают математическое сложение указанных движений на общем исполнительном органе – шпинделе заготовки. В этом случае сложные формообразующие исполнительные движения можно преобразовать к виду  $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$  и  $\Phi_s(\Pi_4\Pi_5)$ .

Группа  $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$  имитирует зацепление червячной передачи. Ее внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель } 1 \text{ чашечного резца} \leftarrow 2 \leftarrow \text{реверс } R_1 \leftarrow i_x \leftarrow 3 \rightarrow \\ \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow \text{шпиндель } 6 \text{ заготовки} \rightarrow B_2 + B_3.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 7 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается на траекторию и скорость (резания) органами настройки  $i_x$  и  $i_v$  соответственно, на направление – реверсом  $R_1$ .

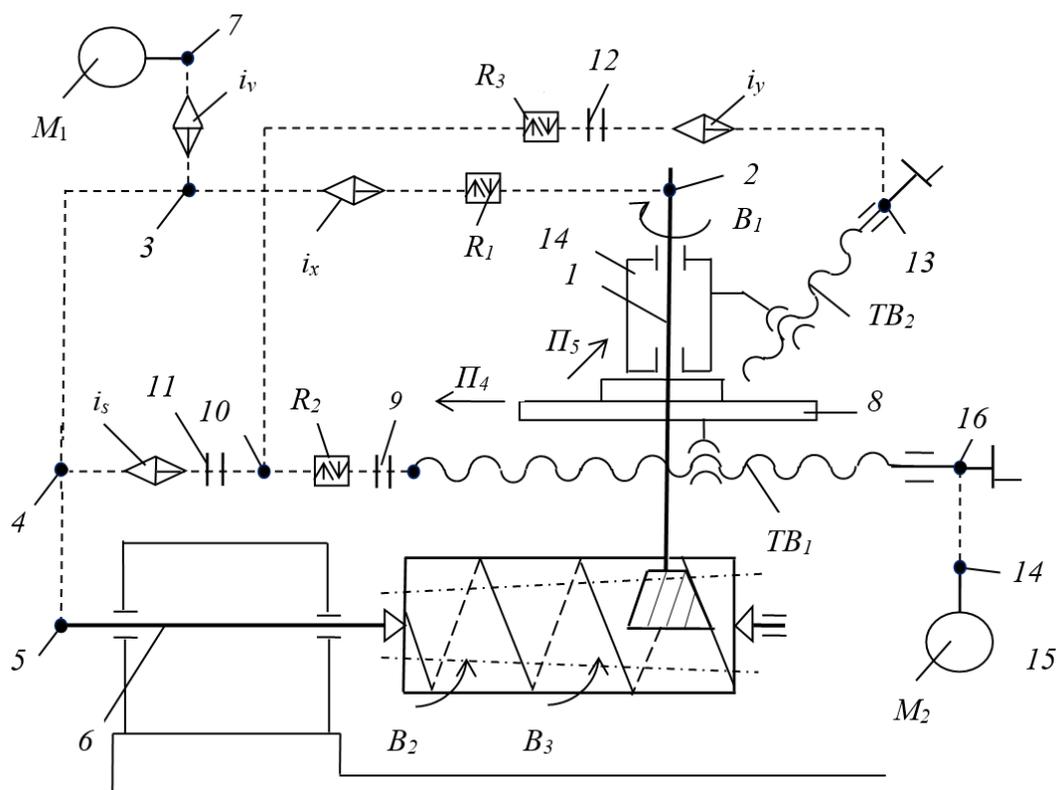
Группа  $\Phi_s(\Pi_4\Pi_5)$  осуществляет перемещение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. Ее внутренняя связь:

$$\Pi_4 \leftarrow \text{продольный суппорт } 8 \leftarrow \text{тяговый вал } TB \leftarrow \text{муфта } 9 \leftarrow R_2 \leftarrow 10 \rightarrow R_3 \rightarrow \\ \rightarrow \text{муфта } 12 \rightarrow i_y \rightarrow 13 \rightarrow \text{тяговый вал } TB_2 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 14 \rightarrow \Pi_5.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 7 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_s \rightarrow 11 \rightarrow 10 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается на траекторию и скорость (подачу) органами настройки  $i_y$  и  $i_s$  соответственно, на направление – реверсами  $R_1$  и  $R_2$ , на путь и исходное положение – путевыми упорами электромеханической системы управления.



**Рисунок 3.3. – Бездифференциальная структурная схема станка с механическими связями для точения двухшаговых червяков**

В структуре станка предусмотрена вспомогательная группа с отдельным электродвигателем для ускоренного перемещения суппортов. Ее внутренняя связь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_s$ , а внешняя связь имеет вид:

$$M_2 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow TB_2.$$

Ускоренное перемещение суппортов осуществляется при выключенной муфте 11. Ручное установочное перемещение суппортов при наладке станка осуществляется при выключенных муфтах 9 и 12 посредством моховиков, установленных на тяговых валах.

Нормируемыми параметрами при обработке являются скорость резания, задаваемая по круговой частоте заготовки (движение  $B_2$ ), и продольная подача инструмента (движение  $П_4$ ).

Орган настройки  $i_x$ . При нарезании червяка за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) чашечный резец совершает  $k/z$  оборотов (движение  $B_1$ ) и перемещается на величину  $s$  мм (движение  $П_4$ ). Для получения винтовой линии червяка при перемещении чашечного резца на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $s/T$  оборота (движение  $B_3$ ), что соответствует дополнительному повороту чашечного резца на величину  $+(k/z) \cdot (s/T)$ . Следовательно, РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката  $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$  имеют вид:

*1 оборот шпинделя заготовки ( $B_2 + B_3$ )  $\rightarrow$   $k/z (1 + s/T)$  оборота чашечного резца ( $B_1$ ),*

где  $k$  – число заходов нарезаемого червяка;  
 $z$  – число зубьев чашечного резца;  
 $s$  – подача;  
 $T$  – шаг винтовой линии нарезаемого червяка.  
 Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$k/z(1 + s/T) = 1 \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений механических передач кинематической цепи.

Откуда ФН:

$$i_x = c_1 \cdot k/z \cdot (1 + s/T).$$

Орган настройки  $i_y$ . РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы подачи  $\Phi_s(П_4П_5)$ , имеют вид:

*$S_{np}$  подача резца в движении  $П_4 \rightarrow S_{non}$  подача резца в движении  $П_5$ ,*

где  $S_{np}$  – нормируемая продольная подача;  
 $S_{non} = S_{np} \cdot \operatorname{tg} \varepsilon$  ( $\varepsilon$  – угол наклона образующей начальной поверхности червяка).

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$S_{non} = S_{np} \cdot c_1 \cdot 1/P_{TB1} \cdot i_y \cdot P_{TB2}.$$

Откуда ФН:

$$i_y = (S_{non}/S_{np}) \cdot (P_{TB1}/c_1 \cdot P_{TB2}) = c_2 \cdot \operatorname{tg} \varepsilon,$$

где  $c_2 = (P_{TB1}/c_1 \cdot P_{TB2})$  – константа станка;  
 $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной цепи.

Угол  $\varepsilon$  наклона образующей начальной поверхности червяка определяется по формуле [11]:

$$\varepsilon = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\Delta/2 \operatorname{tg} \alpha_0),$$

где  $\Delta = a\pi t/l_p$  – коэффициент приращения шага;  
 $a$  – коэффициент допустимого износа;  
 $l_p$  – дополнительная длина червяка;  
 $\alpha_0$  – угол зацепления.

Коэффициент допустимого износа зависит от знаменателя стандартного ряда модулей. При знаменателе ряда, равном 1,06, коэффициент  $a = 0,03$ . Дополнительная длина  $l_p$  является конструктивным признаком двухшаговых червяков. Для станочных делительных передач  $l_p = 10 \dots 15$  мм.

Орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь связывает электродвигатель  $M_1$  со шпинделем 6 заготовки. Поэтому РП имеют вид:

$$n_{M1}, \text{ мин}^{-1}, \text{ круговая частота электродвигателя} \rightarrow n_{шп6}, \text{ мин}^{-1}, \\ \text{круговая частота шпинделя 6.}$$

Тогда УКЦ:

$$n_{шп6} = n_{M1} \cdot c_3 \cdot i_v.$$

Откуда ФН:

$$i_v = n_{шп6} / n_{M1} \cdot c_3,$$

где  $c_3$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Орган настройки  $i_s$ . Расчетная цепь связывает шпиндель 6 заготовки с  $TB_1$  продольного суппорта 8. РП расчетной цепи имеют вид:

$$1 \text{ об. шпинделя заготовки} \rightarrow s \text{ мм перемещения суппорта 8.}$$

Тогда УКЦ:

$$s = 1 \cdot c_4 \cdot i_s \cdot t_{TB1},$$

где  $c_4$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_s = s / c_4 \cdot t_{TB1}.$$

Станок работает следующим образом. После наладки органов настройки и установки обрабатываемой заготовки по линии центров станка по циклу обработки включается электродвигатель  $M_1$ . Движение от электродвигателя по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 3 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель чашечного резца получает вращательное движение  $B_1$ , а шпиндель заготовки – движение  $B_2 + B_3$ . Согласованные движения шпинделей воспроизводят профиль червяка. Одновременно при включенных муфтах 9, 11, 12 движение от электродвигате-

ля  $M_1$  по внешней связи группы подачи через звено соединения связей 10 общается во внутреннюю связь этой группы. В итоге продольный суппорт 8 и поперечный суппорт 13, несущие шпиндель червячного резца, получают движения  $П_4$  и  $П_5$  соответственно. Функциональная связь этих движений обеспечивает перемещение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. В итоге шаг витка червяка по противоположным сторонам его профиля будет соответствовать выражению [9]:

$$t_{\sigma, m} = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha_0 / \cos(\alpha_0 \pm \varepsilon),$$

где  $t_{\sigma, m}$  – соответственно больший и меньший шаги витка;

$\alpha_0$  – угол зацепления;

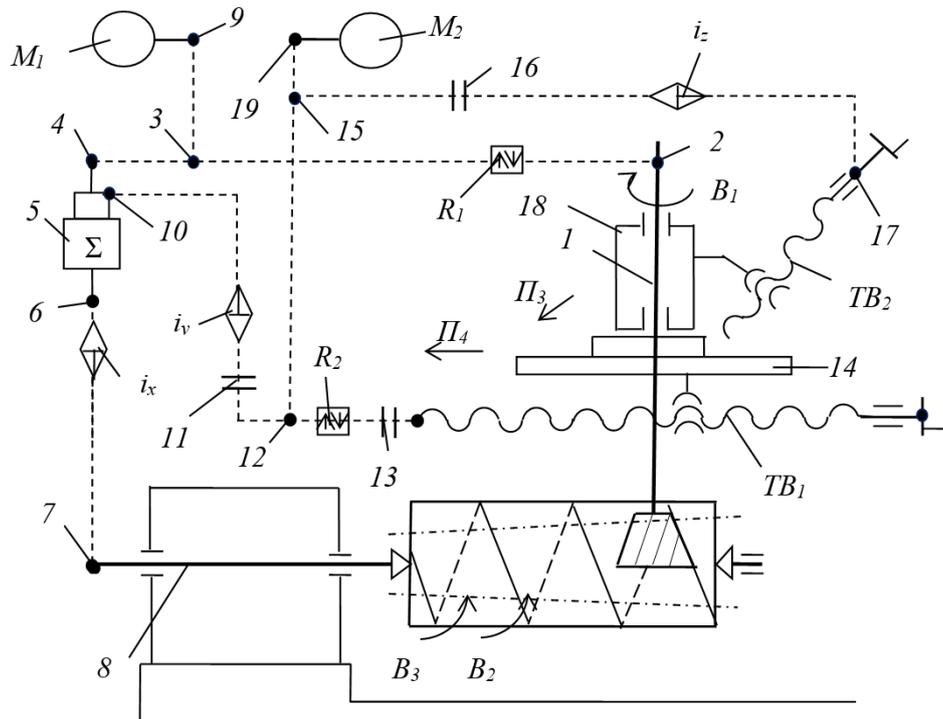
$\varepsilon$  – угол наклона образующей начальной поверхности;

знаки «+» и «-» относятся соответственно к большему и меньшему шагу.

На станке можно обрабатывать также традиционные одношаговые червяки. При обработке такого червяка посредством муфты 12 отсоединяется от привода подачи тяговый вал  $TB_2$  поперечного суппорта 14. В итоге формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$  и  $\Phi_s(П_4П_5)$  преобразуются к виду  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(B_3П_4)$ . Вывод ФН для органов настройки обеих групп аналогичен рассмотренному выше при анализе структуры базового станка.

Современная тенденция при проектировании металлорежущих станков с механическими связями – оснащение формообразующих кинематических групп индивидуальными управляемыми, например, асинхронными или синхронными электродвигателями с использованием частотных преобразователей. Такой подход создает предпосылки оснащения станка простейшей системой ЧПУ, например, NC (Numerical control) с использованием программируемого контроллера. При этом настройка на траекторию формообразующих движений, как и в схеме с механическими связями, будет осуществляться гитарами сменных зубчатых колес. Такой вариант станка рационален в серийном производстве с установившейся номенклатурой обрабатываемых червяков. При уменьшении серийности при одновременном увеличении номенклатуры обрабатываемых деталей возрастают трудозатраты на переналадку механических органов настройки (гитар сменных зубчатых колес) на траекторию, что ведет к снижению коэффициента мобильности станка. Поэтому для достижения высокого коэффициента мобильности в единичном и мелкосерийном производстве с неуставившейся номенклатурой необходима более сложная система ЧПУ, при которой механические органы настройки на траекторию в обеих формообразующих группах заменяются электронными связями между исполнительными органами. Обязательным условием при этом является использование на каждом исполнительном органе отдельного регулируемого электродвигателя.

На рисунке 3.4 приведен вариант модернизации структурной схемы станка для нарезания червяков чашечным резцом с отдельным приводом формообразующих групп.



**Рисунок 3.4. – Структурная схема станка с отдельным приводом формообразующих групп для точения двухшаговых червяков**

Кинематическая структура станка включает двухэлементарную группу обката  $\Phi_v(B_1B_2)$  и трехэлементарную винторезную группу  $\Phi_s(B_3\Pi_4\Pi_5)$ . Внутренние связи кинематических групп соединены планетарным суммирующим механизмом 5 для физического сложения двух вращательных движений на шпинделе заготовки, являющимся исполнительным органом обеих формообразующих групп.

Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$  воспроизводит зацепление червячной передачи. Ее внутренняя связь – структурная цепь, связывающая шпиндели инструмента и заготовки:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель } 1 \text{ чашечного резца} \leftarrow 2 \leftarrow \text{реверс } R_1 \leftarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow \\ \rightarrow 6 \rightarrow i_x \rightarrow 7 \rightarrow \text{шпиндель } 8 \text{ заготовки} \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 9 \rightarrow 3 \text{ (звено соединения с внутренней связью)}.$$

Группа настраивается на траекторию органом настройки  $i_x$ , на скорость (резания) – частотным преобразователем, управляющим электродвигателем  $M_1$ , на направление – реверсом  $R_1$ .

Группа  $\Phi_s(B_3\Pi_4\Pi_5)$  осуществляет воспроизведение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. Ее внутренняя связь содержит две структурные цепи.

Первая структурная цепь:

$$B_3 \leftarrow \text{шпиндель } 8 \text{ заготовки} \leftarrow 7 \leftarrow i_x \leftarrow 6 \leftarrow 5 \leftarrow 10 \leftarrow i_y \leftarrow 11 \leftarrow 12 \rightarrow \\ \rightarrow R_2 \rightarrow 13 \rightarrow TB_1 \rightarrow \text{продольный суппорт } 14 \rightarrow \Pi_4.$$

Вторая структурная цепь:

$$\Pi_4 \leftarrow \text{продольный суппорт } 14 \leftarrow TB_1 \leftarrow 13 \leftarrow R_2 \leftarrow 12 \leftarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow \\ \rightarrow i_z \rightarrow 17 \rightarrow TB_2 \rightarrow \text{поперечный суппорт } 18 \rightarrow \Pi_5.$$

Внешняя связь:

$$M_2 \rightarrow 19 \rightarrow 15 \text{ (звено соединения связей для второй цепи)} \rightarrow \\ \rightarrow 12 \text{ (звено соединения связей для первой цепи)}.$$

Группа настраивается на траекторию органами настройки (гитары сменных зубчатых колес)  $i_y$  и  $i_z$ , на скорость – частотным преобразователем, управляющим электродвигателем  $M_2$ , на путь и исходное положение – по упорам системы управления. Причем размерность параметра скорость (подача) – мм/мин.

Выведем ФН для органов настройки  $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_z$  на траектории обеих формообразующих групп.

Орган настройки  $i_x$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящей червячное зацепление. Следовательно, РП для органа настройки  $i_x$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя заготовки } (B_2) \rightarrow k/z \text{ поворота резца } (B_1).$$

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$k/z = 1 \cdot i_{01} \cdot i_{\Sigma} \cdot i_x.$$

Откуда ФН:

$$i_x = k/z / i_{01} \cdot i_{\Sigma},$$

где  $k$  – количество заходов нарезаемого червяка;

$z$  – число зубьев чашечного резца;

$i_{01}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$i_{\Sigma}$  – передаточное отношение суммирующего механизма.

Орган настройки  $i_y$ . Расчетная цепь совпадает с первой структурной цепью внутренней связи группы  $\Phi_s(B_3\Pi_4\Pi_5)$ . Эта структурная цепь имитирует винтовое перемещение инструмента по начальной цилиндрической поверхности. Следовательно, РП для органа настройки  $i_y$  имеют вид:

$$T \text{ мм перемещение резца } (\Pi_4) \rightarrow 1 \text{ обороту заготовки } (B_3).$$

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$l = i_{02} \cdot i_{\Sigma} \cdot T/t_{TB} \cdot i_y.$$

Откуда ФН:

$$i_y = t_{TB}/i_{02} \cdot i_{\Sigma} \cdot T.$$

где  $T$  – шаг нарезаемого червяка;

$i_{02}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$i_{\Sigma}$  – передаточное отношение суммирующего механизма;

$t_{TB}$  – шаг тягового вала.

Орган настройки  $i_z$ . Расчетная цепь совпадает со второй структурной цепью внутренней связи группы  $\Phi_s(B_3\Pi_4\Pi_5)$ . Эта структурная цепь осуществляет смещение траектории винтового перемещения инструмента с начальной цилиндрической поверхности на начальную коническую поверхность. Следовательно, РП для органа настройки  $i_z$  имеют вид:

*$L$  мм перемещения чашечного резца ( $\Pi_4$ )  $\rightarrow$   $l$  мм перемещения чашечного резца ( $\Pi_5$ ).*

Тогда УКЦ:

$$l = L \cdot i_{03} \cdot 1/t_{TB1} \cdot i_z \cdot t_{TB2}.$$

Откуда ФН:

$$i_z = i_{03} (t_{TB2}/t_{TB1}) \operatorname{tg}\varepsilon,$$

где  $L$  – параметр путь (произвольное число);

$l = L \cdot \operatorname{tg}\varepsilon$ ;

$\varepsilon$  – угол наклона образующей начальной поверхности двухшагового червяка;

$i_{03}$  – произведение постоянных передач расчетной цепи.

Станок работает следующим образом. По циклу обработки последовательно включаются электродвигатели  $M_1$  и  $M_2$ . Движение от электродвигателя  $M_1$  по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 3 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель чашечного резца получает вращательное движение  $B_1$ , а шпиндель заготовки через вход 4 – выход 6 суммирующего механизма 5 – движение  $B_2$ . Согласованные движения шпинделей воспроизводят профиль червяка. Одновременно при включенных муфтах 11, 13, 16 движение от электродвигателя  $M_2$  по внешней связи группы подачи через звенья соединения связей 12 и 15 сообщается в обе структурные цепи внутренней связи этой группы. В итоге продольный суппорт 14 и поперечный суппорт 17, несущие шпиндель чашеч-

ного резца, получают движения  $П_4$  и  $П_5$  соответственно, а шпиндель заготовки через вход  $10$  – выход  $6$  суммирующего механизма  $5$  – движение  $В_3$ . Функциональная связь движений  $В_3, П_4, П_5$  обеспечивает перемещение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. При этом посредством суммирующего механизма  $5$  на шпинделе заготовки физически складываются движения  $В_2$  и  $В_3$ .

Функциональная связь этих движений обеспечивает перемещение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. В итоге шаг витка червяка по противоположным сторонам его профиля будет соответствовать выражению [9]:

$$t_{б, м} = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha_0 / \cos(\alpha_0 \pm \varepsilon),$$

где  $t_{б, м}$  – соответственно больший и меньший шаги витка;

$\alpha_0$  – угол зацепления;

$\varepsilon$  – угол наклона образующей начальной поверхности;

знаки «+» и «-» относятся соответственно к большему и меньшему шагу.

На станке можно обрабатывать также традиционные одношаговые червяки. При обработке такого червяка посредством муфты  $16$  отсоединяется от привода подачи тяговый вал  $ТВ_2$  поперечного суппорта  $17$ . В итоге трехэлементарная формообразующая группа подачи  $\Phi_s(В_3П_4П_5)$  преобразуется в двухэлементарную группу  $\Phi_s(В_3П_4)$ .

## **ГЛАВА 4. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ЭЛЕКТРОННЫМИ СВЯЗЯМИ В ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ГРУППАХ**

### **4.1 Постановка задачи**

Согласно рассматриваемой научной парадигме, определяющую роль при синтезе кинематической структуры станка играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. В зависимости от характеристического образа инструмента и класса воспроизведения образующей и направляющей формообразующие группы делятся на два вида. Первый вид составляют простые, или элементарные, формообразующие группы. В таких группах траектория вращательного или поступательного формообразующего движения не настраивается, а ее вид задается непосредственно соответствующей элементарной вращательной или поступательной кинематической парой. Второй вид составляют сложные формообразующие группы, воспроизводящие сложное двухэлементарное или трехэлементарное формообразующее движение, имитирующее более сложный механизм, например, передачу винт – гайка, зубчатую передачу, червячную передачу, зубчато-реечную передачу. В таких группах траектория формообразующего движения настраивается соответствующим механизмом, например, гитарой сменных зубчатых колес, с точностью до 5–7 знаков после запятой.

Современная научная парадигма разрабатывалась на основе кинематического анализа станочного оборудования с механическими связями. Создание мехатронных технических систем, в том числе металлорежущих станков с ЧПУ, привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, структура которых представляет собой объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. Поэтому представляется целесообразным с позиций современной парадигмы рассмотреть функциональное проектирование в методике познания станочного оборудования с ЧПУ.

Анализ патентных источников показывает, что в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, функциональная связь исполнительных органов группы осуществляется, как правило, отслеживающей синхронизацией по схеме задающая – ведомая координаты и по схеме равнозначных координат. Обязательным условием при этом является использование для каждого исполнительного органа отдельного механического источника энергии движения, например, регулируемого электродвигателя.

## 4.2 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме задающая – ведомая координаты

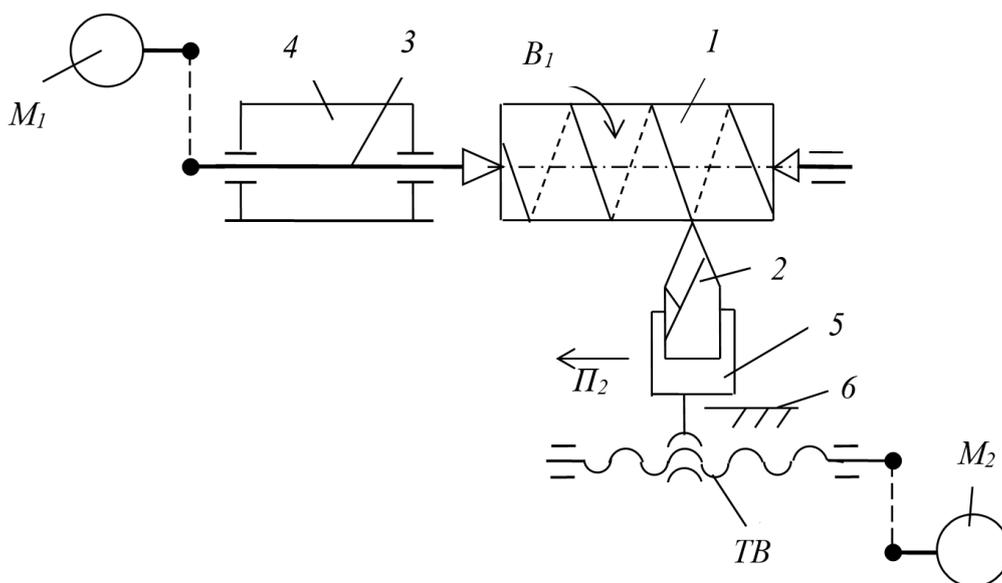
Функциональное проектирование мехатронной технической системы, функционирующей по схеме задающая – ведомая координаты, проведем на примере частной структурной схемы резьбонарезного станка.

Классический способ нарезания резьбы резцом, у которого характеристический образ соответствует профилю нарезаемой резьбы, рассмотрен в разделе. По этому способу заготовке, определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а фасонному (профильному) резцу – поступательное движение  $P_2$ , функционально связанное с движением  $B_1$  заготовки. Класс образования резьбы копирование – след ( $E - H^C$ ). Причем сложное исполнительное движение  $\Phi_v(B_1P_2)$ , состоящее из двух согласованных между собой элементарных движений (вращательного  $B_1$  и поступательного  $P_2$ ), воспроизводит направляющую (винтовую линию) обрабатываемой поверхности. Следовательно, частная винторезная структура станка должна осуществлять только одно сложное формообразующее движение, состоящее из двух функционально связанных элементарных вращательного и поступательного движений.

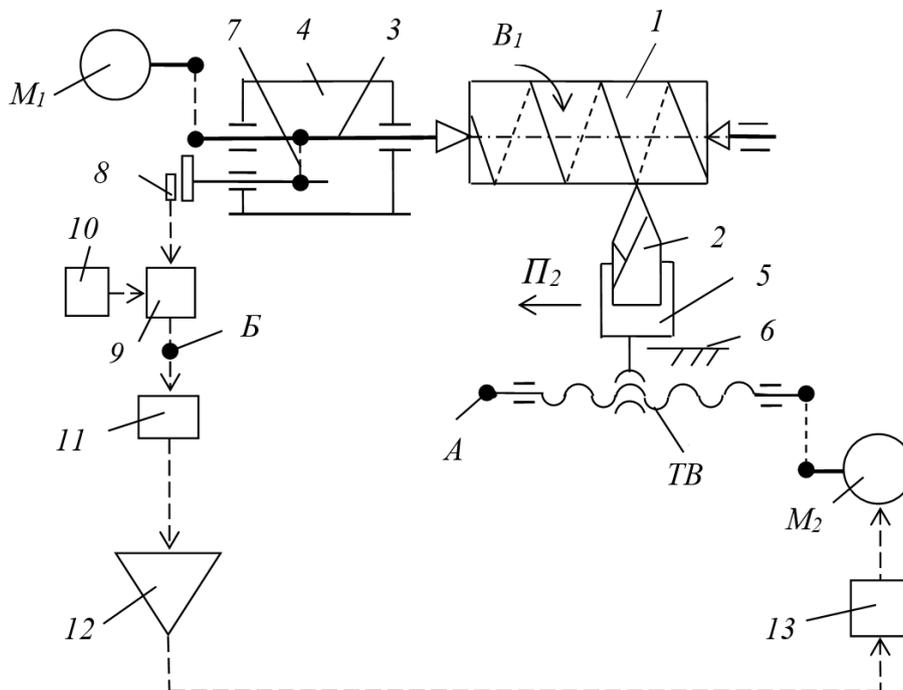
На рисунке 4.1 представлены исполнительные органы проектируемого станка. Исполнительный орган, несущий заготовку 1, представляет собой шпиндель 3 (задающая координата), смонтированный с возможностью вращения  $B_1$  в стационарном блоке 4, называемом передней бабкой. Исполнительный орган, несущий резец 2, – это подвижный блок 5, называемый продольным суппортом или кареткой (ведомая координата), смонтированным с возможностью поступательного перемещения  $P_2$  по направляющим 6 параллельно линии центров станка. Поступательное перемещение суппорта обеспечивается посредством тягового вала ( $TB$ ). В токарно-винторезных станках с ЧПУ в качестве тягового вала используется передача винт – гайка с телами качения. Каждый исполнительный орган оснащен отдельным регулируемым электродвигателем.

Для воспроизведения сложного формообразующего движения  $\Phi_v(B_1P_2)$ , воспроизводящего направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы (рисунк 4.2), соединим шпиндель 3, несущий заготовку, с тяговым валом  $TB$  суппорта 5, несущего резец 2. Для этого соединим шпиндель 3 (задающая координата) посредством механической передачи 7 с импульсным измерительным преобразователем 8. Выход этого преобразователя соединим с входом управляемого делителя частоты, выполненного в виде счетчика импульсов 9

и блока задания коэффициента деления  $10$ . Выход счетчика  $9$  делителя частоты соединим с входом импульсно-аналогового преобразователя  $11$ . Выход этого преобразователя соединим через предварительный усилитель  $12$  и усилитель мощности  $13$  с электродвигателем  $M_2$ , кинематически связанным с тяговым валом  $TB$  привода суппорта  $5$  (ведомая координата). Ведущую координату – шпиндель  $3$  – кинематически соединим с электродвигателем  $M_1$ .



**Рисунок 4.1 – Исполнительные органы гибридной структурной схемы резьбонарезного станка**



**Рисунок 4.2. – Гибридная структура резьбонарезного станка с системой синхронизации по схеме задающая – ведомая координаты**

Запишем связи, проектируемой гибридной структурной схемы на языке символов. Внутренняя связь – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 7 \rightarrow (\text{синхронная следящая система: } 8 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow \\ \rightarrow 12 \rightarrow 13) M_2 \rightarrow ТВ \rightarrow 5 \rightarrow П_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 (\text{звено соединения связей}).$$

Принципиальной особенностью данной гибридной схемы является размещение электродвигателя  $M_2$  ведомой координаты во внутренней связи формообразующей группы. Поэтому в качестве этого электродвигателя необходимо использовать высокомоментную машину постоянного тока или синхронную машину переменного тока. В качестве электродвигателя  $M_1$  можно использовать менее дорогую традиционную асинхронную машину переменного тока.

Движение  $\Phi_v(B_1/П_2)$  имеет незамкнутую траекторию и настраивается по всем пяти параметрам: на траекторию – делителем частоты; на скорость – посредством задания величины напряжения при использовании электродвигателя постоянного тока или частоты переменного тока при использовании электродвигателя переменного тока; на направление, исходное положение и путь – программно на программноносителе или непосредственно на дисплее устройства ЧПУ в соответствующем коде.

Делитель частоты (счетчик 9 – блок установки коэффициента деления 10) является аналогом механического органа настройки на траекторию (например, гитары сменных зубчатых колес). Поэтому коэффициент деления определим по методике определения передаточного отношения механического органа настройки на траекторию. Следовательно, РП для коэффициента деления имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (П_2).$$

Тогда УКЦ:

$$P = I \cdot k_d \cdot i_0 \cdot P_{ТВ},$$

где  $k_d$  – коэффициент деления;

$P$  – шаг нарезаемой резьбы;

$i_0$  – передаточное отношение передачи, связывающей электродвигатель  $M_2$  с тяговым валом;

$P_{ТВ}$  – шаг тягового вала.

Откуда ФН:

$$k_d = P / (i_0 P_{ТВ}).$$

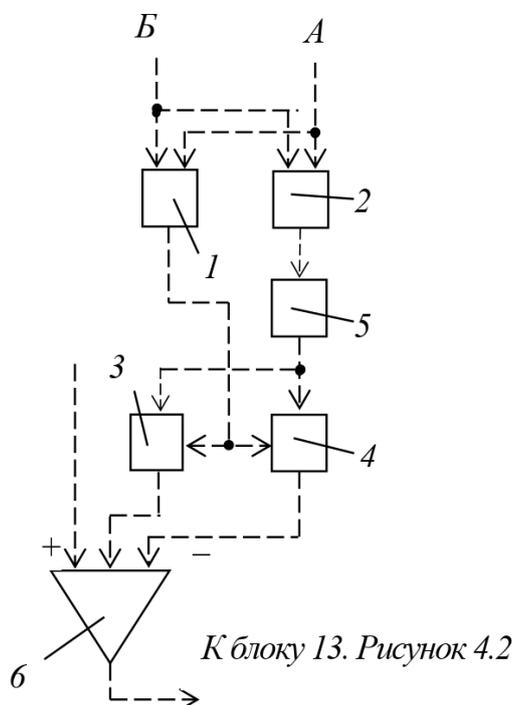
При включении управляемого электродвигателя  $M_1$  ведущая координата – шпиндель 3 – получает движение  $B_1$  с круговой частотой, соответствующей скорости резания. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в импульсном измерительном преобразователе 8 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения  $B_1$ . Этот сигнал поступает в счетчик 9 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 10 коэффициентом деления. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 11 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через предварительный усилитель 12 поступает на усилитель мощности 13. С выхода этого усилителя задающий сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который посредством тягового вала  $TB$  сообщает движение  $П_2$  ведомой координате – суппорту 5, несущему резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой координате обеспечивается воспроизведение винтовой линии резьбовой поверхности сложным двухэлементарным движением  $\Phi_v(B_1П_2)$ .

Полученная в результате функционального проектирования мехатронная структурная схема используется преимущественно в качестве частной резьбонарезной кинематической структуры в универсальных токарно-винторезных станках с ЧПУ.

При функционировании полученной структурной схемы девиация механики ведомой координаты (электродвигатель  $M_2$  – тяговый вал  $TB$  – суппорт 5) проецируется на воспроизводимую винтовую поверхность. Это явление, снижающее качественные показатели резьбы, можно устранить посредством адаптивной двухсторонней коррекции задающего сигнала ведомой координаты. Для этого используем блок формирователя сигнала коррекции (рисунок 4.3). Этот блок [14] содержит знаковый 1 и фазовый 2 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора 1 соединен с управляющим входом ключа 3, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 4, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 2 соединен посредством импульсно-аналогового преобразователя 5 с аналоговыми входами ключей 3 и 4. Выход ключа 3 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 6, а выход ключа 4 – с входом вычитания этого сумматора.

Первые входы обоих дискриминаторов соединим с разъемом  $B$  (см. рисунок 4.2). Вторые входы дискриминаторов соединим с импульсным измерительным преобразователем, который установим на тяговом валу  $TB$  (см. рисунок 4.2, позиция  $A$ ). Из структурной схемы (см. рисунок 4.2) исключим предварительный усилитель 12, а выход импульсно-аналогового преобразователя 11

соединим с первым входом сложения параллельного сумматора 6 формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора соединим с усилителем мощности 13.



**Рисунок 4.3 – Формирователь сигнала коррекции задающего сигнала**

Двухсторонняя коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 6, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 1 и фазового 2 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 9 делителя частоты. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с импульсно-аналогового преобразователя, устанавливаемого на тяговом валу, поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $\Pi_2$  суппорта 5 (см. рисунок 4.2, позиция А). В результате сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора 1 образуется отрицательный потенциал при отставании ведомой координаты от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 3 и 4. Одновременно на выходе фазового дискриминатора 2 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 5 поступает на аналоговые входы ключей 3 и 4. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 6 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании ведомой координаты сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 3, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения

параллельного сумматора  $b$ , а при опережении этот сигнал поступает через ключ  $4$ , управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре  $b$  происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала ведомой координаты, то есть происходит его непрерывная двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

### 4.3 Синтез гибридной кинематической структуры станка по схеме равнозначных координат

Методику функционального проектирования кинематической структуры станка с системой синхронизации по схеме равнозначных координат рассмотрим на примере фрезерования червячной фрезой винтовых и прямых шлицев.

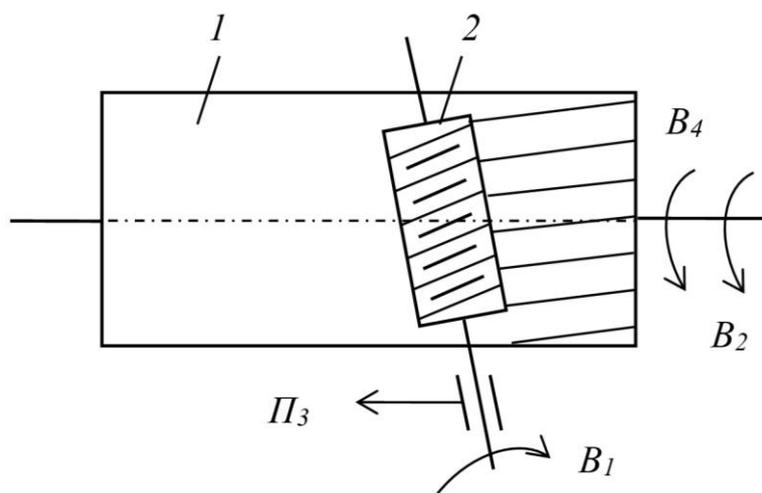
Боковые поверхности прямобочных шлицев очерчены отрезками прямой, а боковые поверхности эвольвентных шлицев – отрезками левой и правой эвольвент. Линия прямобочных и эвольвентных шлицев по длине может быть как прямой, так и винтовой.

Червячная фреза представляет собой совокупность исходных режущих реек, расположенных на цилиндре и смещенных одна относительно другой по винтовой линии. Режущий контур зубьев, каждый из которых имеет правую и левую режущие кромки в виде материальных линий, очерчен отрезками прямых для прямобочного шлица и отрезками левой и правой эвольвент для эвольвентного шлица. Характеристический образ червячной фрезы есть  $K$ -элементный класс равномошных множеств  $\{M_3\}_K$ , где  $\{M_3\}$  – множество материальных точек, образующих вершинную и боковые режущие кромки каждого зуба фрезы [15].

Размеры режущих зубьев обычно соответствуют размерам впадин между нарезаемыми шлицами, а их геометрическое взаимное положение обусловлено необходимостью выполнения делительного процесса и определяется окружным шагом нарезаемого шлицевого вала. Форма режущей кромки червячной фрезы и форма профиля шлица нарезаемого вала различаются между собой. Поэтому профили шлицев можно получить только посредством сложного движения обката. Воспроизводящая линия по длине шлица образуется посредством касания, так как образуемая линия является касательной к ряду дополнительных окружностей, создаваемых вращающимися материальными точками воспроизводящего режущего контура (характеристического образа

инструмента). Таким образом, образование боковой поверхности шлица должно осуществляться сочетанием обката (профиль шлица) и касания (линия шлица по длине).

На рисунке 4.4 приведена схема классического способа обработки шлицевых валов червячной фрезой. По классу образования шлицевой поверхности ( $H^k - П$ ) устанавливаем количество движений формообразования. Для воспроизведения профиля шлицев обкатом фрезе и заготовке сообщают функционально связанные движения соответственно  $B_1$  и  $B_2$ , образующие сложное двухэлементарное формообразующее движение  $\Phi_v(B_1B_2)$  скорости резания. А для воспроизведения касанием винтовой линии по длине шлицев – функционально связанные движения соответственно  $\Pi_3$  и  $B_4$ , образующие сложное формообразующее движение  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$  подачи. При этом движение  $B_4$  выполняет дополнительный поворот фрезы для перемещения ее характеристического образа по винтовой направляющей в движении  $\Pi_3$ .

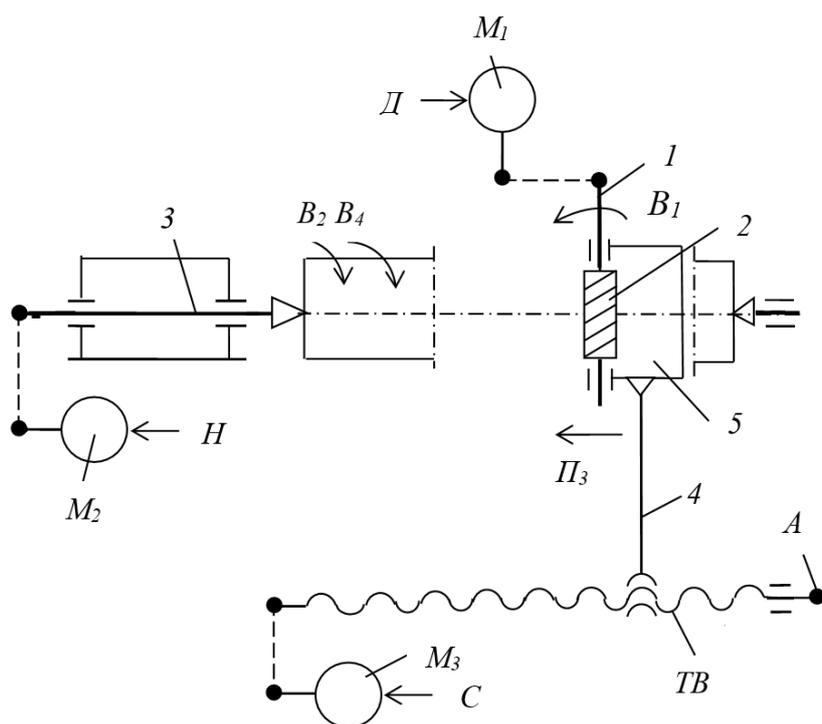


**Рисунок 4.4. – Способ фрезерования червячной фрезой шлицевых валов**

При фрезеровании прямых шлицев отпадает необходимость в движении  $B_4$ . Следовательно, движение касания должно осуществлять перемещение характеристического образа по прямой направляющей. В этом случае сложное двухэлементарное формообразующее движение  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$  преобразуется в простое движение  $\Phi_s(\Pi_3)$ . Однако по определению движение касания – это два одновременно выполняемых, функционально не связанных простых (элементарных) вращательных и прямолинейных движения. Отсюда следует, что простое движение  $\Phi_s(\Pi_3)$  более корректно представить в виде составного движения  $\Phi_s(\Pi_3*B_1)$ , где символ «\*» составного движения однозначно устанавливает логическую связь между вербальным и логико-математическим определением понятия движения касания.

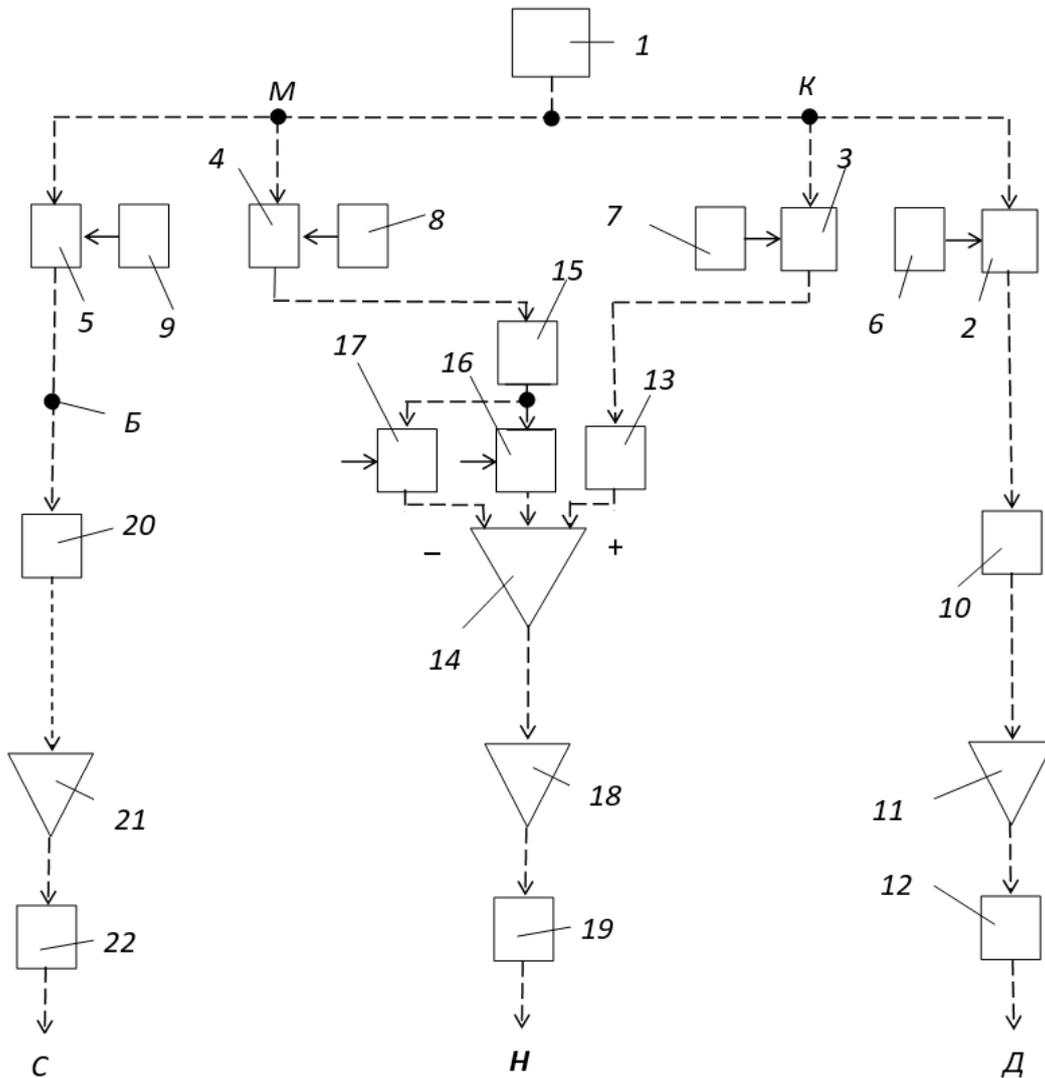
При фрезеровании червячными фрезами процессы деления и врезания осуществляются попутно в процессе формообразования. Следовательно, основная часть структуры станка должна состоять только из сложных формообразующих групп  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$  при фрезеровании винтовых шлицев или из сложной и простой формообразующих групп  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3^*B_1)$  при фрезеровании прямых шлицев.

Общую компоновку (рисунок 4.5) базовых блоков и подвижных исполнительных органов выполним аналогично компоновке, принятой для шлицефрезерных станков. Управляемые электродвигатели предпочтительно синхронные переменного тока  $M_1, M_2, M_3$  кинематически свяжем соответственно со шпинделем 1 червячной фрезы 2, шпинделем 3, несущим заготовку, и тяговым валом  $TB$ , выполненным в виде передачи винт – гайка с телами качения. Гайку тягового вала жесткой связью 4 соединим с суппортом 5, несущим шпиндель 1 червячной фрезы 2. Шпиндель червячной фрезы, шпиндель заготовки и суппорт червячной фрезы являются подвижными исполнительными органами станка.



**Рисунок 4.5. – Исполнительные органы гибридной структурной схемы шлицефрезерного станка**

Общим задачиком для исполнительных органов (рисунок 4.6) является эталонный генератор 1, вырабатывающий задающий импульсный сигнал, частота которого превышает частоту импульсных сигналов – аналогов частот вращения шпинделя червячной фрезы, шпинделя заготовки и тягового вала.



**Рисунок 4.6. – Система синхронизации исполнительных органов шлицефрезерного станка по схеме равнозначных координат**

Эталонный генератор  $1$  соединим с входами делителей частоты, выполненных в виде счетчиков  $2, 3, 4, 5$ , и соединенных с ними блоков установки коэффициентов деления соответственно  $6, 7, 8, 9$ . Функция этих блоков – установка передаточных отношений при наладке станка. Выход счетчика  $2$  соединим с входом блока  $10$  круговой частоты шпинделя фрезы в движении  $B_1$ . Выход блока  $10$  посредством предварительного усилителя  $11$  соединим с усилителем мощности  $12$ . А выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем  $M_1$  (см. рисунок 4.5) привода вращения фрезы.

Выход счетчика  $3$  соединим с входом блока  $13$  круговой частоты шпинделя заготовки в движении  $B_2$ , выход которого соединим с первым входом сложения параллельного сумматора  $14$ . Выход счетчика  $4$  соединим с входом блока  $15$  круговой частоты шпинделя заготовки в движении  $B_4$ , у которого выход соединен с входами ключей  $16$  и  $17$ , управляемых положительным по-

тенциалом. Выходы этих ключей соединим соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 14. Выход параллельного сумматора 14 соединим через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 с управляемым электродвигателем  $M_2$  (см. рисунок 4.5) привода вращения шпинделя заготовки.

Выход счетчика 5 соединим с входом блока 20 круговой частоты ведущего звена тягового вала  $TB$ , преобразующего вращательное движение в продольную подачу  $\Pi_3$  суппорта 5. Выход блока 20 посредством предварительного усилителя 21 соединим с усилителем мощности 22. Выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем  $M_3$  (см. рисунок 4.5) привода продольной подачи суппорта.

Блоки 10, 13, 15, 20 круговых частот соответственно шпинделя фрезы, шпинделя заготовки, винта тягового вала выполняются одинаково по схеме частота – напряжение. В этих блоках задающие импульсные сигналы преобразуются в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Функциональное назначение блоков – задание скорости резания в движении  $V_1$  шпинделя червячной фрезы, суммарной круговой подачи шпинделя заготовки в движении  $V_2 \pm V_4$ , продольной подачи в движении  $\Pi_3$  суппорта червячной фрезы.

Запишем связи проектируемой гибридной структурной схемы станка на языке символов, используемом в данной работе.

Группа  $\Phi_v(B_1 B_2)$ . Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая червячную фрезу и обрабатываемую заготовку:

$$V_1 \leftarrow \text{шпиндель 1 фрезы} \leftarrow M_1 \rightarrow D \leftarrow 12 \leftarrow \text{электронный вал} (11 \leftarrow 10 \leftarrow \leftarrow 2 \leftarrow \text{разъем } K \rightarrow 3 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 18) \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow \text{шпиндель 3} \rightarrow V_2.$$

Внешняя связь:

*эталонный генератор 1  $\rightarrow$  разъем  $K$  (звено соединения связей).*

Группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты (3–7), на скорость воспроизведения профиля шлицев (скорость резания) – делителем частоты (2–6).

Группа  $\Phi_s(\Pi_3 B_4)$ . Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая суппорт 5, фрезы и обрабатываемую заготовку:

$$\Pi_3 \leftarrow \text{суппорт 5} \leftarrow TB \leftarrow M_3 \leftarrow C \rightarrow 22 \leftarrow \text{электронный вал} (21 \leftarrow 20 \leftarrow 5 \leftarrow \leftarrow \text{разъем } M \rightarrow 4 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \text{ или } 17 \rightarrow 14 \rightarrow 18) \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow \text{шпиндель 3} \rightarrow V_4.$$

Внешняя связь:

*эталонный генератор 1  $\rightarrow$  разъем  $M$  (звено соединения связей).*

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию – делителем частоты (4–8), на скорость воспроизведения винтовой линии (подачи) – делителем частоты (5–9), на путь и исходное положение – программно.

Согласно нормативам резания, при шлицефрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение  $B_1$ ), а подача – по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение  $P_3$ ).

При наладке станка блоком 6 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 2, соответствующую заданной скорости резания. Аналогично блоком 9 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 5, соответствующую заданной подаче.

В мехатронных технических решениях расчетные цепи, РП, УКЦ, ФН будем рассматривать так же, как в аналогичных технических решениях, содержащих только механические связи. При этом заменим термин «передаточное отношение органа настройки» термином «коэффициент деления органа настройки». Целесообразность такой замены объясняется тем, что механический орган настройки, например, гитара сменных зубчатых колес, и делитель частоты по функциональному назначению идентичны.

Выведем коэффициенты деления  $k_1, k_2, k_3, k_4$  для делителей частоты (2–6), (3–7), (5–9), (4–8) соответственно.

Группа движения обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ . Ее внутренняя связь и расчетная цепь совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката, имеют вид:

*1 об. шпинделя 1 фрезы ( $B_1$ )  $\rightarrow$   $k/z$  об. шпинделя 3 заготовки ( $B_2$ ),*

где  $k$  – число заходов червячной фрезы;

$z$  – число нарезаемых шлицев.

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$k/z = I \cdot c_1 \cdot n_1 / n_2,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной связи;

$n_1$  – круговая частота электродвигателя  $M_1$ , соответствующая заданной скорости резания,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$n_2$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката,  $\text{мин}^{-1}$ .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$k/z = I \cdot c_1 \cdot k_1 / k_2.$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (3–7):

$$\kappa_2 = (c_1 z/k) \kappa_1,$$

где  $\kappa_1$  – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (2–6), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_1$  (скорости резания);

$\kappa_2$  – коэффициент деления, который необходимо установить на делителе частоты (3–7) для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

Группа винтового движения  $\Phi_s(П_3B_4)$ . Ее внутренняя связь и расчетная цепь совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего винтовое движение, имеют вид:

$$P \text{ мм перемещения суппорта } 5 (П_3) \rightarrow 1 \text{ об. шпинделя } 3 (B_4).$$

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$I = (P / P_{ТВ} \cdot (n_3 / n_2) \cdot c_2,$$

где  $P$  – шаг винтовой линии нарезаемых шлицев;

$P_{ТВ}$  – шаг тягового вала;

$c_2$  – произведения постоянных механических передач кинематической связи;

$n_3$  – круговая частота электродвигателя  $M_3$ , соответствующая заданной подаче, мм/мин;

$n_4$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках:

$$I = (P / P_{ТВ}) \cdot (\kappa_3 / \kappa_4) \cdot c_2.$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (4–8):

$$\kappa_4 = (c_2 T/P) \kappa_3,$$

где  $\kappa_3$  – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (5–9), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_3$  (скорости подачи);

$\kappa_4$  – коэффициент деления, который необходимо установить на делителе частоты (4–8) для обеспечения функциональной связи суппорта и шпинделя заготовки.

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму  $B_2 \pm B_4$  двух движений  $B_2$  и  $B_4$ , образующих совместно соответственно с движениями  $B_1$  и  $П_3$  движение обката  $\Phi_v(B_1 B_2)$  и винтовое движение  $\Phi_s(П_3 B_4)$ . Суммирование движений  $B_2$  и  $B_4$  осуществляется параллельным сумматором 14, являющимся аналогом механического суммирующего механизма, используемого в станках с механическими связями.

Выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий шлицев и червячной фрезы. Знак «+» соответствует условию, когда винтовые линии одноименны, например, обе левые, знак «-» соответствует условию, когда винтовые линии разноименны, например, одна правая, а другая левая. Необходимый знак устанавливается при наладке устройства подачей управляющего сигнала на потенциальный вход или ключа 16, или ключа 17.

Станок работает следующим образом. При включении эталонного генератора 1 задающий высокочастотный импульсный сигнал с его выхода поступает на счетчики 2, 3, 4, 5 делителей частоты, в которых происходит деление задающего сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках задания этих коэффициентов 6, 7, 8, 9.

Импульсный сигнал с выхода счетчика 2 поступает на вход блока 10 круговой частоты шпинделя фрезы, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода блока 10 сигнал через предварительный усилитель 11 и усилитель мощности 12 сообщается управляемому электродвигателю  $M_1$ , который сообщает вращательное движение  $B_1$  шпинделю фрезы с круговой частотой, соответствующей заданной скорости резания. Синхронно с выхода счетчика 3 импульсный сигнал поступает на вход блока 13 круговой подачи шпинделя заготовки в движении  $B_2$ , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 13 поступает на первый вход сложения параллельного сумматора 14. Синхронно с выхода счетчика 4 импульсный сигнал поступает на вход блока 15 круговой подачи шпинделя заготовки в движении  $B_4$ , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 15 поступает в зависимости от знака математического сложения движений  $B_2$  и  $B_4$  на одном исполнительном органе или через ключ 16 на второй вход сложения параллельного сумматора 14, или через ключ 17 на вход вычитания этого сумматора.

С выхода параллельного сумматора 14 результирующий сигнал через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 сообщается упра-

вляемому электродвигателю  $M_2$ , который сообщает вращательное движение  $B_2 \pm B_4$  круговой подачи шпинделю заготовки с круговой частотой, согласованной с движениями  $B_1$  и  $P_3$  червячной фрезы. Синхронно с выхода счетчика 5 импульсный сигнал поступает на вход блока 20 продольной подачи суппорта в движении  $P_3$ , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 20 через предварительный усилитель 21 и усилитель мощности 22 сообщается управляемому электродвигателю  $M_3$ , который посредством тягового вала  $TB$  сообщает движение  $P_3$  суппорту фрезы, пропорциональное частоте сигнала на выходе делителя частоты 5.

В итоге описанного прохождения сигнала от общего задатчика (эталонного генератора 1) к трем исполнительным органам – шпинделю червячной фрезы, шпинделю заготовки, суппорту червячной фрезы, образующим два станочных зацепления, происходит воспроизведение профиля и винтовой линии по длине шлицев на обрабатываемой заготовке.

На станке можно обрабатывать также шлицевые поверхности с прямыми шлицами. Для этого достаточно отключить делитель частоты (4–8). В результате сложное двухэлементарное движение продольной подачи суппорта  $\Phi_s(P_3 B_4)$ , а следовательно, и соответствующая формообразующая группа, преобразуется к виду  $\Phi_s(P_3 * B_2)$ .

Выше при функциональном проектировании кинематической структуры станка для нарезания резьбы решалась также задача устранения отрицательного влияния девиации механики подачи инструментального суппорта на качество обрабатываемой поверхности. Используемый для этого формирователь сигнала коррекции задающего сигнала (см. рисунок 4.3) без изменений можно включить и в проектируемую структурную схему. Для этого необходимо на тяговом валу  $TB$  (см. рисунок 4.6, позиция А) установить импульсный измерительный преобразователь, и соединить его с входом А формирователя сигнала коррекции (см. рисунок 4.3, позиция А). Вход В этого формирователя необходимо соединить со счетчиком 5 (см. рисунок 4.5, позиция Б). Из схемы синхронизации необходимо исключить предварительный усилитель 21, а выход импульсно-аналогового преобразователя 20 соединить с первым входом сложения параллельного сумматора б (см. рисунок 4.3) формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора необходимо соединить с усилителем мощности 22.

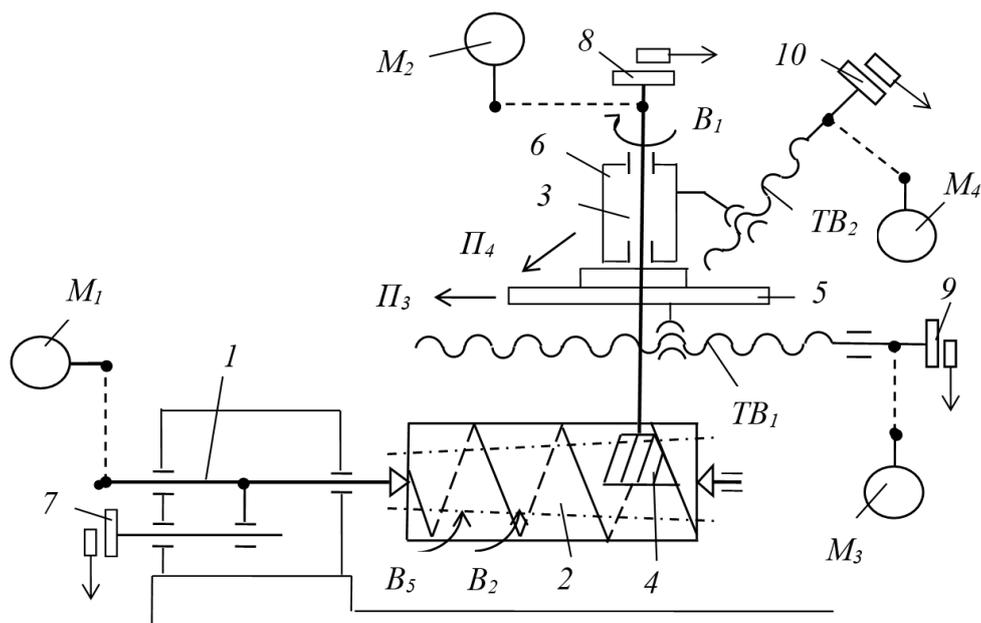
Уместно отметить, что данная мехатронная структурная схема шлицефрезерного станка, разработанная по методике функционального проектирования, признана изобретением [16].

#### 4.4 Электронная система синхронизации исполнительных органов станка для обработки двухшаговых червяков чашечным резцом

В рассмотренном выше специализированном станке с механическими связями для обработки двухшаговых червяков чашечным резцом (см. рисунок 3.4) по условиям компоновки обе формообразующие группы содержат механические передачи, в том числе органы настройки на параметры исполнительных движений. Основными органами настройки, обеспечивающими функциональную связь между исполнительными органами станка при заданных передаточных отношениях (параметр траектория) инструмент – заготовка, являются четырехколесные гитары сменных зубчатых колес. Двухэлементарная группа скорости резания  $\Phi_v$  во внутренней связи содержит один такой орган настройки, а трехэлементарная группа подачи  $\Phi_s$  – два органа настройки. При этом по внутренним связям обе группы соединены посредством дифференциального механизма, обеспечивающего сложение исполнительных движений на шпинделе заготовки. Механические передачи функциональных связей являются основным источником погрешностей при обработке и основным источником шума станка. Это обстоятельство – одна из причин поиска технических решений на основе типовых интегральных схем и управляемых приводов.

На рисунке 4.7 представлена структурная схема приводов станка для обработки червяков с начальной конической поверхностью. Общая компоновка базовых элементов выполнена аналогично компоновке, принятой для специализированных станков с механическими связями для обработки червяков чашечным резцом. Структурная схема станка содержит две сложные формообразующие группы:  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(П_3П_4B_5)$ .

Управляемые электродвигатели  $M_1, M_2, M_3, M_4$  кинематически связаны соответственно со шпинделем 1, несущим заготовку 2 обрабатываемого червяка, шпинделем 3 чашечного резца 4, тяговыми валами  $TB_1$  и  $TB_2$ , выполненными в виде передач винт – гайка с телами качения. Гайка  $TB_1$  жесткой связью соединена с продольным суппортом 5, а гайка  $TB_2$  – с поперечным суппортом 6, несущим шпиндель 3 чашечного резца 4. Шпиндель 1, шпиндель 3, продольный суппорт 5 и поперечный суппорт 6 являются исполнительными органами станка. Для обеспечения связи механики станка с системой синхронизации на шпинделях 1 и 3, винтах тяговых валов  $TB_1$  и  $TB_2$  установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно 7, 8, 9, 10. Эти преобразователи служат для преобразования механического движения исполнительных органов в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему синхронизации.



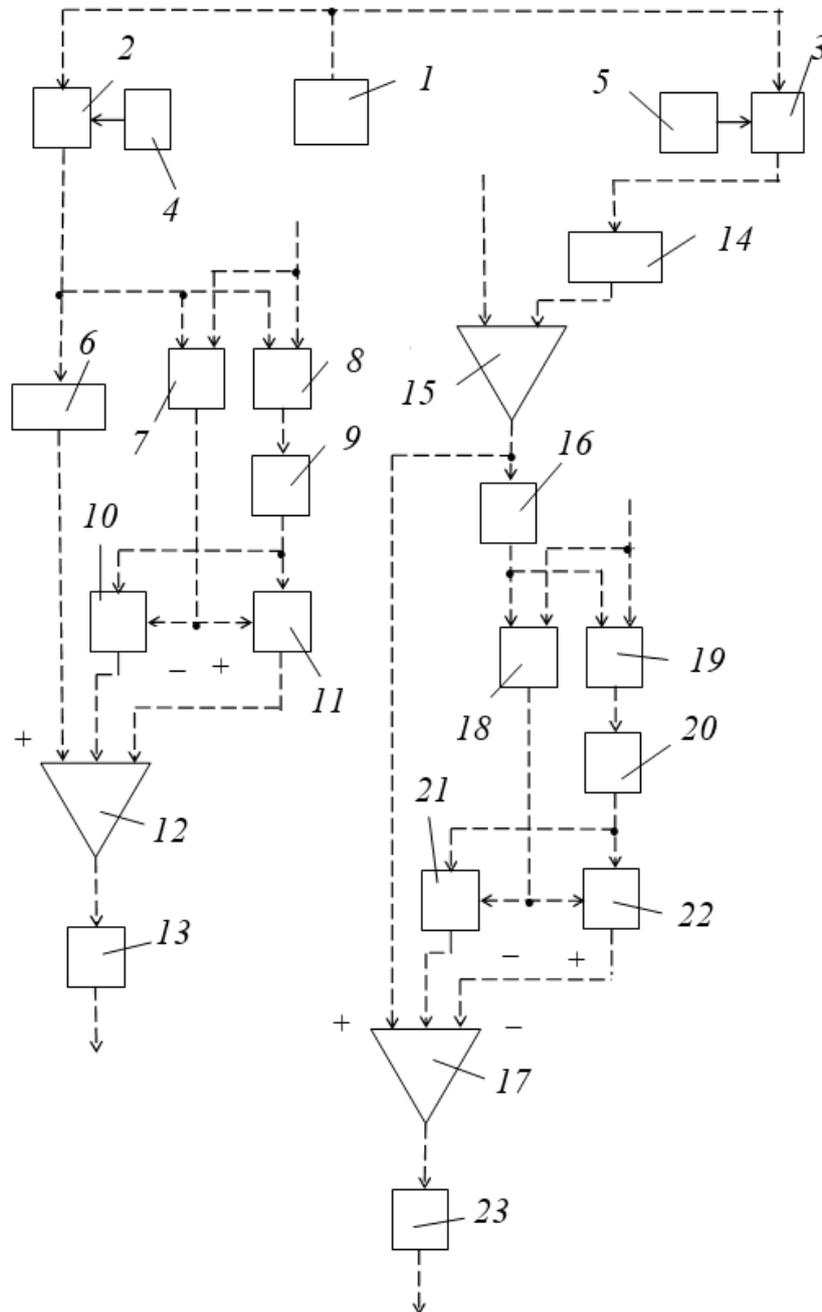
**Рисунок 4.7. – Структурная схема приводов станка для нарезания двухшаговых червяков**

Система синхронизации выполнена по схеме равнозначных координат с автоматической двухсторонней коррекцией управляющих сигналов по погрешностям механики исполнительных органов. Эта система является модификацией системы по патентному первоисточнику [16].

Система синхронизации содержит две подсистемы с общим задатчиком (эталонным генератором), вырабатывающим задающий сигнал, частота которого превышает чистоту импульсного сигнала – аналога частоты вращения шпинделя заготовки. Первая подсистема осуществляет синхронизацию приводов кинематической группы скорости резания. А вторая подсистема – синхронизацию приводов кинематической группы подачи.

На рисунке 4.8 приведена блок-схема подсистемы синхронизации (электронный вал) приводов исполнительных органов группы обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящей профиль витков червяка.

Эталонный генератор 1 соединен с входами счетчиков 2 и 3, к которым присоединены блоки установки коэффициентов деления соответственно 4 и 5. Функция этих блоков – установка передаточных отношений при настройке станка. Счетчики и соответствующие блоки установки коэффициентов деления образуют делители частоты задающих эталонных импульсных сигналов управления соответствующих исполнительных органов (управляемых координат). Выход счетчика 2 соединен с входом блока 6 круговой частоты шпинделя чашечного резца в движении  $B_1$  и первыми входами знакового 7 и фазового 8 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 8, установленным на шпинделе 3 чашечного резца (см. рисунок 4.7).



**Рисунок 4.8. – Блок-схема подсистемы синхронизации приводов группы обката  $\Phi_v(B_1B_2)$**

Выход фазового дискриминатора 8 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 9, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 10 и 11 соединены с выходом знакового дискриминатора 7. Выход блока 6 круговой частоты шпинделя фрезы соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 12, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналого-

вого ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 12 через усилитель мощности 13 соединен с управляемым электродвигателем  $M_2$  привода вращения шпинделя чашечного резца.

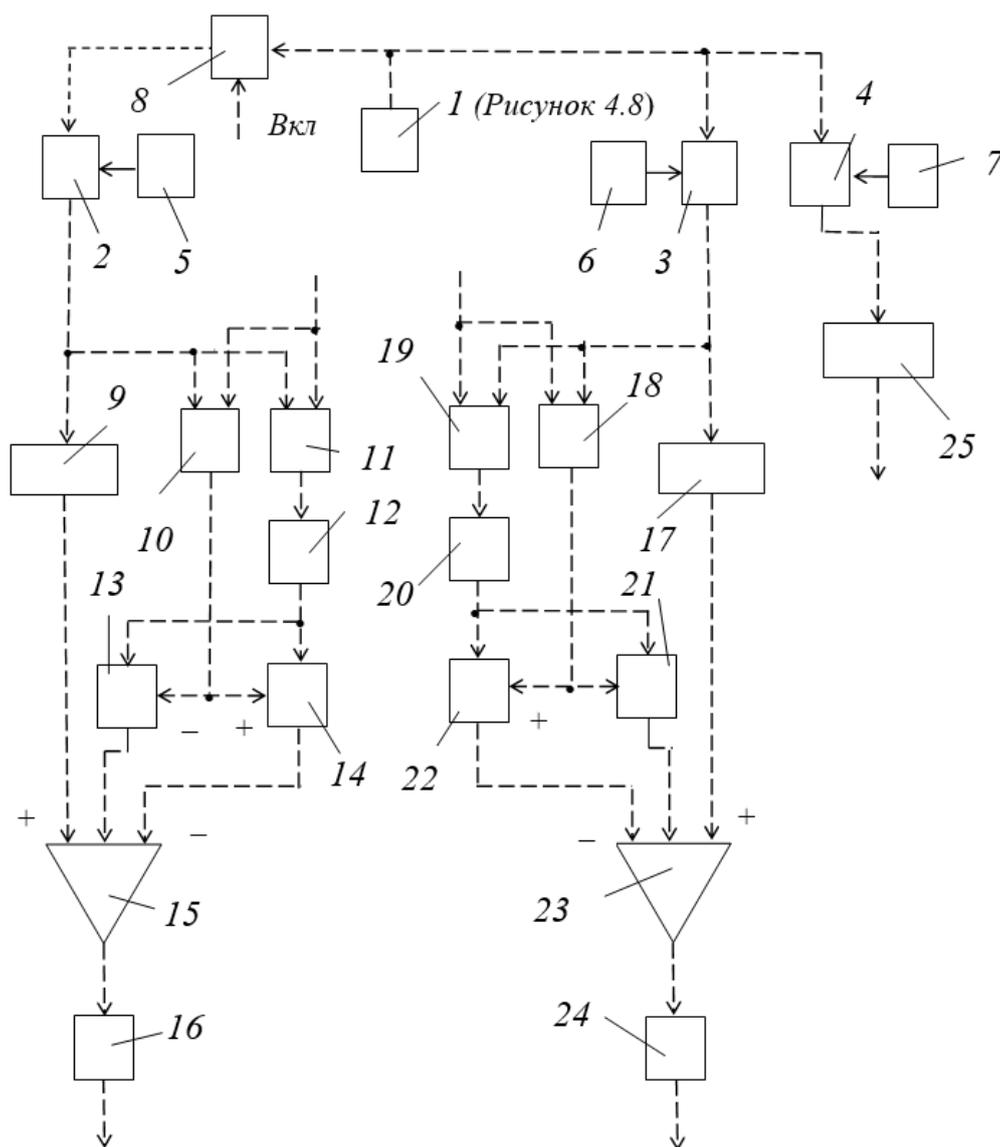
Выход счетчика 3 соединен с входом блока 14 круговой частоты шпинделя заготовки в движении  $B_1$ , выход которого соединен с первым входом сумматора 15. Его выход соединен с входом аналого-импульсного преобразователя 16 и с первым входом сложения параллельного сумматора 17. Выход аналого-импульсного преобразователя 16 соединен с первыми входами знакового 18 и фазового 19 дискриминаторов. Вторые входы дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 7, установленным на шпинделе заготовки (см. рисунок 4.7).

Выход фазового дискриминатора 19 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 20, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 21, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 22, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 21 и 22 соединены с выходом знакового дискриминатора 18. Выходы ключей 21 и 22 соединены соответственно с вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 17. Выход параллельного сумматора 17 через усилитель мощности 23 соединен с управляемым электродвигателем  $M_1$  привода вращения заготовки в движении  $B_1$  (см. рисунок 4.7).

На рисунке 4.9 приведена блок-схема подсистемы синхронизации (электронный вал) приводов исполнительных органов группы  $\Phi_s(П_3П_4B_5)$ , воспроизводящей линию витка.

Счетчики 2, 3, 4 с присоединенными к ним блоками установки коэффициентов деления соответственно 5, 6, 7 образуют делители частоты задающих эталонных импульсных сигналов. Входы счетчиков 3 и 4 соединены с выходом эталонного генератора 1, а вход счетчика 2 соединен с выходом этого генератора через ключ 8 с потенциальным управляющим входом. Выход счетчика 2 соединен с входом блока 9 круговой частоты винта тягового вала  $TB_2$ , преобразуемой этим валом в поперечную подачу  $П_4$  суппорта 6, и первыми входами знакового 10 и фазового 11 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 10, установленном на винте  $TB_2$  (см. рисунок 4.7). Выход фазового дискриминатора 11 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 12, соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа 13, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 14, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 13 и 14 соединены с выходом знакового дискриминатора 10. Выход блока круговой частоты 9

винта  $TB_2$  соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 15, у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналогового ключа 13, управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа 14, управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора 15 через усилитель мощности 16 соединен с управляемым электродвигателем  $M_4$  привода поперечной подачи суппорта 6 (см. рисунок 4.7).



**Рисунок 4.9. – Блок-схема подсистемы синхронизации приводов группы подачи  $\Phi_s(П_3П_4В_5)$**

Выход счетчика 3 соединен с входом блока 17 круговой частоты винта тягового вала  $TB_1$ , преобразуемой этим валом в подачу  $П_3$  продольного суппорта, и первыми входами знакового 18 и фазового 19 дискриминаторов, вторые входы которых соединены с импульсным измерительным преобразователем 9, установленном на винте  $TB_1$  (см. рисунок 4.7).

Выход фазового дискриминатора  $19$  соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя  $20$ , соединенного своим выходом с аналоговыми входами аналогового ключа  $21$ , управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа  $22$ , управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей  $21$  и  $22$  соединены с выходом знакового дискриминатора  $18$ . Выход блока  $17$  круговой частоты винта  $TB_1$  соединен с первым входом сложения параллельного сумматора  $23$ , у которого второй вход сложения и вход вычитания соединены соответственно с выходом аналогового ключа  $21$ , управляемого отрицательным потенциалом, и с выходом аналогового ключа  $22$ , управляемого положительным потенциалом. Выход параллельного сумматора  $23$  через усилитель мощности  $24$  соединен с управляемым электродвигателем  $M_3$  привода подачи продольного суппорта (см. рисунок 4.7).

Выход счетчика  $4$  соединен с входом блока  $25$  круговой частоты шпинделя заготовки в движении  $B_5$ , у которого выход соединен со вторым входом сумматора  $15$  (см. рисунок 4.8).

Блоки  $6$ ,  $14$  (см. рисунок 4.8) и блоки  $9$ ,  $17$ ,  $25$  (см. рисунок 4.9) круговых частот соответственно шпинделя чашечного резца (движение  $B_2$ ), шпинделя заготовки (движение  $B_1$ ), винта тягового вала  $TB_2$ , винта тягового вала  $TB_1$ , шпинделя заготовки (движение  $B_5$ ) выполнены по схеме частота – напряжение. В этих блоках эталонные импульсные сигналы преобразуются в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала.

Нормативными параметрами при обработке являются скорость резания (скорость воспроизведения профиля), задаваемая по круговой частоте заготовки (движение  $B_1$ ), и продольная подача (скорость воспроизведения винтовой линии) чашечного резца (движение  $П_3$ ). При наладке станка блоком  $5$  установки коэффициента деления (см. рисунок 4.8) задается частота импульсного сигнала на выходе счетчика  $3$ , соответствующая управляющему сигналу на электродвигателе  $M_1$ , при котором шпиндель  $1$  заготовки в движении  $B_1$  вращается со скоростью, соответствующей заданной скорости резания. Аналогично блоком  $6$  установки коэффициента деления (см. рисунок 4.9) задается частота импульсного сигнала на выходе счетчика  $3$ , соответствующая управляющему сигналу на электродвигателе  $M_3$ , при котором продольный суппорт  $5$  в движении  $П_3$  движется со скоростью, соответствующей заданной подаче.

Остальные делители частоты рассматриваемой системы синхронизации являются органами настройки на траекторию исполнительных движений. Коэффициенты деления для них выводятся на основе расчетных перемещений для исполнительных органов станочного зацепления сложных кинематических групп.

РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ :

*1 об. шпинделя заготовки ( $B_1$ )  $\rightarrow$   $\kappa/z$  об. чашечного резца ( $B_2$ ),*

где  $\kappa$  – число заходов обрабатываемого червяка;

$z$  – число зубьев чашечного резца.

УКЦ кинематической связи станочного зацепления:

$$\kappa/z = I c_1 n_1 / n_2,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений механических передач кинематической связи;

$n_1$  – круговая частота электродвигателя  $M_1$ , соответствующая заданной скорости резания,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$n_2$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката,  $\text{мин}^{-1}$ .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках, тогда

$$\kappa/z = I c_1 i_1 / i_2.$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на блоке 4 делителя частоты 2:

$$i_2 = (c_1 z/\kappa) i_1,$$

где  $i_1$  – коэффициент деления, установленной на блоке 5 счетчика 3, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_1$ ;

$i_2$  – коэффициент деления, который необходимо установить на блоке 4 счетчика 2 для обеспечения функциональной связи шпинделя заготовки ( $B_1$ ) и шпинделя чашечного резца ( $B_2$ ).

Трехэлементарная группа подачи  $\Phi_s(\Pi_3\Pi_4B_5)$  воспроизводит два станочных зацепления. Первое зацепление обеспечивает перемещение чашечного резца по конической начальной поверхности обрабатываемого червяка. РП для данного зацепления:

*$S_{np}$  перемещение чашечного резца в движении ( $\Pi_3$ )  $\rightarrow$   $S_{non}$  перемещение чашечного резца в движении ( $\Pi_4$ ),*

где  $S_{np}$  – нормируемая продольная подача инструмента;

$S_{non}$  – поперечная подача инструмента,  $S_{non} = S_{np} \text{tg}\varepsilon$ ;

$\varepsilon$  – угол наклона конической начальной поверхности обрабатываемого долбяка.

УКЦ кинематической связи станочного зацепления:

$$S_{non} = S_{np} \operatorname{tg} \varepsilon \quad c \quad 1/P_{TB1} \quad P_{TB2} = c_2 S_{np} \operatorname{tg} \varepsilon,$$

где  $c_2 = c P_{TB2} / P_{TB1} = \text{константа}$ ;

$c$  – произведение передаточных отношений постоянных механических передач кинематической цепи;

$P_{TB1}$  и  $P_{TB2}$  – шаги винтов  $TB_1$  и  $TB_2$  соответственно.

Угол  $\varepsilon$  наклона образующей начальной поверхности червяка определяется по формуле [10]:

$$\varepsilon = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\Delta/2 \operatorname{tg} \alpha_0),$$

где  $\Delta = \alpha l_m / l_p$  – коэффициент приращения шага;

$\alpha$  – коэффициент допустимого износа;

$l_p$  – дополнительная длина червяка;

$\alpha_0$  – угол зацепления.

Заменим в УКЦ отношения подач отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках, тогда

$$i_4 = i_3 c_2 \operatorname{tg} \varepsilon,$$

где  $i_3$  – коэффициент деления, установленный на блоке 6 счетчика 3, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_3$ ;

$i_4$  – коэффициент деления, устанавливаемый на блоке 5 счетчика 2, соответствующий поперечной подаче чашечного резца в движении  $П_4$  для обеспечения функциональной связи продольного суппорта и поперечного суппортов.

Второе станочное зацепление группы подачи обеспечивает воспроизведение винтовой линии витка по конической начальной поверхности. РП для этого зацепления:

$$T \text{ мм перемещения продольного суппорта в движении } П_3 \rightarrow \\ \rightarrow 1 \text{ об. шпинделя заготовки в движении } В_5,$$

где  $T$  – шаг винтовой линии обрабатываемого червяка.

УКЦ кинематической связи станочного зацепления:

$$1 = c (T / P_{TB1}) \quad (n_3 / n_5) = c_3 T (n_3 / n_5),$$

где  $c_3 = c / P_{TB1}$  – константа;

$c$  – произведение передаточных отношений постоянных механических передач кинематической связи;

$n_3$  – дополнительная круговая частота электродвигателя  $M_1$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

Заменим в УКЦ кинематической связи отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках:

$$I = c_3 T (i_3 / i_5).$$

По полученному выражению определяется коэффициент деления, устанавливаемый на блоке 7 счетчика 4:

$$i_5 = c_3 i_3 T,$$

где  $i_3$  – коэффициент деления, установленный на блоке 5 счетчика 2, соответствующий заданной подаче продольного суппорта;

$i_5$  – коэффициент деления, который необходимо установить на блоке 7 счетчика 4 для обеспечения функциональной связи продольного суппорта и шпинделя заготовки.

Станок работает следующим образом. При включении эталонного генератора 1 задающий высокочастотный импульсный сигнал с его выхода поступает на счетчики системы синхронизации, в которых происходит деление задающего сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках задания этих коэффициентов.

Импульсный сигнал с выхода счетчика 3 поступает на вход блока 14 (см. рисунок 4.8) круговой частоты шпинделя 1 заготовки, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 14 через первый вход сложения – выход сумматора 15, первый вход сложения – выход параллельного сумматора 17 и усилитель мощности 23 поступает на управляемый электродвигатель  $M_1$ , который сообщает вращательное движение  $B_1$  шпинделю заготовки обрабатываемого червяка. Синхронно импульсный сигнал с выхода счетчика 2 поступает на вход блока 6 круговой частоты шпинделя чашечного резца, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 6 через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 12 и усилитель мощности 13 поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который сообщает вращательное движение  $B_2$  шпинделю чашечного резца с круговой частотой, пропорциональной частоте эталонного сигнала на выходе счетчика 2.

Одновременно с выхода счетчика 3 (см. рисунок 4.9) импульсный сигнал поступает на вход блока 17 продольной подачи суппорта, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 17 поступает через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 23 и усилитель мощности 24 на управляемый электродвигатель  $M_3$ , который посредством  $TB_1$  сообщает движение  $P_3$  продольному суппорту. Синхронно с выхода счетчика 2 импульсный сигнал

поступает на блок 9 подачи поперечного суппорта, где этот сигнал преобразуется в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Сигнал с выхода блока 9 через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 15 и усилитель мощности 16 поступает на управляемый электродвигатель  $M_4$ , который посредством  $TB_2$  сообщает движений  $П_4$  поперечному суппорту. Синхронно с выхода счетчика 4 задающий сигнал, соответствующий круговой частоте шпинделя заготовки в движении  $B_5$ , поступает на блок 25, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С этого блока выходной сигнал поступает на второй вход сложения сумматора 15 (см. рисунок 4.8). В этом сумматоре происходит сложение двух задающих сигналов, соответствующих круговым частотам шпинделя заготовки в движениях  $B_1$  и  $B_5$ . В результате на первом входе параллельного сумматора 17 действует суммарный сигнал  $B_1 + B_5$ , управляющий электродвигателем  $M_1$  шпинделя заготовки.

В итоге такого прохождения задающих сигналов от общего задатчика – эталонного генератора – к исполнительным органам станка осуществляется обработка двухшагового червяка.

Одновременно обеспечивается устранение девиации механики исполнительных органов посредством двухсторонней коррекции сигналов управления электродвигателями, действующих на выходах параллельных сумматоров.

На первых входах фазового 8 и знакового 7 дискриминаторов (см. рисунок 4.8) постоянно действует импульсный сигнал с выхода счетчика 2. На вторые входы этих дискриминаторов поступает вырабатываемый импульсным измерительным преобразователем 8 (см. рисунок 4.7) импульсный сигнал, соответствующий мгновенному значению действительной круговой частоты шпинделя чашечного резца. В обоих дискриминаторах непрерывно происходит сравнение задающего сигнала с сигналом о действительном мгновенном положении шпинделя чашечного резца. В результате на выходе фазового дискриминатора 8 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности. Этот сигнал после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 9 поступает на аналоговые входы аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, и аналогового ключа 11, управляемого положительным потенциалом. На выходе знакового дискриминатора 7 образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот сигнал поступает на управляющие входы аналоговых ключей 10 и 11 и открывает один из них.

При открывании аналогового ключа 10, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 12, а при открывании аналогового ключа 11, управляе-

мого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора  $I2$ . В сумматоре в зависимости от знака погрешности происходит увеличение или уменьшение сигнала, действующего на его первом входе сложения, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно заданного номинального значения. Аналогично осуществляется коррекция управляющего сигнала и на других параллельных сумматорах. Такой вид коррекции принято называть адаптивным предельным регулированием.

Для обработки традиционного одношагового червяка в системе синхронизации (см. рисунок 4.9) отключается от эталонного генератора  $I$  посредством ключа  $\delta$  счетчик  $2$ . При этом группа скорости резания не изменяется, а трехэлементарная группа подачи трансформируется в двухэлементарную  $\Phi_s(I_3B_5)$ .

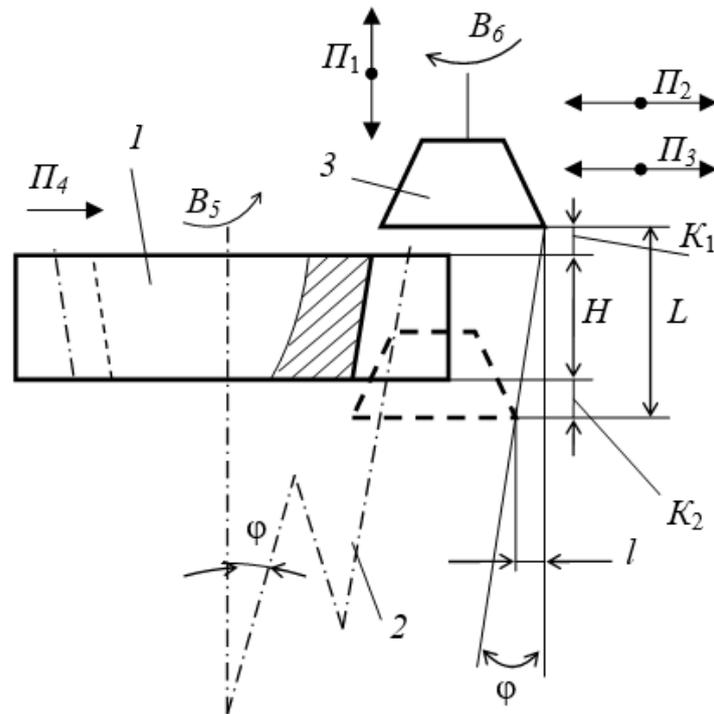
## ГЛАВА 5. ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИЕ СТАНКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С НАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ

### 5.1 Способы обработки цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями

Конструктивная особенность цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК) с наклонными по делительной окружности зубьями – использование делительного конуса вместо делительного цилиндра, характерного для традиционных зубчатых колес. При использовании делительного конуса толщина зуба вдоль его линии равномерно уменьшается от большего основания делительного конуса к его меньшему основанию. Эта конструктивная особенность позволяет регулировать боковой зазор в зубчатых передачах посредством осевого смещения колес. В итоге обеспечиваются в пределах срока службы передачи минимальные величины бокового зазора и циклической ошибки. Такие ЦЗК как с прямыми, так и с винтовыми зубьями используются в передачах, от которых требуется высокая кинематическая точность и минимальные боковые зазоры.

Колеса с наклонными зубьями обрабатывают, как правило, зуборезными долбяками и червячными фрезами соответственно на зубодолбежных и зубофрезерных станках, модернизированных на основе их компоновки для нарезания рассматриваемого вида ЦЗК. Модернизация базовых моделей этих станков на этапе конструирования заключается посредством установки направляющих инструментального суппорта под углом к оси делительного стола, или посредством установки продольного стола, несущего делительный стол, под углом к траектории движения суппорта. Варианты модернизации на основе изменения компоновки снижают коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубообрабатывающих станков, так как их наладка на обработку традиционных ЦЗК или переналадка на иной угол наклона зубьев проблематична. Поэтому представляется целесообразным использование кинематического принципа воспроизведения траектории движения инструмента по делительному конусу при обработке ЦЗК с наклонными зубьями.

На рисунке 5.1 приведена схема способа зубодолбления зуборезным долбяком ЦЗК с наклонными зубьями [17]. Характеристический образ зуборезного долбяка  $\{M_{\Delta}\}_K$ , класс образования зубчатой поверхности след – обкат ( $H^C - H^K$ ).



**Рисунок 5.1. – Схема способа зубодолбления  
зубчатых колес с наклонными зубьями**

Для обработки заготовку  $1$  устанавливают в исходное положение относительно долбяка  $3$ . Причем начальное и конечное положение долбяка в движении  $\Pi_1$  устанавливают с учетом параметра путь  $L$ , который складывается из высоты  $H$  зубчатого венца заготовки, верхнего  $K_1$  и нижнего  $K_2$  перебегов долбяка. Для воспроизведения линии зуба на делительном конусе  $2$  долбяку  $3$  необходимо сообщать два движения: традиционное для зубодолбления с линией зуба на цилиндре поступательно-возвратное движение  $\Pi_1$  скорости резания и дополнительное радиальное равномерное движение  $\Pi_2$ , синхронное с движением  $\Pi_1$ . Причем путь дополнительного движения  $\uparrow \Pi_2$  рассчитывается по формуле

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $l$  – путь дополнительного движения  $\Pi_2$ , мм;

$L$  – путь поступательно-возвратного движения  $\Pi_1$ , мм;

$\varphi$  – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

Отдельно следует обсудить представление в символах поступательно-возвратного и его аналога – вращательно-возвратного движений. В технической литературе, посвященной формообразованию, эти движения относят к элементарным, показывая их на схемах двухсторонней стрелкой. Однако в математических моделях символы этих движений не отличаются от символов поступательного и вращательного движений. В системологии такая неопределенность недопустима.

При обкатном зубодолблении поступательно-возвратное движение  $П_1$  последовательно выполняет две функции: формообразование образующей зубчатого колеса (поступательная составляющая движения  $П_1$ ) и перенос траектории формообразования (возвратная составляющая этого движения) в новое (исходное) положение для повторения движения формообразования. Следовательно, можно утверждать, что поступательно-возвратное движение  $П_1$  есть непрерывная последовательность чередующихся формообразующего и делительного движений. Аналогично можно показать, что вспомогательное поступательно-возвратное движение  $П_5$  есть непрерывная последовательность чередующихся движений позиционирования и деления, синхронизированная с соответствующими составляющими движения  $П_1$ .

Таким образом, анализируемые движения можно представить в виде математических моделей:

$$[\Phi_v(\uparrow П_1) | Д(\downarrow П_1)] \text{ и } [Пз(\uparrow П_5) | Д(\downarrow П_5)].$$

Однако такая форма представления движений достаточно громоздка. Ее можно упростить, не ухудшая информативности, на основе следующего рассуждения. Как известно, рассматриваемые движения в технологических машинах воспроизводятся одним механизмом, например, кулисным, кривошипно-ползунным, кулачковым. Значит, для выполнения делительной составляющей этих специфических движений не требуется отдельный механизм. Это обстоятельство позволяет представить анализируемые движения более короткими математическими моделями:

$$\Phi_v(\updownarrow П_1) \text{ и } Пз(\updownarrow П_5).$$

В такой записи делительная составляющая поступательно-возвратного движения не показывается, а признаком ее наличия является двухсторонняя стрелка « $\updownarrow$ ».

В ряде способов обработки обе составляющие поступательно-возвратного движения выполняют функцию формообразующего движения, например, при обработке поверхностей с синусоидальным профилем [15].

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе обработки ЦЗК с наклонными зубьями линия зуба должна воспроизводиться сложным двухэлементарным движением  $\Phi_v(\updownarrow(П_1П_2))$  скорости резания. При этом движения обката  $\Phi_s(B_5B_6)$ , врезания  $Вр(П_4)$  и отвода (отскока) долбяка  $Пз(\updownarrow П_3)$  при его холостом ходе остаются такими же, как в пионерном способе зубодолбления.

Элементарные движения  $\updownarrow П_1$  скорости резания,  $B_6$  круговой подачи и  $П_4$  подачи врезания являются нормируемыми характеристиками процесса

зубодолбления. Функциональную связь дополнительного радиального равномерного движения  $\uparrow P_2$  с нормируемым движением  $\uparrow P_1$  устанавливают на основе общеизвестного правила составления расчетных перемещений исполнительных органов расчетных кинематических цепей:

*L мм перемещения долбяка в движении  $P_1 \rightarrow l$  мм перемещения долбяка в движении  $P_2$ .*

При обработке долбяку 3 сообщают движение скорости резания  $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$  и движение отвода (отскока)  $P_3 \uparrow (P_3)$ , а заготовке 1 – движение врезания  $Vp(P_4)$  на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем заготовке и долбяку сообщают движение обката  $\Phi_s(B_5 B_6)$ . В результате сообщения долбяку и заготовке указанных движений долбяк воспроизводит линию зуба (образующую) по делительному конусу 2, которая переносится по профилю зуба (направляющей). В итоге на заготовке образуется зубчатый венец с наклонными зубьями.

В данном способе зуборезный долбяк в радиальном направлении по циклу обработки совершает элементарное движение  $\uparrow P_2$ , входящее в сложное формообразующее движение  $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$ , и элементарное вспомогательное движение  $\uparrow P_3$ . Элементарные движения  $\uparrow P_2$  и  $\uparrow P_3$  выполняют синхронно с движением  $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$  и, следовательно, синхронно между собой. Названные элементарные движения различаются только параметром траектории. Следовательно, используя особенности тягового вала кинематической группы зубодолбежного станка, воспроизводящей движение  $P_3 \uparrow (P_3)$ , можно использовать кулачок тягового вала этой группы одновременно как физический программонаситель траектории движения  $\uparrow P_2$  и не вводить дополнительную структурную составляющую в кинематическую подсистему первообразного способа зубодолбления и, следовательно, при разработке кинематической схемы соответствующего станка не преобразовывать группу скорости резания  $\Phi_v(\uparrow P_1)$  базовой модели станка в сложную группу  $\Phi_v \uparrow (P_1 P_2)$ , характерную для рассматриваемого способа.

Таким образом, при совмещении формообразующего движения  $\uparrow P_2$  и движения позиционирования  $\uparrow P_3$  в рассматриваемом способе обеспечивается повышение коэффициентов мобильности и универсальности при сохранении коэффициента сложности пионерного способа зубодолбления.

На рисунке 5.2 приведена схема способа зубофрезерования червячной фрезой колес с наклонными зубьями [18]. Характеристический образ червячной фрезы  $\{M_3\}_K$ , класс образования зубчатой поверхности обкат – касание ( $H^K - P$ ).

По этому способу заготовку 1 устанавливают в исходное положение относительно червячной фрезы 2. Причем начальное и конечное положения

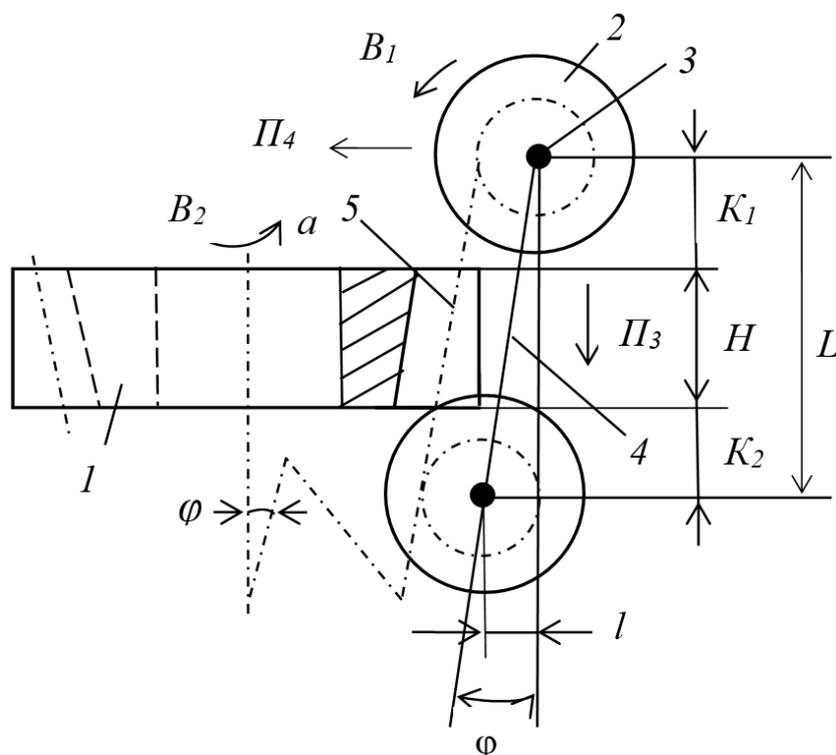
фрезы в движении  $\Pi_3$  устанавливаются с учетом величины пути  $L$ , который складывается из высоты  $H$  зубчатого венца заготовки, верхнего  $K_1$  и нижнего  $K_2$  перебегов фрезы. Для воспроизведения линии зуба, являющейся направляющей при нарезании червячной фрезой, на делительном конусе 5 фрезе 2 необходимо сообщать два движения: традиционное для зубофрезерования цилиндрических колес с линией зуба на цилиндре движение  $\Pi_3$  продольной подачи и дополнительное радиальное движение  $\Pi_4$ , согласованное с движением  $\Pi_3$ . Причем путь дополнительного движения  $\Pi_4$  определяется по формуле

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $l$  – путь дополнительного движения  $\Pi_4$ , мм;

$L$  – путь движения  $\Pi_3$ , мм;

$\varphi$  – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.



**Рисунок 5.2. – Способ фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями**

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе зубофрезерования линия зуба должна воспроизводиться сложным двухэлементарным движением  $\Phi_s(\Pi_3\Pi_4)$  подачи. При этом движение обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , имитирующее зацепление червячной передачи, остается таким же, как в пионерном способе зубофрезерования червячными фрезами.

Движение  $V_1$  скорости резания и движение  $P_3$  продольной подачи являются нормируемыми характеристиками процесса зубофрезерования. Согласование движений  $V_2$  и  $P_4$  с движениями  $V_1$  и  $P_3$  соответственно осуществляется на основе следующих РП:

*1 оборот фрезы в движении  $V_1 \rightarrow k/z$  оборота заготовки в движении  $V_2$ ;  
 $L$  мм перемещения фрезы в движении  $P_3 \rightarrow l$  мм перемещения фрезы  
 в движении  $P_4$ ,*

где  $k$  – число заходов фрезы;  
 $z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

При сообщении фрезе и заготовке сложных формообразующих движений  $\Phi_v(V_1V_2)$  и  $\Phi_s(P_3P_4)$  осуществляется нарезание цилиндрического колеса с наклонными зубьями. При этом движение  $\Phi_v(V_1V_2)$  воспроизводит на заготовке профиль зубьев (образующую), а движение  $\Phi_s(P_3P_4)$  перемещает ось 3 фрезы по результирующей траектории 4, эквидистантной делительному конусу 5 обрабатываемого колеса.

## 5.2 Модернизация базовой кинематической структуры зубодолбежного станка

На рисунке 5.3 представлена кинематико-компоновочная схема зубодолбежного станка [17], реализующая рассмотренный выше способ формообразующей обработки ЦЗК с наклонными зубьями (с линией зубьев на делительном конусе).

В суппорте 3 смонтирована с возможностью поступательно-возвратного движения гильза 4, в которой установлен шпиндель 1, несущий долбяк. Суппорт закреплен на стойке 20 с обеспечением качательного движения относительно оси червяка делительной передачи 10 шпинделя 1.

Качательное движение шпинделя осуществляется кулачковым механизмом, включающим кулачок 14, толкатель 13, соединенный шарниром 12 с суппортом 3, и пружину, обеспечивающую силовое замыкание.

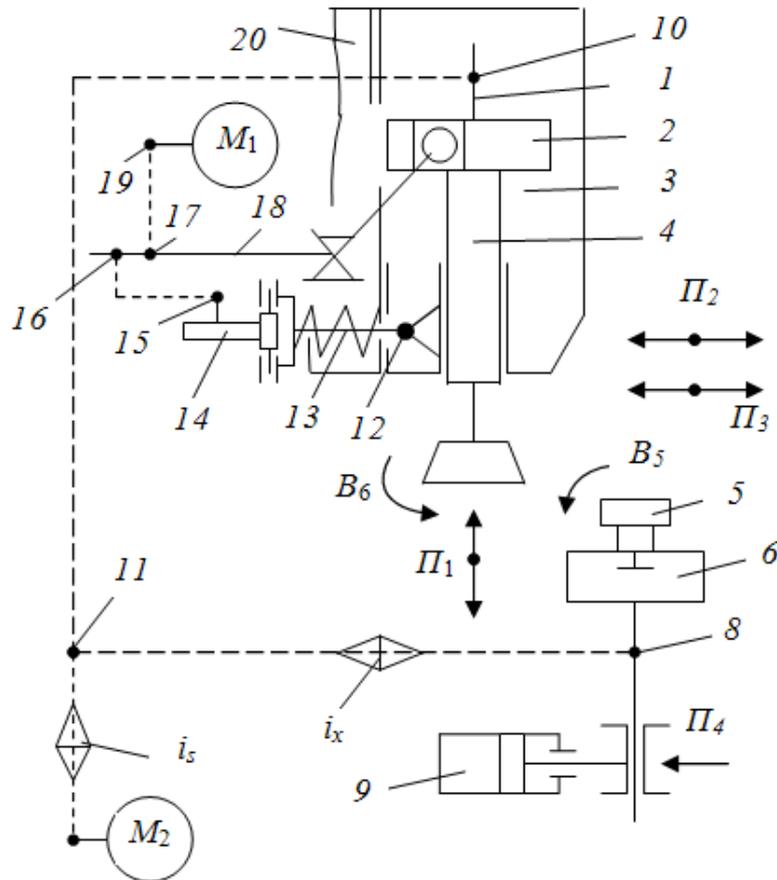
Кинематическая структура станка включает сложные формообразующие группы  $\Phi_v\uparrow(P_1P_2)$ ,  $\Phi_s(V_6V_5)$  и простую группу врезания  $Vp(P_4)$ .

Группа  $\Phi_v\uparrow(P_1P_2)$  воспроизводит образующую зубчатого колеса – линию зуба по длине. Ее внутренняя связь:

$P_1 \leftarrow$  гильза 4  $\leftarrow$  кулисный механизм 2  $\leftarrow$  приводной вал 18  $\rightarrow$  17  $\rightarrow$  16  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  15  $\rightarrow$  кулачок 14  $\rightarrow$  толкатель 13  $\rightarrow$  шарнир 12  $\rightarrow$  суппорт 3  $\rightarrow$   $P_2$ .

Внешняя связь:

$M_1 \rightarrow 19 \rightarrow 17 \rightarrow$  *приводной вал 18 (звено соединения связей)*.



**Рисунок 5.3. – Кинематико-компоновочная схема зубодолбежного станка**

Группа настраивается на траекторию кулачком  $14$  (жесткий программ-моноситель), на скорость воспроизведения линии зуба – изменением круговой частоты электродвигателя  $M_1$ , на путь и исходную точку – изменением плеч рычагов кулисного механизма  $2$ .

Группа  $\Phi_s(B_6B_5)$  воспроизводит направляющую зубчатого колеса – профиль зубьев. Ее внутренняя связь, имитирующая зубчатое зацепление:

$B_6 \leftarrow$  *шпиндель 1 зуборезного долбяка*  $\leftarrow 10 \leftarrow 11 \rightarrow i_x \rightarrow 8 \rightarrow$  *делительный стол 6, несущий заготовку 5 нарезаемого колеса*  $\rightarrow B_5$ .

Внешняя связь:

$M_2 \rightarrow i_s \rightarrow$  *передача 11 (звено соединения связей)*.

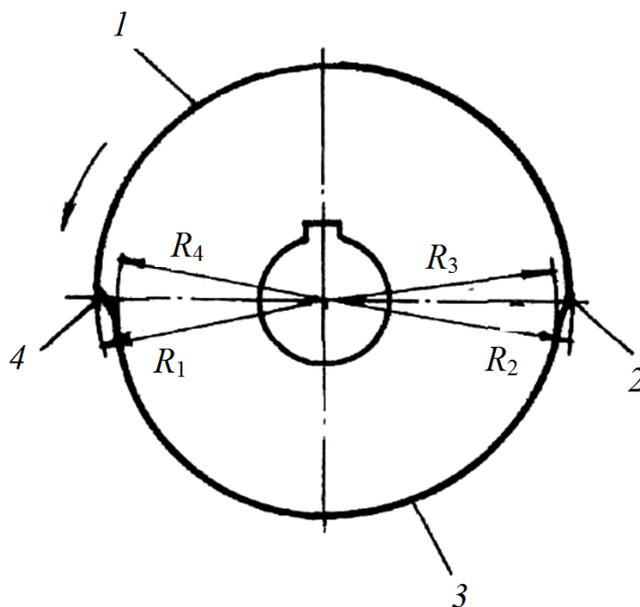
Группа настраивается на траекторию органом настройки  $i_x$  (гитара сменных зубчатых колес), на скорость воспроизведения профиля зубьев – органом настройки  $i_s$ , на направление – совмещением реверсивного механизма с органом настройки  $i_x$ .

Группа  $Vp(\Pi_4)$  обеспечивает врезание долбяка на высоту зуба. Ее внутренняя связь:

*направляющие станины* → *продольный стол, несущий делительный стол б.*

Внешняя связь:

*гидроцилиндр 9* → *продольный стол (звено соединения связей).*



**Рисунок 5.4.** – Орган настройки траектории движения  $\Phi_v \uparrow (\Pi_1 \Pi_2)$

Группа настраивается на скорость регулируемым дросселем гидравлической схемы, на исходную точку и путь – упорами.

В структуре станка нет традиционной для зубодолбежных станков группы  $\Pi_3 \downarrow (\Pi_3)$  отвода долбяка при его возвратном ходе в движении  $\Pi_1$ . Ее функцию (движение  $\Pi_3$ ) выполняет группа  $\Phi_v \uparrow (\Pi_1 \Pi_2)$ .

Кулачок 14 кулачкового механизма имеет форму диска с отверстием для его установки на станке. Рабочий профиль кулачка выполнен в виде двух дуг 1 и 3, разделенных переходными кривыми 2 и 4. Дуги 1 и 3 выполнены по архимедовой спирали. При указанном направлении вращения кулачка дуга 1 соответствует движению резания в поступательно-возвратном движении  $\Pi_1$  долбяка, а дуга 3 – его возвратному движению. При этом конечный радиус  $R_2$  дуги 1 больше ее начального радиуса  $R_1$ , а конечный радиус  $R_4$  дуги 3 меньше ее начального радиуса  $R_3$ . Разности радиусов для обеих дуг одинаковы и равны пути  $l$  дополнительного движения  $\Pi_2$  долбяка. То есть

$$(R_2 - R_1) = (R_3 - R_4) = l.$$

Путь  $l$  дополнительного движения  $\Pi_2$  определяется по выражению, приведенному выше при описании способа зубодолбления.

Таким образом, разности радиусов  $(R_2 - R_1)$  и  $(R_3 - R_4)$  равны пути дополнительного радиального равномерного перемещения долбяка в движении  $П_2$ . Переходные кривые 2 и 4 выполнены в виде дуг окружности, радиус которой соответствует радиусу ролика толкателя кулачкового механизма. Следовательно, при приведенном выполнении кулачка его профиль как жесткий, физический программноноситель несет информацию о двух элементарных движениях  $П_2$  и  $П_3$ , которые в соответствии со способом зубодолбления должны осуществляться синхронно и синфазно с движением  $П_1$ . Причем движение  $П_2$  совместно с движением  $П_1$  образует сложное формообразующее движение  $\Phi_{v\downarrow}(П_1П_2)$ , воспроизводящее линию зуба нарезаемого колеса по делительному конусу.

Орган настройки  $i_x$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_s(B_6B_5)$ . Следовательно, РП моделируют зубчатое зацепление:

$$1 \text{ об. долбяка } (B_1) \rightarrow z_u / z \text{ об. заготовки колеса } (B_2),$$

где  $z_u$  – число зубьев долбяка;  
 $z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Тогда УКЦ:

$$z_u / z = I \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_x = z_u / c_1 \cdot z.$$

Орган настройки  $i_s$ . Расчетная цепь связывает электродвигатель  $M_2$  со шпинделем  $I$  долбяка. Следовательно, РП:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя } M_2 \rightarrow s / \pi t z_u \text{ мм/мин.}$$

Тогда УКЦ:

$$s / \pi t z_u = c_2 \cdot n_M \cdot i_s.$$

Откуда ФН:

$$i_s = s / c_2 \cdot n_M \cdot \pi \cdot t \cdot z_u,$$

где  $s$  – круговая подача долбяка, мм/мин;  
 $t$  – модуль нарезаемых зубьев, мм;  
 $c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

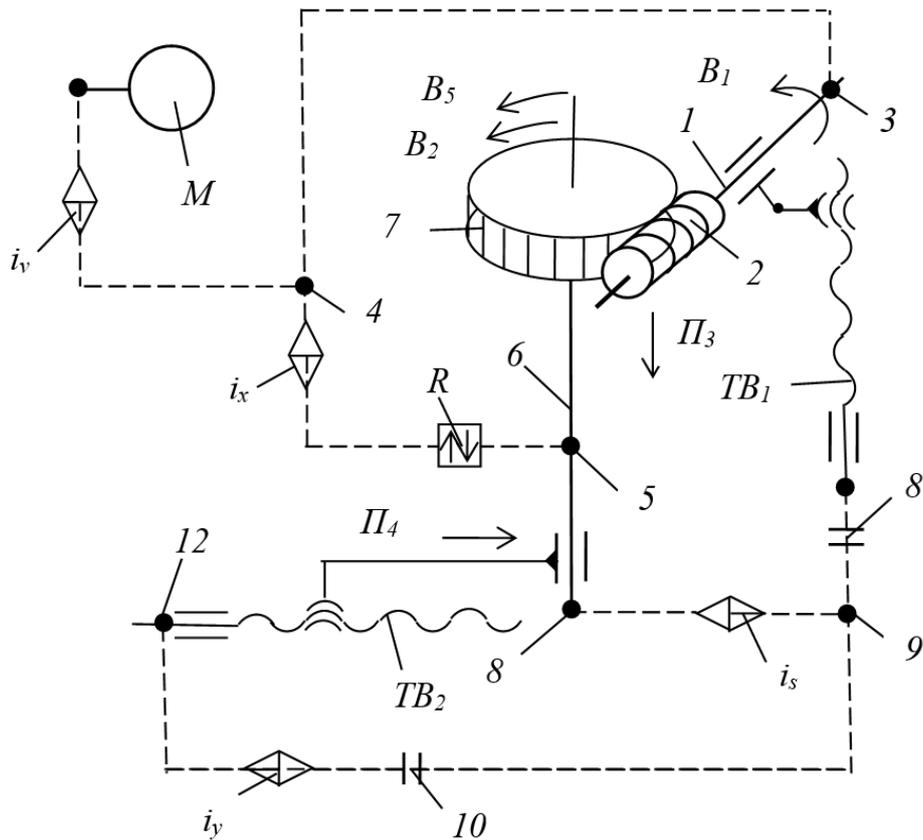
Станок работает следующим образом. Электродвигатель  $M_1$  по внешней связи группы  $\Phi_{v\downarrow}(П_1П_2)$  через звено соединения связей – приводной вал  $18$  – сообщает движение во внутреннюю связь группы. В итоге посредством кулисного механизма 2 долбяк получает поступательно-возвратное движение  $П_1$

и синхронно с ним посредством кулачкового механизма – поступательно-возвратное радиальное движение, представляющее собой геометрическую сумму дополнительного равномерного движения  $П_2$  и поступательно-возвратного движения  $П_3$  отвода – подвода долбяка на участках верхнего и нижнего перебегов. В итоге долбяк совершает поступательно-возвратное движение по траектории в виде прямой, наклоненной к оси заготовки на угол, равный углу наклона зубьев колеса. Затем при включении электродвигателя  $M_2$  по внешней связи группы  $\Phi_s(B_6B_5)$  через звено соединения связей  $II$  долбяку и делительному столу с заготовкой сообщается движение обката со скоростью круговой подачи, состоящее из согласованных вращений  $B_5$  делительного стола и  $B_6$  долбяка. Движение обката обеспечивает воспроизведение профиля зубьев колеса. Одновременно на этапе врезания на высоту зубьев продольному столу, несущему делительный стол, сообщается движение  $П_4$  посредством гидроцилиндра 9. По окончании этапа врезания в течение полного оборота делительного стола выполняется профилирование цилиндрического зубчатого колеса с наклонными зубьями.

При выполнении кулачкового механизма со сменными кулачками на станке можно обрабатывать цилиндрические зубчатые колеса с различными углами наклона зубьев при соответствующем профилировании сменных кулачков. В кулачковом механизме можно использовать также кулачок, у которого дуги 1 и 3 рабочего профиля имеют иную форму. Это позволяет нарезать зубчатые колеса с бочкообразными зубьями. А при использовании кулачка, у которого рабочие профили выполнены в виде дуг окружностей, можно нарезать традиционные зубчатые колеса с линией зуба на делительном цилиндре. В этом случае сложная формообразующая группа  $\Phi_v\uparrow(П_1П_2)$  преобразуется в простую  $\Phi_v\uparrow(П_1)$ . Одновременно образуется группа отвода – подвода долбяка  $П_3\downarrow(П_3)$ , обеспечивающая отвод долбяка при его возвратном ходе в движении  $П_1$ .

### 5.3 Кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

На рисунке 5.5 приведена структурная схема зубофрезерного станка [18] для обработки ЦЗК, реализующая описанный выше (см. рисунок 5.2) способ фрезерования червячной фрезой ЦЗК с наклонными зубьями (с линией зуба на делительном конусе). Кинематическая структура станка с механическими связями включает двухэлементарные группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(П_3П_4)$ , связанные общим электродвигателем.



**Рисунок 5.5. – Структурная схема зубофрезерного станка для обработки цилиндрических колес с наклонными зубьями**

Группа скорости резания  $\Phi_v(B_1B_2)$  воспроизводит образующую (профиль зубьев). Ее внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель } 1 \leftarrow 3 \leftarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow R \rightarrow 5 \rightarrow \text{шпиндель } 6 \text{ делительного стола} \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 4 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается на траекторию и скорость воспроизведения образующей органами настройки  $i_x$  и  $i_v$ , на направление – реверсом  $R$ .

Группа подачи  $\Phi_s(\Pi_3\Pi_4)$  воспроизводит направляющую (делительную линию зуба на конусе). Ее внутренняя связь:

$$\Pi_3 \leftarrow \text{суппорт фрезы } 2 \leftarrow TB_1 \leftarrow \text{муфта } 8 \leftarrow 9 \rightarrow \text{муфта } 10 \rightarrow i_y \rightarrow TB_2 \rightarrow \Pi_4.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow R \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow i_s \rightarrow 9 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается на траекторию и скорость воспроизведения направляющей органами настройки  $i_y$  и  $i_s$  соответственно, на путь и исходное положение – по упорам системы управления.

В станках с механическими связями органы настройки на траекторию обоих формообразующих движений и органы настройки на скорости резания и подачи, как правило, выполняют в виде гитар сменных зубчатых колес.

Вывод ФН для органов настройки  $i_x, i_v, i_y, i_s$ .

Орган настройки  $i_x$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_v(B_1B_2)$ . Следовательно, РП моделируют червячное зацепление:

$$1 \text{ об. фрезы } (B_1) \rightarrow k / z \text{ об. заготовки } (B_2),$$

где  $k$  – число заходов червячной фрезы;

$z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Тогда УКЦ:

$$k / z = 1 \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_x = k / c_1 \cdot z.$$

Орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь связывает электродвигатель  $M$  со шпинделем фрезы  $(B_1)$ . Следовательно, РП:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя } M \rightarrow n_\phi \text{ мин}^{-1} (B_1).$$

Тогда УКЦ:

$$n_\phi = n_M \cdot c_2 \cdot i_v,$$

где  $c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_v = n_\phi / c_2 \cdot n_M.$$

Орган настройки  $i_y$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_s(P_3P_4)$ . Следовательно, РП моделирует перемещение характеристического образа фрезы по линии зуба колеса на делительном конусе:

$$L \text{ мм перемещения суппорта } (P_3) \rightarrow l \text{ мм перемещения суппорта } (P_4).$$

Величина  $l$  перемещения суппорта в движении  $P_4$ , определяется по зависимости, приведенной выше (см. рисунок 5.2) при описании способа зубофрезерования.

Тогда УКЦ:

$$l = L \cdot c_3 \cdot i_y,$$

где  $c_3$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_y = l / c_3 \cdot L.$$

Орган настройки  $i_s$ . Расчетная цепь связывает суппорт фрезы с делительным столом обрабатываемой заготовки. Следовательно, РП имеет вид:

$$l \text{ об. заготовки} \rightarrow s_n \text{ перемещения фрезы (} P_3 \text{)}.$$

Тогда УКЦ:

$$s_n = l \cdot c_4 \cdot i_s \cdot t_{TB},$$

где  $c_4$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$t_{TB}$  – шаг тягового вала  $l_2$ .

Откуда ФН:

$$i_s = s_n / c_4 \cdot t_{TB}.$$

Станок работает следующим образом. По циклу обработки после установки заготовки на делительном столе включается электродвигатель  $M$ . Движение от электродвигателя по внешней связи группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  через звено соединения связей  $4$  сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель фрезы  $2$  получает вращательное движение  $B_1$ , а шпиндель  $6$  делительного стола, несущего заготовку  $7$ , получает вращательное движение  $B_2$ , согласованное с движением  $B_1$ . Согласованные движения  $B_1$  и  $B_2$  воспроизводят профиль зубчатого венца со скоростью, заданной органом настройки  $i_v$ . Затем после включения муфт  $8$  и  $10$  движение от электродвигателя  $M$  по внешней связи группы подачи через звено соединения связей  $9$  сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге суппорт фрезы получает два согласованных между собой движения: продольное  $P_3$  и радиальное  $P_4$  со скоростью, заданной органом настройки  $i_s$ . В результате профиль каждого зуба будет воспроизводиться по линии зуба, представляющей собой результирующую траекторию движений  $P_3$  и  $P_4$ , наклоненной к оси заготовки на заданный при настройке угол, то есть по делительному конусу.

Структурная схема станка может также настраиваться для обработки винтовых (косозубых) цилиндрических колес с наклонными зубьями. Для этого формообразующее движение скорости резания  $\Phi_v(B_1B_2)$  преобразуется к виду  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_5)$ , где  $B_5$  – дополнительный поворот заготовки для получения правой или левой винтовой линии зуба. При этом формообразующее движение подачи  $\Phi_s(P_3P_4)$  остается неизменным, но становится математически связанным с движением  $B_5$  и, следовательно, с формообразующим движением  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_5)$ . В этом случае при алгебраическом сложении движений  $(B_2 \pm B_5)$  на делительном столе изменяются РП для органа настройки  $i_x$ .

При обработке косозубого цилиндрического колеса за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) червячная фреза совершает  $k/z$  оборотов (движение  $B_1$ ) и перемещается на величину  $s$  мм (движение  $П_3$ ) по направляющей цилиндра. Для получения винтовой линии на обрабатываемом цилиндрическом зубчатом колесе при перемещении фрезы на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $s/T$  оборота (движение  $B_5$ ), что соответствует дополнительному повороту фрезы на величину  $\pm(k/z) \cdot (s/T)$ .

Следовательно, РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_5)$ , преобразуются к виду:

*1 оборот шпинделя заготовки ( $B_2 \pm B_5$ )  $\rightarrow k/z(1 \pm s/T)$  оборота червячной фрезы ( $B_1$ ).*

Тогда УКЦ:

$$k/z(1 \pm s/T) = I \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где  $T$  – шаг винтовой линии обрабатываемых зубьев.

Откуда ФН:

$$i_x = c_1 \cdot k/z(1 \pm s/T).$$

На станке можно обрабатывать также традиционные цилиндрические зубчатые колеса с линией зуба на делительном цилиндре. Для этого достаточно посредством муфты 10 отключить тяговый вал  $TB_2$ , обеспечивающий движение  $П_4$  радиальной подачи делительного стола. В итоге сложная группа  $\Phi_s(П_3П_4)$  преобразуется в простую группу продольной подачи  $\Phi_s(П_3^*B_1)$ , осуществляющей перемещение фрезы по траектории, параллельной оси нарезаемого колеса.

При нарезании червячных колес муфтой 8 отключают тяговый вал  $TB_1$ , обеспечивающий движение  $П_3$  продольной подачи. В итоге сложная группа  $\Phi_s(П_3П_4)$  преобразуется в простую группу радиальной подачи  $\Phi_s(П_4)$ , осуществляющей радиальное врезание фрезы на высоту зуба колеса. Сложная группа обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящая профиль зубьев, при этом не изменяется.

По существу, рассмотренная структурная схема зубофрезерного станка – это объединение трех частных структур, каждая из которых реализует вполне определенный способ формообразующей обработки соответственно зубчатого колеса с наклонным зубом (с линией зуба на делительном конусе), традиционного зубчатого колеса с линией зуба на делительном цилиндре и червячного колеса. При этом частная структура станка для нарезания зубчатого колеса с наклонным зубом реализует два способа формообразующей обработки: соответственно нарезание прямозубого цилиндрического колеса с линией зуба на делительном конусе и нарезание винтового (косозубого) цилиндрического колеса также с линией зуба на делительном конусе. Аналогично частная струк-

тура станка для нарезания зубчатого колеса с линией зуба на делительном цилиндре реализует два способа формообразующей обработки: соответственно нарезание традиционных прямозубого и косозубого цилиндрических колес.

#### 5.4 Кинематическая структура зубофрезерного станка с гибридными формообразующими группами для обработки цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями

На рисунке 5.6 приведена механическая составляющая кинематической структуры зубофрезерного станка с электронными связями для обработки косозубых и прямозубых ЦЗК с наклонными зубьями. А на рисунке 5.7 – схема синхронизации приводов исполнительных органов станка. Для обработки косозубых колес кинематическая структура станка содержит две сложные, гибридные, формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$ . Для обработки прямозубых колес трехэлементарная группа подачи преобразуется в двухэлементарную  $\Phi_s(\Pi_3\Pi_4)$ . Обе группы связаны общим задатчиком – эталонным генератором.

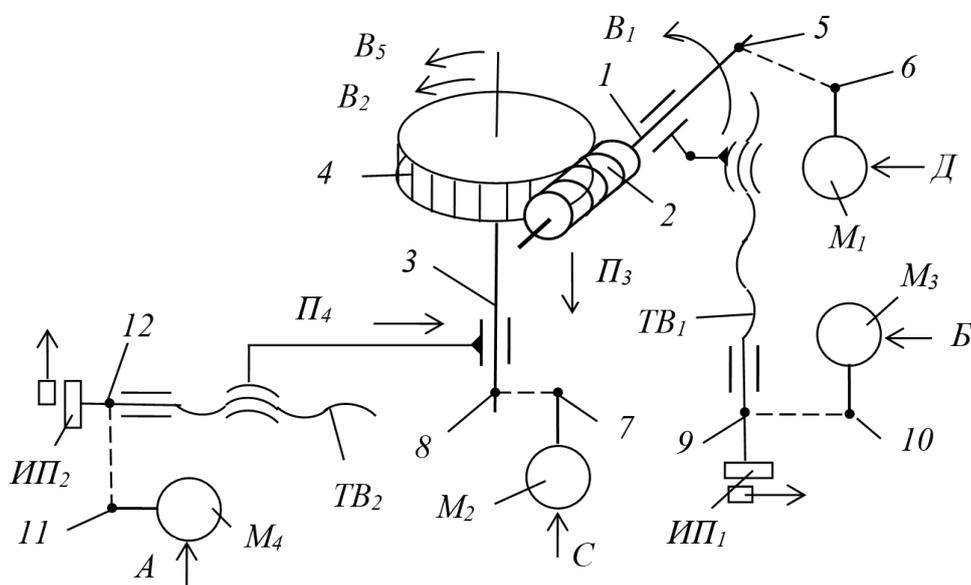
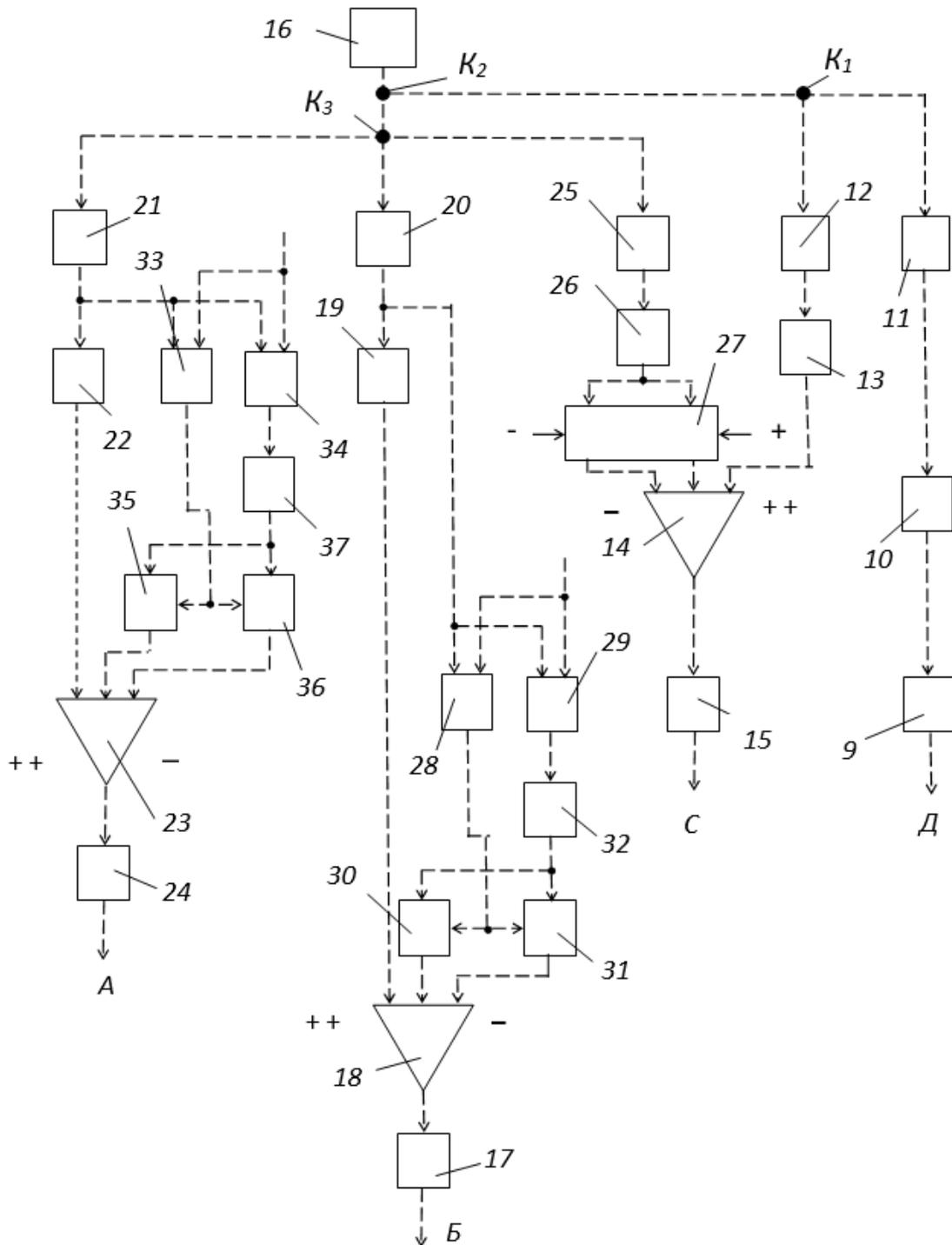


Рисунок 5.6. – Схема приводов зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$  воспроизводит образующую – профиль зубьев. Ее внутренняя связь – гибридная (мехатронная) цепь, соединяющая шпиндель 1 червячной фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4:

$$B_1 \leftarrow 1 \leftarrow 2 \leftarrow 5 \leftarrow 6 \leftarrow M_1 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_2.$$



**Рисунок 5.7. – Система синхронизации исполнительных органов станка по схеме равнозначных координат**

Электронный вал (см. рисунок 5.7):

усилитель мощности 9 ← импульсно-аналоговый преобразователь 10 ←  
 ← делитель частоты 11 ← разъем  $K_1$  → делитель частоты 12 →  
 → импульсно-аналоговый преобразователь 13 → параллельный  
 сумматор 14 → усилитель мощности 15.

Внешняя связь:

*импульсный генератор 16 → разъем  $K_2 \rightarrow K_1$  (звено соединения связей).*

Движение  $\Phi_v(B_1B_2)$  имеет замкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты 11, на скорость воспроизведения профиля зубьев (скорость резания) – делителем частоты 12.

Группа  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$  воспроизводит направляющую – винтовую линию зубьев на делительном конусе. Эта группа во внутренней связи содержит две гибридные цепи. Первая цепь создает потенциальную возможность воспроизведения прямой линии зубьев на делительном конусе, вторая цепь – потенциальную возможность преобразования прямой линии в винтовую.

Первая цепь обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 с продольным столом, несущим делительный стол (шпиндель) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура:

$П_3 \leftarrow ТВ_1 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \leftarrow M_3 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_4 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow ТВ_2 \rightarrow П_4.$

Электронный вал:

*усилитель мощности 17 ← параллельный сумматор 18 ← импульсно-аналоговый преобразователь 19 ← делитель частоты 20 ← разъем  $K_3 \rightarrow \rightarrow$  делитель частоты 21 → импульсно-аналоговый преобразователь 22 → → параллельный сумматор 23 → усилитель мощности 24.*

Вторая цепь обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура:

$П_3 \leftarrow ТВ_1 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \leftarrow M_3 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_5.$

Электронный вал:

*усилитель мощности 17 ← параллельный сумматор 8 ← импульсно-аналоговый преобразователь 19 ← делитель частоты 20 ← разъем  $K_3 \rightarrow \rightarrow$  делитель частоты 25 → импульсно-аналоговый преобразователь 26 → → ключ (логический элемент 2И) 27 → параллельный сумматор 14 → → усилитель мощности 15.*

Внешняя связь:

*импульсный генератор 16 → разъем  $K_3$  (звено соединения связей).*

Движение  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$  имеет незамкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на четыре параметра: на траекторию – делителями частоты 21 и 25, на скорость воспроизведения линии зуба (скорость подачи) – делителем частоты 20, на исходную точку и путь – программно.

Внутренняя связь группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и вторая цепь внутренней связи группы  $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$  имеют общий участок параллельный сумматор 14  $\rightarrow$  усилитель мощности 15. Это обеспечивает физическое сложение движений  $B_2$  и  $B_5$  на шпинделе делительного стола при обработке косозубых колес. При этом параллельный сумматор 14 выполняет такую же функцию, что и механический дифференциал в станках с механическими связями.

В сложных, гибридных формообразующих группах основным источником погрешностей, снижающих качественные показатели обрабатываемой поверхности, является девиация механики исполнительных органов этих групп. В мехатронных формообразующих группах явление девиации можно устранить посредством модификации внутренних связей, обеспечивающей непрерывную, двухстороннюю коррекцию задающих сигналов управления электродвигателями исполнительных органов. В рассматриваемом станке основными источниками девиации являются приводы исполнительных движений  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$ . Для устранения девиации механики этих приводов в обе цепи внутренней связи группы  $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$  приводов подач включены модули адаптивной, двухсторонней коррекции управляющего сигнала.

Модуль коррекции управляющего сигнала движения  $\Pi_3$  содержит знаковый 28 и фазовый 29 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 30, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 31, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 32 с аналоговыми входами ключей 30 и 31. Выход ключа 30 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 18, а выход ключа 31 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 20, а вторые входы – с импульсным измерительным преобразователем  $ИП_1$ , установленным на тяговом валу  $TB_1$  (см. рисунок 5.6).

Аналогично выполнен модуль коррекции управляющего сигнала движения  $\Pi_4$ . Этот модуль содержит знаковый 33 и фазовый 34 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 35, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 36, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 37 с аналоговыми входами ключей 35 и 36. Выход ключа 35 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 23, а выход ключа 36 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 21, а вторые входы – с импульсным измерительным преобразователем  $ИП_2$ , установленным на тяговом валу  $TB_2$  (см. рисунок 5.2).

При настройке станка выводят коэффициенты деления  $k_v, k_x, k_s, k_y, k_z$ , устанавливаемые при наладке на делителях частоты соответственно 11, 12, 20, 27, 25. Для вывода коэффициентов деления можно использовать методику, рассмотренную в работе [14].

Согласно нормативам резания, при зубофрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение  $B_1$ ), а подача – по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение  $П_3$ ). Это является основанием для задания коэффициентов деления  $k_v$  и  $k_s$  на делителях частоты соответственно 11 и 20. Коэффициент деления  $k_v$  задают из условия, при котором на выходе делителя частоты 11 действует задающий сигнал – аналог круговой частоты шпинделя фрезы, соответствующий заданной скорости резания. Аналогично задают коэффициент деления  $k_s$ , при котором на выходе делителя частоты 20 действует сигнал – аналог, соответствующий продольной подаче фрезы.

Внутренняя связь и расчетная цепь группы движения обката  $\Phi_v(B_1B_2)$  совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката, имеет вид:

*1 об. шпинделя 1 фрезы ( $B_1$ )  $\rightarrow$   $\kappa/z$  об. шпинделя 3 заготовки ( $B_2$ ),*

где  $\kappa$  – число заходов червячной фрезы;

$z$  – число нарезаемых зубьев.

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot n_1 / n_2,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной цепи;

$n_1$  – круговая частота электродвигателя  $M_1$ , соответствующая заданной скорости резания,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$n_2$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката,  $\text{мин}^{-1}$ .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot k_v / k_x.$$

Из этого выражения следует:

$$k_x = (c_1 z / \kappa) \cdot k_v,$$

где  $k_v$  – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_1$ ;

$k_x$  – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 12 для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

Первая цепь внутренней связи группы  $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$  и расчетная цепь для определения коэффициента деления  $k_4$  совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в виде:

$L$  мм путь фрезы в движении  $\Pi_3 \rightarrow l$  мм путь фрезы в движении  $\Pi_4$ ,

где  $l$  устанавливается по выражению, полученному при анализе способа зубофрезерования ЦЗК с наклонным зубом (см. рисунок 5.2).

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$l = L \cdot (c_2 = i_0 \cdot t_{TB1} / t_{TB2}) n_3 / n_4,$$

где  $i_0$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$t_{TB1}$  и  $t_{TB2}$  – шаги тяговых валов.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$l = L \cdot (c_2 = i_0 \cdot t_{TB1} / t_{TB2}) k_s / k_y,$$

Из этого выражения, после соответствующих преобразований, следует:

$$k_y = c_2 \cdot k_s / \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $k_s$  – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя  $M_3$ ;

$k_y$  – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты  $2I$  для обеспечения функциональной связи движений  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$ ;

$c_2$  – константа.

Вторая цепь внутренней связи группы  $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$  и расчетная цепь для определения коэффициента деления  $k_z$  совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в виде:

$T$  мм перемещения фрезы ( $\Pi_3$ )  $\rightarrow 1$  об. заготовки ( $B_5$ ).

Тогда УКЦ:

$$I = (T / t_{TB1} \cdot (n_3 / n_5)) \cdot c_2,$$

где  $T$  – шаг винтовой линии обрабатываемых зубьев;

$c_2$  – произведения постоянных передаточных отношений механических передач расчетной цепи;

$n_3$  – круговая частота электродвигателя  $M_3$ , соответствующая заданной подаче;

$n_5$  – круговая частота электродвигателя  $M_2$ , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$I = (T / t_{TB1}) \cdot (k_s / k_z) \cdot c_2.$$

По этому выражению определяется коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 25:

$$k_z = k_s \cdot c_2 \cdot (T / t_{TB1}).$$

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму  $B_2 \pm B_5$  двух движений  $B_2$  и  $B_5$ , образующих совместно соответственно с движениями  $B_1$  и  $П_3$  движение обката  $\Phi_v(B_1B_2)$  и винтовое движение подачи  $\Phi_v(B_5П_3П_4)$ . Суммирование движений  $B_2$  и  $B_4$  осуществляется параллельным сумматором 14. При этом выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий зубьев обрабатываемого колеса и червячной фрезы. Знак «+» соответствует условию, когда винтовые линии одноименны, например, обе левые, знак «-» соответствует условию, когда винтовые линии разноименные, например, одна правая, а другая левая. Необходимый знак устанавливается при наладке станка подачей управляющего сигнала на соответствующий, потенциальный вход ключа 27.

Функционирование сложных гибридных формообразующих групп станка осуществляется следующим образом. Эталонный генератор 16 вырабатывает импульсный, высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на делители частоты 11, 12, 20, 21, 25, в которых происходит деление этого сигнала в соответствии с коэффициентами деления  $k_v, k_x, k_s, k_y, k_z$ .

Сигнал с выхода делителя частоты 11 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 10 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через усилитель мощности 9 поступает на управляемый электродвигатель  $M_1$ , сообщающий шпинделю 1 инструмента движение  $B_1$ , соответствующее скорости резания. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 12 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 13 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 14 и усилитель мощности 15 сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который сообщает движение  $B_2$  шпинделю 3 заготовки 4 обрабатываемого колеса. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение профиля зубчатого колеса формообразующим движением  $\Phi_v(B_1B_2)$ .

Параллельно сигнал с выхода делителя частоты 20 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 19 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 18 и усилитель мощности 17 поступает на управляемый электродвигатель  $M_3$ . Этот электродвигатель посредством  $TB_1$  сообщает суппорту фрезы движение  $П_3$ , соответствующее продольной подаче инструмента. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 22 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 23, и усилитель мощности 24 сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_4$ . Этот электродвигатель посредством  $TB_2$  сообщает продольному столу, несущему делительный стол с заготовкой, движение  $П_4$ , соответствующее подаче.

Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 25 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 26 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя сигнал поступает через ключ 27 (логический элемент 2И) на второй вход сложения или на вход вычитания параллельного сумматора 14. В итоге шпинделю заготовки сообщается дополнительное движение  $B_5$ , математически суммирующееся с движением  $B_2$ . В результате такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение винтовой линии зубьев на делительном конусе зубчатого колеса формообразующим движением  $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ .

В процессе функционирования формообразующих групп осуществляется двухсторонняя коррекция действующих сигналов на выходах параллельных сумматоров 18 и 23. В системах управления станочным оборудованием такую двухстороннюю коррекцию функционирования исполнительных органов принято называть адаптивным управлением.

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 18, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 28 и фазового 29 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 20. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с  $ИП_1$  (см. рисунок 5.6) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $П_3$  суппорта фрезы. В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании суппорта от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 30 и 31.

Синхронно на выходе фазового дискриминатора 29 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в ана-

логовую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 32 поступает на аналоговые входы ключей 30 и 31. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 18 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании суппорта от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 30, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 18, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 31, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 18 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, то есть происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция движения подачи  $П_3$  исполнительного органа – суппорта фрезы относительно номинального значения.

Аналогично осуществляется коррекция задающего сигнала на выходе параллельного сумматора 23. На первых входах знакового 33 и фазового 34 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с  $ИП_2$  (см. рисунок 5.6) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $П_4$  продольного стола, несущего делительный стол (шпиндель 3). В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании продольного стола от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 35 и 36.

Синхронно на выходе фазового дискриминатора 34 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 37 поступает на аналоговые входы ключей 35 и 36. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 23 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании продольного стола от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 35, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 23, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 36, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 23 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, то есть происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция движения подачи  $П_4$  исполнительного органа – продольного стола относительно номинального значения.

Рассмотренная структурная схема обеспечивает также при соответствующей переналадке обработку прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном конусе и на обработку классических косозубых и прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном цилиндре.

При обработке прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном конусе отключается делитель частоты 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$  преобразуется в двухэлементарную группу  $\Phi_s(P_3P_4)$ .

При обработке косозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном цилиндре отключается делитель частоты 21. При этом трехэлементарная формообразующая группа  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$  преобразуется в двухэлементарную группу  $\Phi_s(B_5P_3)$ .

При обработке прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном цилиндре отключаются делители частоты 21 и 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа  $\Phi_s(B_5P_3P_4)$  преобразуется в составную элементарную группу  $\Phi_s(P_3*V_1)$ .

По существу, рассмотренная структурная схема зубофрезерного станка с гибридными формообразующими группами, как и структурная схема станка с механическими связями, рассмотренная выше, – это объединение частных структур, каждая из которых реализует вполне определенный способ формообразующей обработки цилиндрических зубчатых колес.

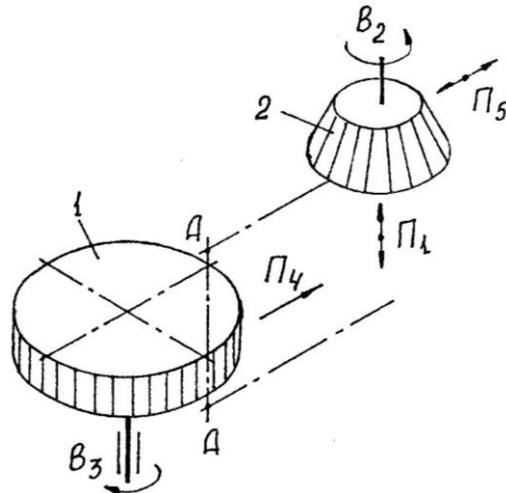
Уместно отметить, что замена сложных формообразующих групп с механическими связями гибридными мехатронными формообразующими группами существенно упрощает механику формообразующих групп зубофрезерного станка, что обеспечивает повышение качества обработки ЦЗК и снижает трудоемкость переналадки станка.

## ГЛАВА 6. ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКОВ

### 6.1 Первообразные способы обкатного зубодолбления

Пионерный способ обкатного зубодолбления с радиальным врезанием [19] и производные от него первообразные способы с касательным врезанием [20] и со спиральным врезанием [21] на первом уровне системного описания различаются только видом врезания. С позиций синергетики [15; 22] эта триада на поле ветвящихся виртуальных путей эволюции открытого множества способов обкатного зубодолбления ЦЗК в точках бифуркации образует аттракторы (коридоры целенаправленного развития) способов обкатного зубодолбления. Следовательно, каждый аттрактор можно рассматривать по общности вида врезания как вполне определенное поле эволюции подмножества способов обкатного зубодолбления ЦЗК.

Пионерный способ обкатного зубодолбления [19] цилиндрических прямозубых колес, по которому при воспроизведении профиля зубчатой поверхности согласованные вращательные движения зуборезного долбяка, выполненного в виде зубчатого колеса, и нарезаемой заготовки имитируют зацепление зубчатой передачи, был разработан в конце XIX в. По этому способу (рисунок 6.1) заготовка 1 относительно долбяка 2 устанавливается в плоскости  $A-A$ , совпадающей с плоскостью осей заготовки и долбяка. Процесс получения зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку и заготовке нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Линия зуба (образующая) зубчатого колеса – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным движением  $\Phi_v \uparrow (P_1)$  долбяка, а профиль зубьев (направляющая) – двухэлементарным движением обката  $\Phi_s(B_2B_3)$ , состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения  $B_2$  долбяка и вращения  $B_3$  заготовки. На начальном этапе одновременно с указанными формообразующими движениями заготовке (или долбяку) сообщается движение радиального врезания  $Vp(P_4)$  на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки долбяку сообщается движение  $Pz \downarrow (P_5)$ , предназначенное для отвода («отскока») долбяка от заготовки при его возвратном ходе в движении  $\Phi_v \uparrow (P_1)$  с целью устранения явления затирания, проявляющегося в виде скольжения зубьев долбяка о зубья профилируемого колеса. Параметр путь движения  $Pz \downarrow (P_5)$ , как правило, составляет 0,5...0,6 мм.



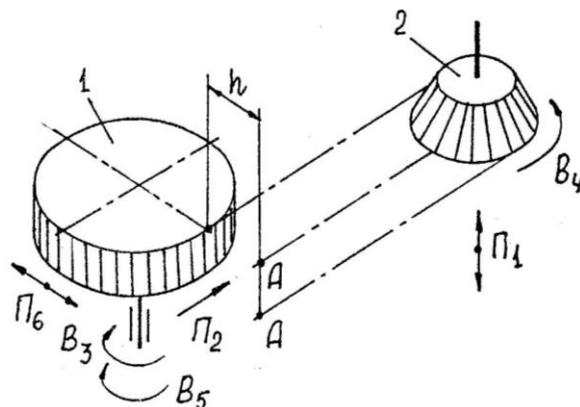
**Рисунок 6.1. – Способ долбления прямозубых цилиндрических колес при радиальном врезании цилиндрических зубчатых колес**

Библиографический анализ показывает, что аттрактор пионерного способа обкатного долбления ЦЗК содержит значительный массив траекторий эволюции подмножества способов обкатного зубодолбления с радиальным врезанием прямозубых и косозубых колес, зубчатых венцов внутреннего зацепления, зубчатых секторов, колес с наклонными по делительной окружности зубьями. Характерной особенностью данного массива являются траектории, которые базируются в основном на изменении последовательности и правил выполнения отдельных приемов.

Пионерный способ обкатного зубодолбления является первообразным для способа зубодолбления при касательном врезании [20]. При касательном врезании (рисунок 6.2) заготовку 1 устанавливают на расстоянии  $h$  от плоскости движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка 2. Затем долбяку 2 сообщают поступательно-возвратное движение  $\Phi_v \downarrow (\Pi_1)$  скорости воспроизведения образующей (линии зуба), и процесс долбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовке 1 сообщают движение врезания  $\Pi_2$ , согласованное с ее вращением  $V_3$ , и одновременно долбяку и заготовке сообщают движение обката (профилирования зубьев), состоящее из согласованных вращений  $V_4$  долбяка и  $V_5$  заготовки. Этот этап продолжают до тех пор, пока ось долбяка не переместится на линию  $A-A$ , соответствующую окончанию врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем движение врезания  $V_p(\Pi_2 V_3)$  прекращают и на втором этапе в течение одного оборота заготовки профилируют нарезаемое колесо движением обката  $\Phi_s(V_4 V_5)$ . На обоих этапах обработки заготовке сообщают движение  $\Pi_3 \downarrow (\Pi_6)$  отвода при холостом ходе долбяка.

Патентный анализ показывает, что аттрактор первообразного способа обкатного долбления ЦЗК при касательном врезании содержит некоторый

массив эволюции подмножества способов зубодолбления цилиндрических колес внешнего зацепления. Наиболее рациональная область использования – долбление одним долбяком параллельно [23] или последовательно [24] двух зубчатых колес. Теоритически возможна обработка зубчатых колес при совмещении зубодолбления с роторным перемещением пар долбяк – заготовка [25]. Характерная особенность данного массива – траектории, основанные в основном на изменении исходного положения заготовки относительно долбяка и изменение правил выполнения отдельных приемов.



**Рисунок 6.2. – Способ долбления цилиндрических колес при касательном врезании**

Современная тенденция в области конструирования зубодолбежных станков ведущих станкостроительных фирм – переход от классического одно-, трехпроходного зубодолбления к многопроходному при шести – десяти проходах с увеличенными круговыми подачами до 3,5...4,5 мм/двойной ход долбяка на предварительных проходах [15]. При большом количестве проходов возрастает машинное время врезания. Устранить этот недостаток классической схемы позволяет способ зубодолбления [21], по которому на предварительных проходах врезание осуществляют непрерывно по спирали (рисунок 6.3). При постоянных значениях подачи радиального врезания и круговой подачи на этапе предварительных проходов при непрерывном врезании долбяка 2 относительно заготовки 1 действительная траектория врезания имеет вид архимедовой спирали 3.

Результирующая (спиральная) подача врезания долбяка равна геометрической сумме составляющих ее подач:

$$S_d = \sqrt{S_K^2 + S_P^2},$$

где  $S_d$  – действительная (спиральная) подача врезания, мм/дв. ход долбяка;  
 $S_K$  – круговая подача, мм/дв. ход долбяка;  
 $S_P$  – радиальная подача врезания, мм/дв. ход долбяка.

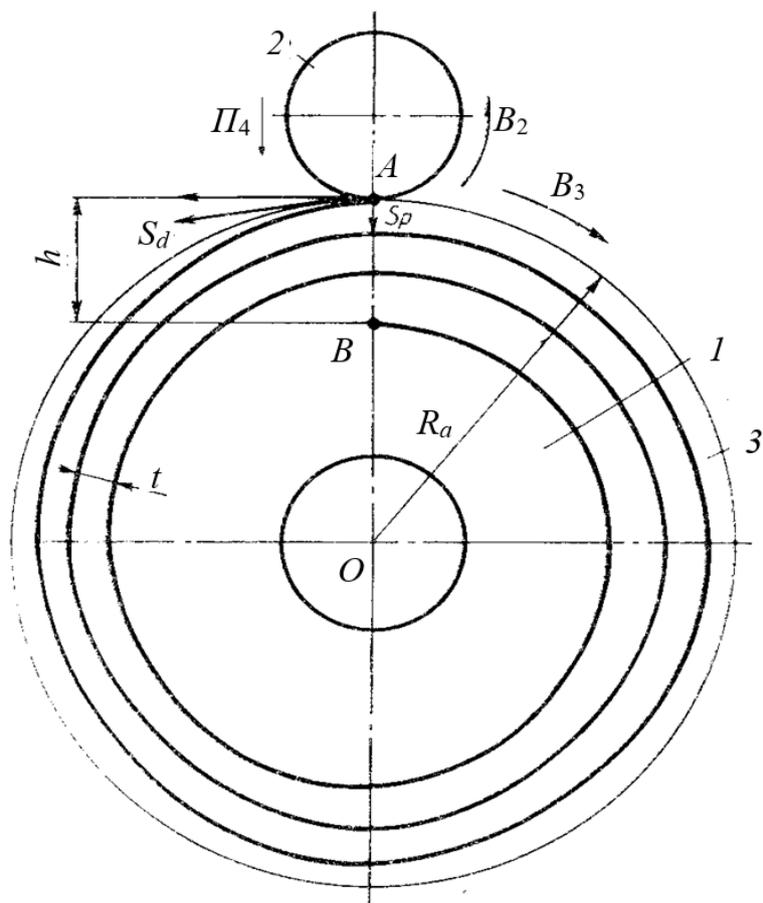


Рисунок 6.3. – Траектория движения долбьяка при врезании по спирали

Круговая подача является нормируемой величиной, устанавливаемой при назначении режимов резания.

Тогда радиальную подачу можно определить как часть круговой подачи, используя принцип пропорциональности перемещений:

$$S_P = S_K \frac{h}{L},$$

где  $h$  – принимаемая величина радиального перемещения долбьяка на этапе черновых проходов, мм;

$L$  – длина архимедовой спирали между точками  $A$  и  $B$ , по которой перемещается долбьяк относительно заготовки, мм.

Известно, что длина архимедовой спирали, начиная от полюса, определяется по формуле:

$$l = \frac{a}{2} \left( \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \operatorname{Arctg} \varphi \right),$$

где  $l$  – длина архимедовой спирали, мм;

$a$  – параметр архимедовой спирали, мм;

$\varphi$  – угол поворота радиус-вектора точки в полярных координатах, рад.

Следовательно, длину архимедовой спирали, по которой перемещается долбяк на этапе врезания, можно определить как разность длин спиралей: полюс  $O$  – точка  $A$  и полюс  $O$  – точка  $B$ .

После элементарных преобразований получим

$$L = \frac{a}{2} \left[ \left( \varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2} \right) + (Arsh \varphi_2 - Arsh \varphi_1) \right],$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы поворота заготовки в движении обката по длине архимедовой спирали на участках соответственно от полюса до точки  $B$  и от полюса до точки  $A$ .

Углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определим из выражений:

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{R_a - h}{a}; \quad \varphi_2 = 2\pi \frac{R_a}{a},$$

где  $R_a$  – радиус заготовки (радиус окружности выступов обрабатываемого колеса), мм.

Параметр  $a$  и шаг  $t$  архимедовой спирали связаны соотношением:

$$t = 2\pi a.$$

Шаг архимедовой спирали при зубодолблении можно выразить через количество проходов  $k$ :

$$t = h / k.$$

Следовательно,

$$a = h / 2\pi k.$$

В выражении для определения  $L$  второе слагаемое, представляющее разность обратных гиперболических синусов в пределах приемлемого числа предварительных проходов, не превышает 0,1 мм. Поэтому этим слагаемым можно пренебречь при практических расчетах. После подстановки значения  $L$  в выражение для  $S_p$  окончательно получим:

$$S_p = \frac{2S_k h}{a (\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2})}.$$

Для данного способа зубодолбления из-за особенностей движения врезания машинное время обработки определяется по следующей, отличной от традиционной, формуле:

$$T_M = \frac{\pi m Z}{n S_{K1}} + \frac{L}{n S_\delta},$$

где  $T_M$  – машинное время обработки, мин;  
 $m$  – модуль, мм;  
 $Z$  – число зубьев нарезаемого колеса;  
 $S_{K1}$  – круговая подача на чистовом проходе, мм/дв. ход долбяка;  
 $n$  – число двойных ходов долбяка в минуту.

Особенность кинематической подсистемы данного способа зубодолбления – сложное двухэлементарное движение врезания  $Vp(B_2\Pi_4)$ , элементарное движение  $B_2$  которого входит также в сложное двухэлементарное движение профилирования (обката)  $\Phi_s(B_2B_3)$ .

Функциональная связь между движениями  $B_2$  и  $B_3$ , образующими сложное движение обката (профилирования), устанавливается по известным правилам для настройки расчетных цепей обката зубодолбежных станков. А функциональную связь между движениями  $B_2$  и  $\Pi_4$ , образующими сложное движение врезания, можно определить на основе следующих РП:

*1 оборот заготовки нарезаемого колеса  $\rightarrow (t = h/k)$  перемещения долбяка.*

Аттрактор способа обкатного зубодолбления со спиральным врезанием содержит минимальный массив подмножеств способов обкатного зубодолбления, отличающихся в основном правилами выполнения приемов. Объясняется это тем, что эти способы осуществимы в мехатронных обрабатывающих системах, то есть на зубодолбежных станках с ЧПУ.

## **6.2 Типовая структурная схема зубодолбежного станка с радиальным врезанием**

На рисунке 6.4 приведена структурная схема зубодолбежного станка с механическими связями, реализующая пионерный способ обкатного зубодолбления. Данная схема положена в основу конструкций современных станков для обработки цилиндрических зубчатых колес зуборезными долбяками. Кинематическая структура станка содержит следующие кинематические группы: скорости резания  $\Phi_v\uparrow(\Pi_1)$ , движения обката  $\Phi_s(B_2B_3)$ , врезания  $Vp(\Pi_4)$  и группу  $\Pi_3\uparrow(\Pi_5)$  радиального отвода – подвода долбяка, функционирующую синхронно с группой скорости резания. Объединение формообразующих групп и группы радиального отвода – подвода долбяка в общую структуру станка выполнено по схеме с общим электродвигателем. Группа  $Vp(\Pi_4)$  оснащена отдельным гидравлическим приводом.

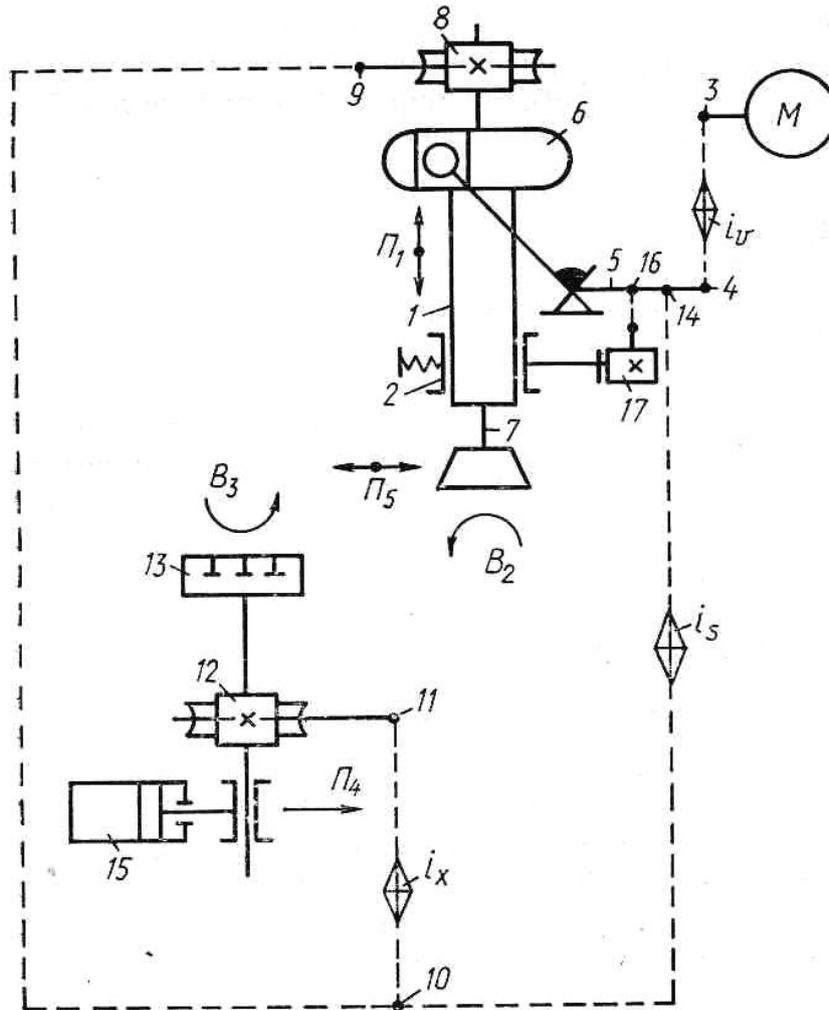


Рисунок 6.4. – Кинематическая структура зубодолбежного станка с радиальным врезанием

Группа скорости резания  $\Phi_v \downarrow (\Pi_1)$ , воспроизводящая образующую (линию зуба), включает внутреннюю связь – элементарную поступательную кинематическую пару

*гильза 1 → корпус 2 суппорта станка.*

Внешняя связь группы:

$M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow \text{гильза 1} (\Pi_1)$ ,

представляющую собой кинематическую цепь, передающую энергию от электродвигателя  $M$  к приводному валу 5, вращательное движение которого преобразуется в поступательно-возвратное движение  $\Pi_1$  гильзы 1 шпинделя 7 долбяка.

Движение  $\Pi_1$  имеет прямолинейную незамкнутую траекторию. Поэтому группа  $\Phi_v \downarrow (\Pi_1)$  настраивается на три параметра: на скорость воспроизведения образующей (скорость резания) – органом настройки  $i_v$ , на путь и исходную точку – изменением плеч рычагов кулисного механизма 6.

Группа обката  $\Phi_s(B_2B_3)$  состоит из развитой внутренней связи (цепи обката), обеспечивающей станочное зацепление, имитирующее зубчатую передачу:

$$B_2 \leftarrow 8 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \rightarrow i_x \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3.$$

Цепь обката связывает шпиндель 7 долбяка с делительным столом 13, предназначенным для установки нарезаемых заготовок.

Внешняя связь группы:

$$M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 14 \rightarrow i_s \rightarrow 10$$

передает энергию движения от электродвигателя через звено соединения связей 10 во внутреннюю связь.

Движение обката имеет замкнутую траекторию и настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_x$ , на скорость (круговую подачу) – органом настройки  $i_s$ , на направление – реверсом, совмещенным с органом настройки  $i_x$ .

Группа врезания  $Vp(P_4)$  включает внутреннюю связь – элементарную поступательную кинематическую пару, образованную корпусом продольного стола и направляющими станка, и внешнюю связь, передающую энергию движения во внутреннюю связь от гидроцилиндра 15, перемещающего стол в направлении радиального врезания  $P_4$ . Эта группа настраивается на скорость врезания регулируемым дросселем гидропривода станка, а на исходную точку и путь – путевыми упорами системы управления.

Корпус суппорта закреплен на стойке станка с обеспечением качательного движения относительно оси червяка делительной передачи шпинделя долбяка. Качательное движение суппорта осуществляется группой радиального отвода – подвода долбяка  $Pz\uparrow(P_5)$ . Ее внутренняя связь – элементарная качательная пара, образованная стойкой станка и суппортом. Внешняя связь – структурная цепь

$$M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 16 \rightarrow 17 (P_5),$$

сообщающая движение кулачку 17, несущему информацию о параметре путь отвода – подвода суппорта к делительному столу.

Группа  $Pz\uparrow(P_5)$  не настраивается и функционирует синхронно с группой, воспроизводящей линию зуба обрабатываемого колеса.

Вывод ФН для органов настройки  $i_x, i_v, i_s$ .

Орган настройки  $i_x$ . Расчетная цепь для этого органа настройки совпадает с формообразующей группой обката. Поэтому РП имеют вид:

$$\frac{1}{z_u} \text{ поворота долбяка} \rightarrow \frac{1}{z} \text{ поворота заготовки.}$$

Тогда УКЦ:

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{z_u} i_{02} i_x,$$

Откуда ФН:

$$i_x = \frac{z_u}{i_{02} z}.$$

где  $z_u$  – число зубьев долбяка;

$z$  – число зубьев нарезаемого колеса;

$i_{02}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь совпадает с внешней связью группы скорости резания. Следовательно, РП имеют вид:

$$n_m \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя} \rightarrow n_d \text{ двойных ходов/мин долбяка.}$$

Тогда УКЦ:

$$n_d = n_m \cdot i_{01} \cdot i_v,$$

Откуда ФН:

$$i_v = n_d / i_{01} n_m.$$

где  $i_{01}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Орган настройки  $i_s$ . При обкатном зубодолблении круговую подачу задают относительно одного двойного хода долбяка в движении  $П_1$ . Следовательно, для органа настройки  $i_s$  РП имеют вид:

$$1 \text{ двойной ход долбяка} \rightarrow \frac{s}{\pi m z_u} \text{ поворота долбяка.}$$

Тогда УКЦ:

$$\frac{s}{\pi m z_u} = i_{03} i_s.$$

Откуда ФН:

$$i_s = \frac{s}{i_{03} \pi m z_u}.$$

где  $s$  – круговая подача, мм/дв. ход;

$m$  – модуль долбяка и обрабатываемого колеса, мм;

$i_{03}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Станок работает следующим образом. Электродвигатель  $M$  по внешней связи группы  $\Phi_v \updownarrow (П_1)$  сообщает движение во внутреннюю связь группы. В результате вращательное движение приводного вала 5 посредством кулисного механизма 6 преобразуется в поступательно-возвратное движение  $П_1$  шпинделя 1 долбяка, воспроизводящее линию зуба нарезаемого колеса. Синхронно посредством внешней связи группы  $Пз \updownarrow (П_5)$  сообщается вращательное движение кулачковому механизму, преобразующему вращательное движение в качательное движение отвода – подвода долбяка в зону резания. Затем по внешней связи группы  $\Phi_s (B_2 B_3)$  через звено соединения связей 10 долбяку и делительному столу с заготовкой сообщается движение обката со скоростью круговой подачи, состоящее из согласованных вращательных движений  $B_2$  долбяка и  $B_3$  заготовки. Движение обката обеспечивает воспроизведение профиля зубьев колеса. Одновременно на этапе врезания на высоту зубьев продольному столу, несущему делительный стол, сообщается движение врезания  $П_4$  посредством гидроцилиндра 15. По окончании этапа врезания в течение полного оборота делительного стола выполняется профилирование цилиндрического прямозубого колеса.

Рассмотренная структурная схема является частной структурой станка для обработки прямозубых цилиндрических колес.

Для обработки косозубых (винтовых) зубчатых колес необходимо модифицировать внутреннюю связь группы  $\Phi_v \updownarrow (П_1)$ . Для этого прямолинейные направляющие шпинделя заменяются на винтовые. В итоге простая группа образования линии зуба трансформируется в сложную двухэлементарную группу. При этом внешняя связь группы не изменяется.

Шаг винтовой линии  $T_k$  направляющих должен соответствовать шагу винтовой линии  $T_u$  долбяка. Стандартом предусмотрено четыре вида косозубых долбяков: два для нарезания зубчатых колес наружного зацепления и два для колес внутреннего зацепления. Углы наклона зубьев –  $15^\circ$  и  $23^\circ$ . Следовательно, для каждого вида косозубых долбяков независимо от модуля  $T_u$  постоянно. Это сокращает номенклатуру винтовых направляющих и одновременно ограничивает универсальность станка при обработке колес с винтовым зубом. Поэтому при необходимости обработки колес с иным углом наклона зубьев следует изготовить соответствующие долбяк и винтовые направляющие, пользуясь соотношением

$$T_k = T_u = \frac{\pi m_n z_d}{\sin \beta},$$

где  $z_d$  – число зубьев долбяка;

$m_n$  – нормальный модуль;

$\beta$  – угол наклона зубьев долбяка и нарезаемого колеса.

При нарезании колес с винтовым зубом внешнего зацепления направления наклона зубьев долбяка и колеса противоположны, а при нарезании колес внутреннего зацепления направления наклона их зубьев совпадают.

Рассмотренная структурная схема реализована в ряде моделей зубодолбежных станков, например, 5111 и 5122. В ряде современных моделей станков формообразующие группы имеют отдельные электродвигатели, например, в станке модели 5A122. В станке модели ВС-122 формообразующая группа обката  $\Phi_s(B_2B_3)$  оснащена отдельным управляемым электродвигателем.

### 6.3 Зубодолбежный станок для многопроходной обработки зубчатых колес с адаптивным управлением

В работе [15] при обсуждении способов зубодолбления с увеличенными круговыми подачами рассмотрен способ многопроходного долбления зубчатых колес, содержащий подсистему стабилизации силового параметра (момента силы резания) на всех проходах кроме первого [26]. Это обеспечивает выравнивание толщин срезаемой стружки по обеим боковым режущим кромкам зубьев долбяка и, как следствие, повышение периода его размерной стойкости.

Рассмотрим реализацию данного способа в кинематической структуре зубодолбежного станка с адаптивным управлением. Кинематическая структура станка при радиальном врезании (рисунок 6.5) содержит следующие кинематические группы: скорости воспроизведения линии зуба (скорости резания)  $\Phi_v(\uparrow\Pi_1)$ ; обката (воспроизведения профиля зубьев)  $\Phi_s(B_2B_3)$ ; врезания  $Vp(\Pi_4)$ ; отвода – подвода долбяка к заготовке  $\Pi_3(\uparrow\Pi_5)$ . Система синхронизации приводов исполнительных органов группы обката (электронный вал) выполнена по схеме задающая – ведомая координаты.

Исполнительным органом группы  $\Phi_v(\uparrow\Pi_1)$  является гильза шпинделя 1, несущего долбяк. Привод движения  $\Pi_1$  осуществляется от электродвигателя 2, круговая частота которого преобразуется в поступательно-возвратное движение кулисным механизмом 3. Исполнительными органами группы обката  $\Phi_s(B_2B_3)$  являются шпиндель 1 и делительный стол 4. Функциональная связь между ними обеспечивается электронным валом (системой отслеживающей синхронизации, выполненной по схеме задающая – ведомая координаты). Задающей координатой является шпиндель. Привод его вращательного движения  $B_2$  осуществляется от электродвигателя 5. Круговая частота этого элек-

родвигателя задает круговую подачу долбяка. Делительный стол служит ведомой координатой. Привод его вращательного движения  $B_3$  осуществляется от электродвигателя 6, являющегося конечным звеном отслеживающей синхронизации. Исполнительным органом группы врезания  $Vp(\Pi_4)$  является продольный стол. Привод его движения  $\Pi_4$  осуществляется от электродвигателя 8 через тяговый вал 7. Группа «отскока»  $\Pi_3 \downarrow (\Pi_5)$  выполняется по традиционной для современных зубодолбежных станков схеме (не показана). В качестве электродвигателей группы обката можно использовать как высокомоментные машины постоянного тока, так и синхронные машины переменного тока, позволяющие осуществлять бесступенчатое регулирование круговой частоты. В качестве источника энергии для электродвигателей используется силовая часть устройства управления 9.

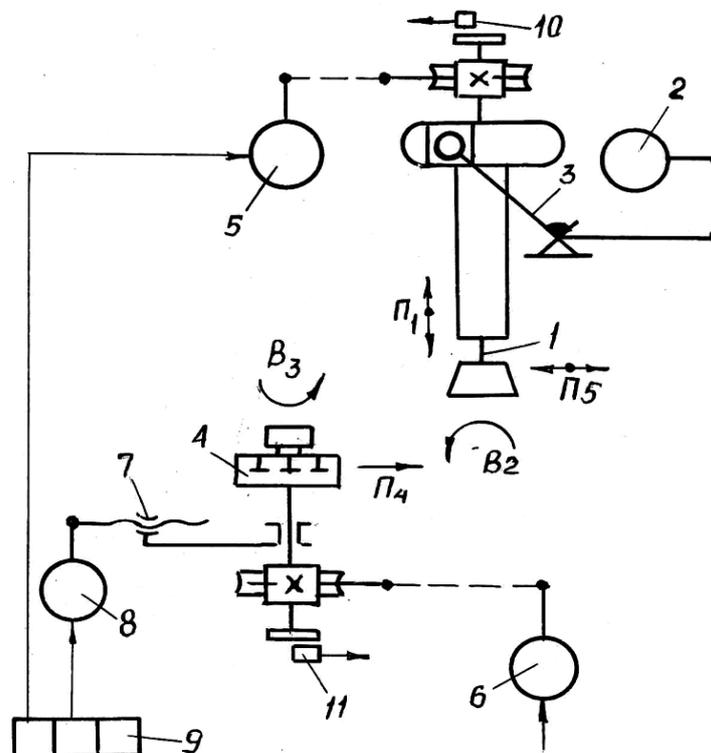


Рисунок 6.5. – Структурная схема станка

Связь механических исполнительных органов – шпинделя 1 и делительного стола 4 с электронным валом обеспечивается импульсными измерительными преобразователями 10 и 11, установленными соответственно на шпинделе и делительном столе. Эти преобразователи соединены соответственно с входами ключа 1 и счетчика 2 схемы синхронизации (рисунок 6.6).

Ключ 1, например, элемент 2И, имеет два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого ключа соединен с входом счетчика 3, к которому подключен блок 4 задания коэффициента деления, выполняющий

функцию установки передаточного отношения станочного зацепления группы обката. Другой выход ключа 3 соединен с входом счетчика 5, к которому подключен блок 6 установки коэффициента умножения, выполняющий также функцию установки передаточного отношения. Выходы счетчиков 3 и 5 соединены с входом импульсно-аналогового преобразователя 7, через ключ 8 – с входом импульсно-аналогового преобразователя 9, через ключ 10 – с первым входом фазового дискриминатора 11. Выход счетчика 2 соединен через ключ 12 со вторым входом фазового дискриминатора 11. Выход этого дискриминатора соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 13. Управляющий вход ключа 8 соединен с выходом формирователя 14 сигнала управления угловым смещением (дискретной круговой подачей) делительного стола на этапах врезания, а управляющие входы ключей 10 и 12 – с выходом этого формирователя через элемент НЕ 15. Выходы импульсно-аналоговых преобразователей 7, 9, 13 соединены с входами суммирующего усилителя 16. Выход этого усилителя соединен через усилитель мощности 17 с электродвигателем ведомой координаты.

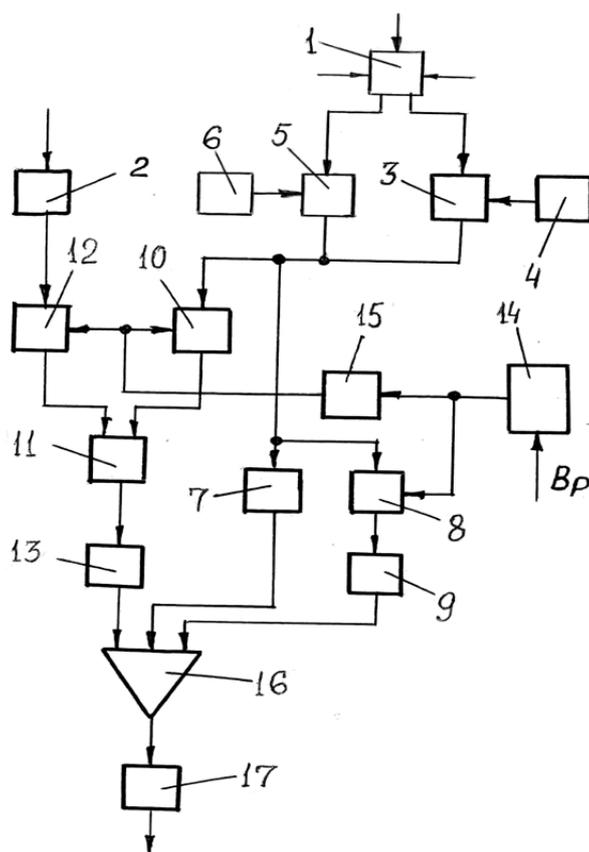


Рисунок 6.6. – Электронный вал группы обката

Счетчик 3 совместно с блоком 4 установки передаточного отношения выполняет функцию делителя частоты дискретного сигнала, а счетчик 5 сов-

местно с блоком 6 установки коэффициента умножения выполняет функцию умножителя частоту дискретного сигнала. Выбор делителя или умножителя частоты зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка:

$$i_x = c \frac{z_d}{z},$$

где  $i_x$  – передаточное отношение станочного зацепления;

$c$  – коэффициент, зависящий от передаточного отношения делительных передач;

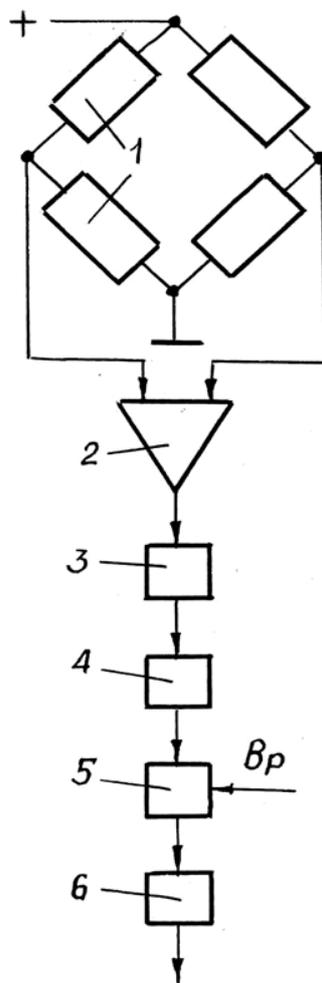
$z_d$  и  $z$  – числа зубьев соответственно долбяка и заготовки.

В практике зубообработки  $z \geq cz_d \geq z$ . Поэтому при  $cz_d < z$  ключом 1 устанавливается связь импульсного измерительного преобразователя 10 с делителем частоты, при  $cz_d > z$  – с умножителем частоты. При  $cz_d = z$  эта связь может устанавливаться с любым из этих блоков.

Импульсно-аналоговый преобразователь 7 выполняет функцию задатчика круговой подачи  $V_3$  делительного стола, а импульсно-аналоговый преобразователь 9 – функцию задатчика дополнительного углового смещения на этапах врезания. На входе этого преобразователя используется дополнительный делитель частоты.

Формирователь 14 сигнала управления угловым смещением делительного стола на этапах врезания содержит (рисунок 6.7) тензометрический мост 1, тензорезисторы которого закреплены или на приспособлении для базирования заготовок, или на оправке для закрепления долбяков. Выходы тензометрического моста соединены с входами дифференциального усилителя 2, соединенного своим выходом с входом цепи, содержащей последовательно соединенные интегратор 3, усилитель-ограничитель 4, аналоговый ключ 5, блок задержки 6. При наладке станка подача врезания и количество этапов врезания устанавливаются посредством задания на программируемом контроллере.

Станок работает следующим образом. При включении электродвигателя 2 (см. рисунок 6.5) получает поступательно-возвратное движение  $П_1$  шпиндель 1 долбяка. Затем после ускоренного перемещения продольного стола 7 в исходную для обработки точку электродвигатель 8 переключается на подачу врезания в движении  $П_4$  на путь врезания на первом черновом проходе. Одновременно включается электродвигатель 5 задающей координаты, сообщающий шпинделю 1 вращательное движение  $V_2$  круговой подачи, и схема отслеживающей синхронизации.



**Рисунок 6.7. – Формирователь сигнала управления**

Импульсный измерительный преобразователь *10* вырабатывает высоко-частотный сигнал, пропорциональный круговой подаче долбяка. Этот сигнал через ключ *1* поступает (см. рисунок 6.6) или в счетчик *3* делителя частоты, или в счетчик *5* умножителя частоты, где происходит или деление сигнала в соответствии с коэффициентом деления, установленным на блоке *4*, или его умножение в соответствии с коэффициентом, установленным на блоке *6*. На выходе счетчика *3* или счетчика *5* образуется импульсный сигнал – аналог круговой подачи делительного стола в движении  $V_3$ . Этот сигнал преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе *7* и после прохождения суммирующего усилителя *16* и усилителя мощности *17* приводит во вращение электродвигатель *6* ведомой координаты (делительный стол *4* с заготовкой обрабатываемого колеса).

В результате делительный стол будет отслеживать движение шпинделя. Причем отношение круговых частот вращения (круговых подач) шпинделя и делительного стола будет соответствовать отношению частот дискретного сигнала на входе ключа *1* и на выходе одного из счетчиков.

Одновременно с началом вращательного движения  $V_3$  импульсный измерительный преобразователь  $11$  вырабатывает высокочастотный сигнал – аналог действительной круговой подачи делительного стола. Этот сигнал через счетчик  $2$  и открытый по управляющему входу ключ  $12$  поступает на второй вход фазового дискриминатора  $11$ , на первом входе которого действует задающий сигнал, поступающий через открытый по управляющему входу ключ  $10$  с выхода счетчика  $3$  или счетчика  $5$ .

В фазовом дискриминаторе происходит сравнение задающего и действительного сигналов – аналогов круговой подачи делительного стола. В итоге на выходе фазового дискриминатора  $11$  образуется корректирующий сигнал, поступающий через импульсно-аналоговый преобразователь  $13$  в суммирующий усилитель  $16$ , где происходит коррекция сигнала управления электродвигателем  $6$ .

После врезания на заданную часть высоты зуба по программе движение врезания прекращается и в течение полного оборота делительного стола осуществляется первый черновой проход обработки. После его завершения при продолжающемся движении обката включается движение врезания  $14$  на вторую часть припуска. Одновременно включается формирователь  $14$  сигнала управления угловым смещением делительного стола.

При рабочем ходе шпинделя в движении  $11$  тензометрический мост формирователя  $14$  регистрирует момент силы резания. Этот момент как физическое явление в зоне резания представляет собой сумму моментов резания обеими боковыми режущими кромками. Причем момент резания на входной режущей кромке имеет большее значение. Следовательно, знак суммарного момента постоянен. Сигнал – аналог момента резания после усиления в дифференциальном усилителе  $2$  поступает в интегратор  $3$ , где происходит его преобразование в непрерывный сигнал. После преобразования в управляющий потенциал в усилителе-ограничителе  $4$  этот сигнал после подачи на управляющий вход аналогового ключа  $5$  потенциала, соответствующего этапу врезания, через блок задержки  $6$  поступает на управляющий вход ключа  $8$  (см. рисунок 6.6) и через элемент  $HE 15$  – на управляющие входы ключей  $10$  и  $12$ . В результате цепь коррекции системы отслеживающей синхронизации на этапе врезания отключается.

Одновременно через открытый по управляющему входу ключ  $8$  на вход суммирующего усилителя  $16$  поступает дополнительный сигнал от импульсно-аналогового преобразователя  $9$ . В итоге при неизменной круговой подаче шпинделя долбяка круговая подача делительного стола увеличивается, то есть происходит его угловое смещение относительно исходного положения. Это

равнозначно постепенному перераспределению толщины срезаемой стружки в сторону ее увеличения на выходных режущих кромках. При выравнивании толщин стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, момент силы резания равен нулю, и формирование сигнала управления угловым смещением стола прекращается. Формирователь 14 сигнала управления этим смещением отключается, ключ 8 закрывается, а ключи 10 и 12 открываются. Движение врезания прекращается.

Схема отслеживающей синхронизации перестраивается в исходное состояние, и в течение полного оборота делительного стола осуществляется черновой проход. После его выполнения повторяется цикл врезания для следующего прохода и т.д.

Рассмотренная схема обеспечивает одностороннюю относительно номинального значения коррекцию девиации механических передач привода делительного стола. Возможно также использование других схем, например, схемы [27], обеспечивающей двухстороннюю коррекцию девиации.

Таким образом, в рассмотренном станке используется две схемы адаптивного управления. Одна схема обеспечивает повышение точности получаемых зубчатых колес за счет устранения девиации механики ведомой координаты группы обката. Другая схема обеспечивает повышение периода размерной стойкости долбяков за счет создания одинаковых условий резания обеими боковыми режущими кромками.

#### **6.4 Зубодолбежный станок для одновременной обработки двух зубчатых колес при касательном врезании**

На рисунке 6.8 приведена структурная схема зубодолбежного станка с двумя делительными столами, реализующего способ одновременной обработки двух зубчатых колес одним долбяком.

Кинематическая структура станка состоит из групп скорости резания  $\Phi_v \uparrow (II_1)$ , обката  $\Phi_5(B_2B_3)$ , врезания  $Vp(II_4B_5)$ , отвода – подвода долбяка к заготовке  $Пз \uparrow (II_6)$ . Группа  $\Phi_v \uparrow (II_1)$  традиционна для зубодолбежных станков. Поэтому ее описание опускаем.

Группа обката  $\Phi_5(B_2B_3)$  обеспечивает одновременное профилирование зубьев обеих заготовок. Ее внутренняя связь представляет собой разветвлен-

ную цепь обката, связывающую шпиндель 6 долбяка с обоими делительными столами 13.

$$\begin{array}{c}
 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3. \\
 \uparrow \\
 B_2 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow i_x \rightarrow 10 \\
 \downarrow \\
 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3.
 \end{array}$$

Внешняя связь группы представляет собой кинематическую цепь

$$M \rightarrow 1 \rightarrow i_v \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 14 \rightarrow i_s \rightarrow 9,$$

передающую энергию движения от электродвигателя во внутреннюю связь через звено соединения связей 9.

Группа настраивается на траекторию органом настройки  $i_x$ , на скорость (круговую подачу) – органом настройки  $i_s$ .

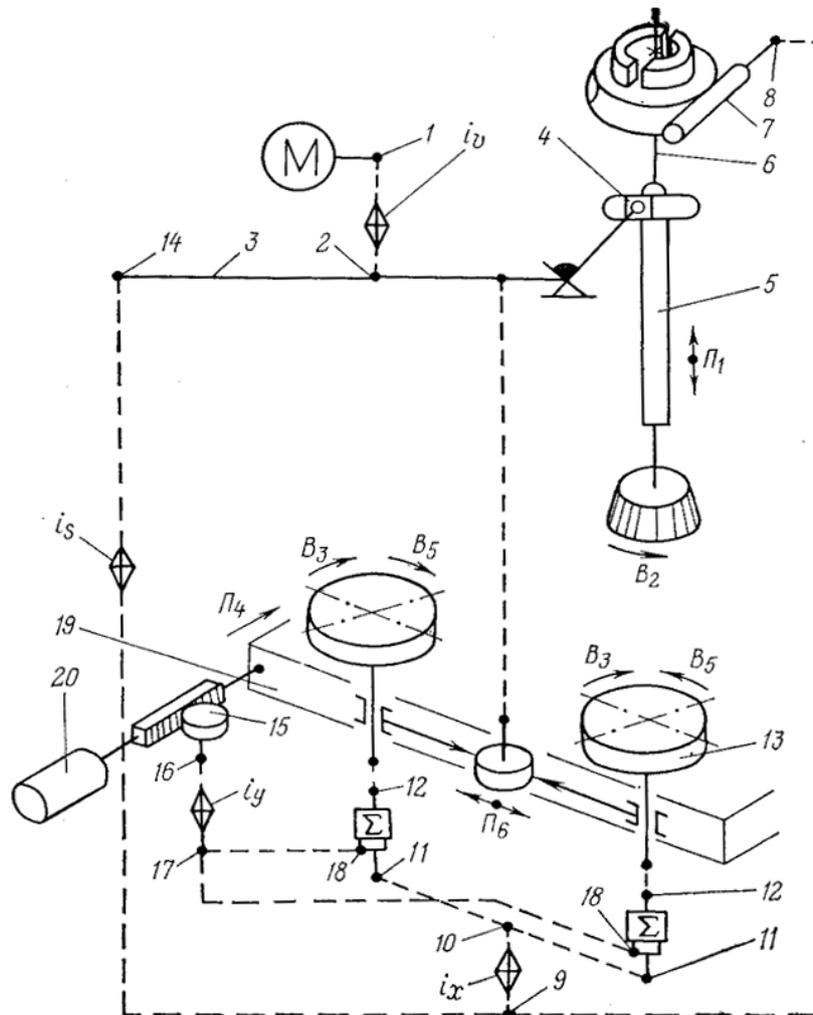


Рисунок 6.8. – Структурная схема станка для одновременной обработки двух зубчатых колес одним долбяком

Группа врезания  $Vp(\Pi_4 B_5)$  имитирует зубчато-реечное зацепление. Ее внутренняя связь

$$\begin{array}{c}
 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_5 \\
 \uparrow \\
 \Pi_4 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow i_y \rightarrow 17 \\
 \downarrow \\
 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_5
 \end{array}$$

обеспечивает согласование вращательного движения  $B_5$  делительных столов  $13$  с движением касательного врезания  $\Pi_4$  продольного стола  $19$ .

Внешняя связь сообщает энергию движения от гидроцилиндра  $20$  во внутреннюю связь через зубчато-реечную передачу  $15$ , являющуюся звеном соединения связей.

Движение касательного врезания настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_y$ , на скорость – регулируемым дросселем, расположенным на гидропанели гидропривода врезания.

Делительные столы  $13$  на этапе врезания одновременно участвуют в двух движениях. Поэтому внутренние связи групп обката и касательного врезания после их разветвления соединены между собой планетарными суммирующими механизмами.

Группа  $\Pi_3 \uparrow (\Pi_6)$  традиционна для зубодолбежных станков. Однако это движение в рассматриваемом станке сообщается делительным столам, а его направление перпендикулярно направлению движения врезания.

Вывод ФН для гитары сменных зубчатых колес  $i_y$ . Внутренняя связь группы обката и расчетная цепь для органа настройки совпадают. Следовательно, РП имеют вид:

$$\begin{array}{l}
 s \text{ мм перемещения продольного стола } 19 \text{ в движении } \Pi_4 \rightarrow \\
 \rightarrow s/\pi m z \text{ поворота делительных столов } 13 \text{ в движении } B_5.
 \end{array}$$

Тогда УКЦ:

$$s/\pi m z = s i_0 i_\Sigma i_y.$$

Откуда ФН:

$$i_y = c / (m z),$$

где  $c = \pi i_0 i_\Sigma$ ;

$i_0$  – произведение постоянных передач расчетной цепи;

$i_\Sigma$  – передаточное отношение суммирующего механизма.

Принцип функционирования станка практически не отличается от принципа функционирования рассмотренного выше станка с радиальным врезанием.

## 6.5 Зубодолбежный станок для последовательной обработки зубчатых колес при касательном врезании

Принципиальная особенность взаимной ориентации долбяка и заготовки при касательном движении врезания позволяет создать компоновку зубодолбежного станка по типу компоновки вертикально-фрезерного станка, у которого продольный стол перемещается в плоскости, перпендикулярной оси симметрии станка. При такой компоновке на продольном столе можно разместить два делительных стола и, таким образом, создать условия для последовательной обработки заготовок. В этом случае вспомогательное время, необходимое для замены нарезанного колеса очередной заготовкой, будет перекрываться машинным временем нарезания колеса на другом столе.

Кинематико-компоновочная схема станка [24], реализующая названный способ, приведена на рисунке 6.9. Продольный стол 1 установлен с возможностью движения в плоскости врезания, перпендикулярной оси симметрии станка, проходящей через ось шпинделя 2. На продольном столе расположены делительные столы 3 и 4. Кинематическая связь продольного стола 1 с делительными столами 3 и 4 осуществляется через зубчатую рейку 5, закрепленную на продольном столе. Привод продольного стола осуществляется от симметричного гидроцилиндра двойного действия 6, установленного параллельно зубчатой рейке 5.

Кинематическая структура станка состоит из групп скорости резания  $\Phi_V \uparrow (П_1)$ , обката  $\Phi_S (B_2 B_{31})$ , врезания  $V_p (П_4 B_{32})$ , отвода – подвода  $V_c \downarrow (П_5)$ . Группы  $\Phi_V \uparrow (П_1)$  и  $П_3 \downarrow (П_5)$  аналогичны таким же группам, используемым в рассмотренных выше станках с радиальным врезанием. Поэтому их описание опускаем.

Делительные столы 3 и 4 являются исполнительными органами обеих сложных групп. Поэтому их движения  $B_3$  суммируются из движений  $B_{31}$  и  $B_{32}$ , которые им сообщаются в соответствующих группах.

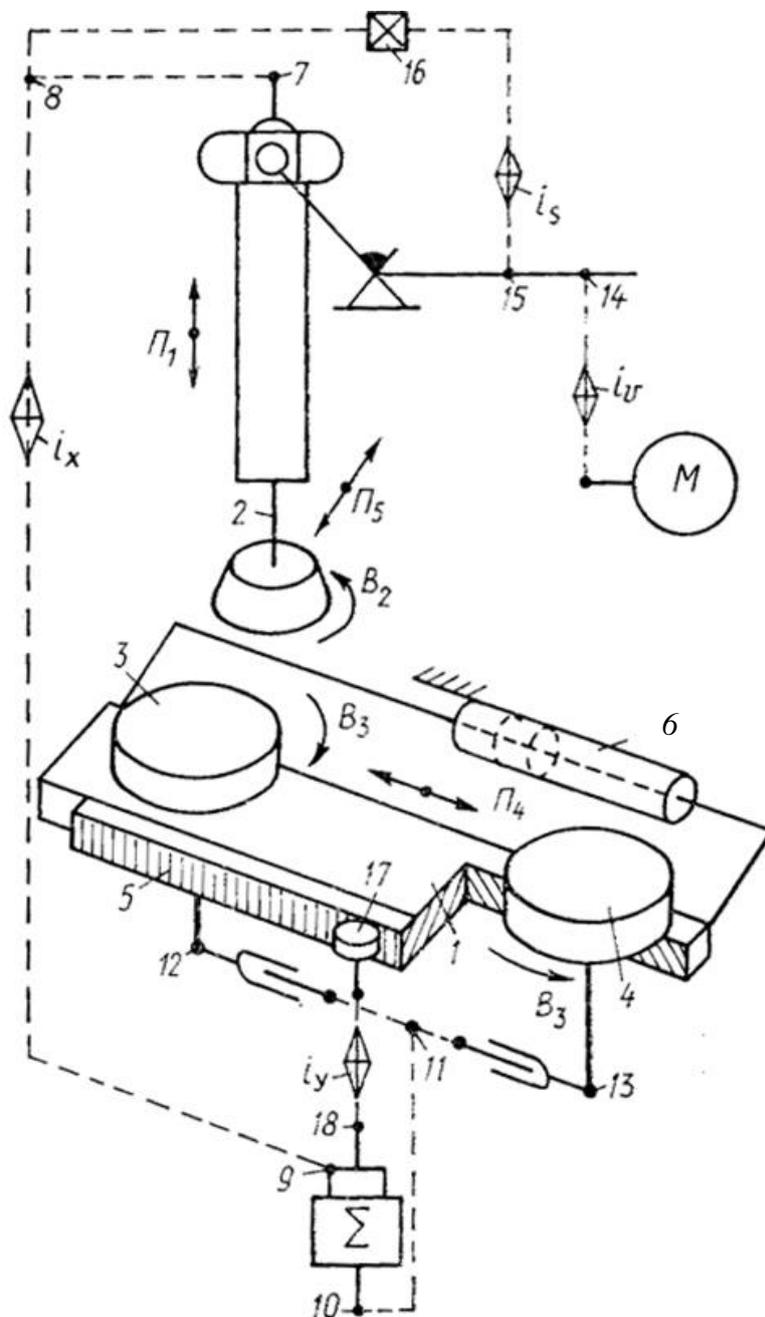
Группа обката  $\Phi_S (B_2 B_{31})$  обеспечивает профилирование зубьев заготовок. Ее внутренняя связь представляет собой цепь обката, связывающую шпиндель 2 долбяка с обоими делительными столами 3 и 4:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & & & 12 \rightarrow 3 \rightarrow B_{31} \\
 & & & & & & \uparrow \\
 B_2 \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow i_x \rightarrow 9 \rightarrow \Sigma \rightarrow 10 \rightarrow 11 & & & & & & \\
 & & & & & & \downarrow \\
 & & & & & & 13 \rightarrow 4 \rightarrow B_{31}
 \end{array}$$

## Внешняя связь

$M \rightarrow i_s \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow \text{реверсивный механизм } 16 \rightarrow 8$

сообщает энергию движения от электродвигателя  $M$  во внутреннюю связь через звено соединения связей  $8$ .



**Рисунок 6.9.** – Кинематико-компоновочная схема двухстолового станка для последовательной обработки зубчатых колес

Движение обката настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_x$ , на круговую подачу гитарой сменных зубчатых колес  $i_s$ , на направление реверсивным механизмом 16, установленным во внешней связи

группы. Наличие отдельного реверсивного механизма обязательно, так как по условиям компоновки станка обработка заготовок на обоих делительных столах осуществляется при противоположных направления их вращательного движения.

Группа врезания  $Vp(П_4V_{32})$  имитирует зубчато-реечное зацепление. Ее внутренняя связь (станочное зацепление)

$$\begin{array}{c}
 12 \rightarrow 3 \rightarrow V_{32} \\
 \uparrow \\
 П_4 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 17 \rightarrow i_y \rightarrow 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 10 \rightarrow 11 \\
 \downarrow \\
 13 \rightarrow 4 \rightarrow V_{32}
 \end{array}$$

обеспечивает согласование вращательного движения делительных столов с движением касательного врезания  $П_4$  продольного стола  $1$ .

Внешняя связь

$$\text{гидроцилиндр } б \rightarrow \text{зубчато реечная передача } 5/17 \rightarrow i_y \rightarrow \Sigma \rightarrow 10 \rightarrow 11$$

сообщает энергию движения от гидроцилиндра во внутреннюю связь через звено соединения  $11$ .

Группа касательного врезания настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_y$ , на скорость – регулируемым дросселем гидропривода.

Группы врезания и обката имеют общий участок, разветвляющийся после кинематического звена  $11$ : одна ветвь связывает это звено с делительным столом  $3$ , а другая – с делительным столом  $4$ .

Вывод ФН для органов настройки  $i_x$  и  $i_y$  аналогичен выводам, приведенным при анализе структурной схемы станка, рассмотренного выше (см. рисунок 6.8).

Станок работает следующим образом. После установки заготовки на одном из делительных столов, например,  $4$ , осуществляется непрерывный рабочий цикл. Движением  $П_4$  продольный стол  $1$  перемещается на подаче позиционирования из исходного положения на позицию врезания. Затем гидроцилиндр  $б$  переключается на подачу врезания в движении  $П_1$ . Одновременно шпинделю  $2$  долбяка сообщается поступательно-возвратное движение  $П_1$  и круговая подача  $V_2$ . В результате на этапе врезания делительный стол  $4$  будет одновременно участвовать в двух движениях: движении  $V_{32}$ , согласованном с движением  $П_4$  продольного стола  $1$ , и движением  $V_{31}$ , согласованном с движением  $V_2$  долбяка. Движения  $V_{31}$  и  $V_{32}$  физически суммируются планетарным дифференциалом  $\Sigma$ , образуя суммарное движение  $V_3$  на этапе врезания. Период врезания продолжается до тех пор, пока не произойдет вре-

зание долбяка на высоту зуба обрабатываемого колеса. После этого движение  $П_1$  и согласованное с ним движение  $В_{32}$  прекращаются. По окончании врезания в течение одного оборота делительного стола 4 согласованными движениями  $В_2$  долбяка и  $В_{31}$  делительного стола осуществляется профилирование колеса.

На этапе профилирования, когда продольный стол неподвижен, на делительном столе 3 устанавливается заготовка. По окончании профилирования движение  $П_1$  прекращается и долбяк выводится в крайнее верхнее положение. Затем посредством гидроцилиндра 6 продольному столу 1 в движении  $П_4$  сообщается движение позиционирования на позицию врезания для обработки заготовки на делительном столе 3. При этом одновременно с началом движения  $П_4$  происходит включение движения  $В_{32}$  делительного стола 3. После перемещения делительного стола 3 на позицию врезания гидроцилиндр переключается на подачу врезания. Одновременно переключается реверсивный механизм 16, обеспечивающий изменение направления вращения долбяка в движении  $В_2$ , и включается движение  $П_1$  долбяка и движение  $В_{31}$  делительного стола 3. В итоге цикл обработки повторяется на делительном столе 3, а на столе 4 в этот период происходит снятие обработанного колеса и установка новой заготовки.

Таким образом, на станке происходит автоматическое чередование обработки колес на делительных столах 4 и 3. При этом на каждом столе обеспечиваются одинаковые условия резания, а у долбяка попеременно от заготовки к заготовке меняются входные и выходные режущие кромки зубьев. По существу, это явление является технологическим приемом, обеспечивающим повышение периода размерной стойкости долбяков.

## **6.6 Зубодолбежный двухстоловый станок-автомат с ЧПУ для последовательной обработки зубчатых колес**

В соответствии с общей тенденцией в области станкостроения заменим в рассмотренном станке механические связи электронными на базе интегральных схем, а гидравлический привод продольного стола унифицируем с приводом одной из выпускаемых базовых моделей. Соответствующая структурная схема станка [28; 29] представлена на рисунке 6.10.

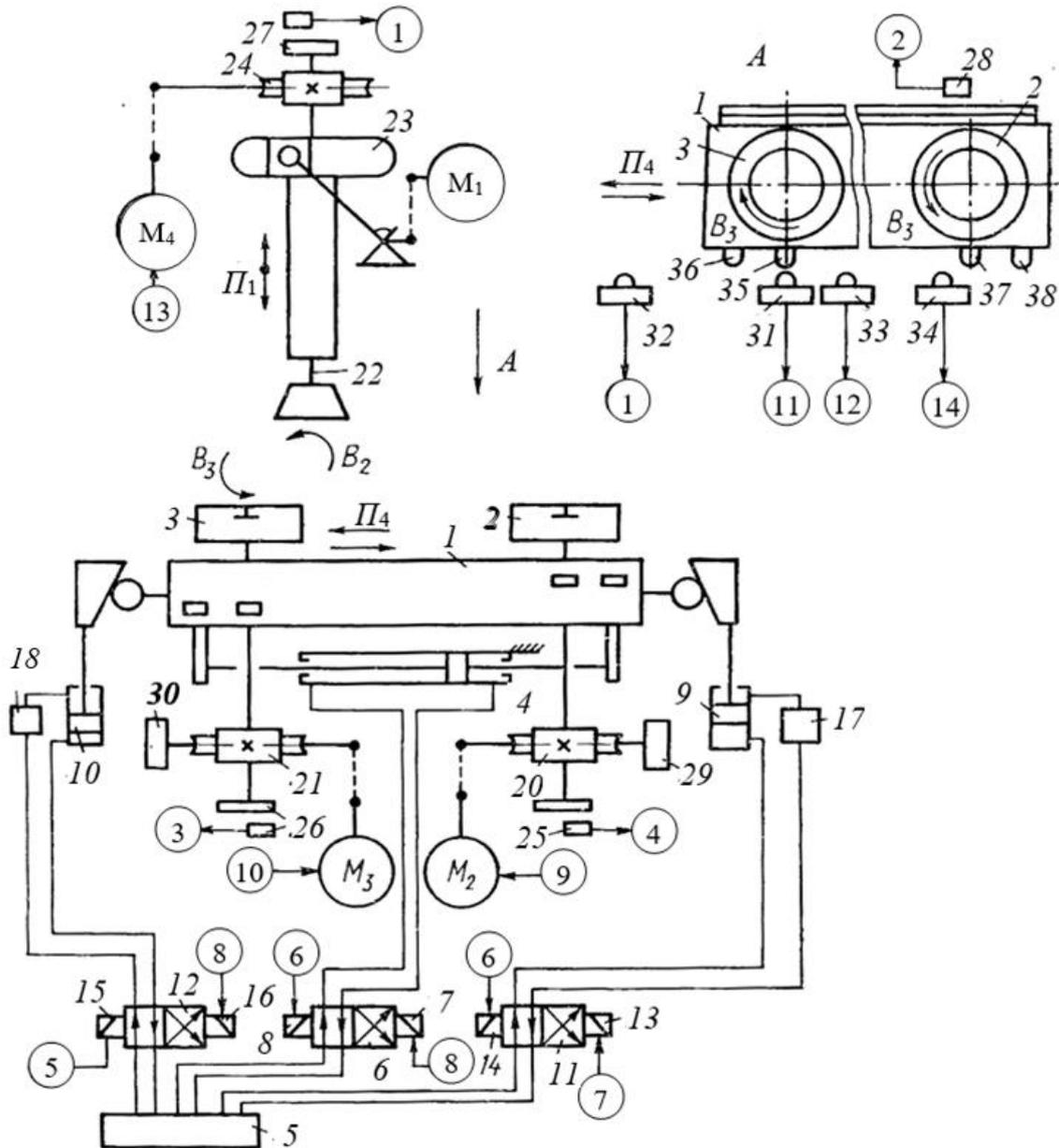


Рисунок 6.10. – Структурно-компоновочная схема зубодолбежного станка-автомата

Кинематическая структура станка включает группу воспроизведения линии зуба  $\Phi_v \downarrow (\Pi_1)$ , гибридную группу воспроизведения профиля зуба  $\Phi_s (B_2 B_3)$ , гибридную группу касательного врезания  $Vp (\Pi_4 B_3^1)$ , группу отвода – подвода долбяка заготовке  $\Pi_3 \downarrow (\Pi_5)$ .

Традиционные для зубодолбежных станков группы  $\Phi_v \downarrow (\Pi_1)$  и  $\Pi_3 \downarrow (\Pi_5)$  подробно рассмотрены при анализе типовой структуры зубодолбежного станка (см. рисунок 6.4). Поэтому при анализе данного станка они не рассматриваются.

На продольном столе 1 в плоскости подачи врезания  $\Pi_4$  установлены делительные столы 2 и 3. Привод позиционирования продольного стола 1

осуществляется посредством симметричного гидроцилиндра двухстороннего действия 4, соединенного с гидростанцией 5 через реверсивный золотник 6, управляемый электромагнитами 7 и 8, а привод касательного врезания – гидроцилиндрами 9 и 10, расположенными с противоположных сторон продольного стола 1. Гидроцилиндры соединены с гидростанцией 5 через реверсивные золотники 11 и 12, управляемые электромагнитами соответственно 13, 14 и 15, 16. В трубопроводах гидроцилиндров 9 и 10 установлены регуляторы (органы настройки) 17 и 18 подачи касательного врезания. Приводы круговых подач делительных столов 2 и 3 осуществляются от электродвигателей  $M_2$  и  $M_3$  через делительные передачи 20 и 21. Привод поступательно-возвратного движения шпинделя 22, несущего долбяк, осуществляется электродвигателем  $M_1$  через кулисный механизм 23, а привод круговых подач шпинделя – через делительную передачу 24 от электродвигателя  $M_4$ .

На делительных передачах исполнительных органов – шпинделе, продольном и круговых столах установлены импульсные измерительные преобразователи 25, 26, 27, 28, предназначенные для преобразования прямолинейного перемещения продольного стола и круговых частот вращения шпинделя и делительных столов в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему функциональных связей приводов исполнительных органов.

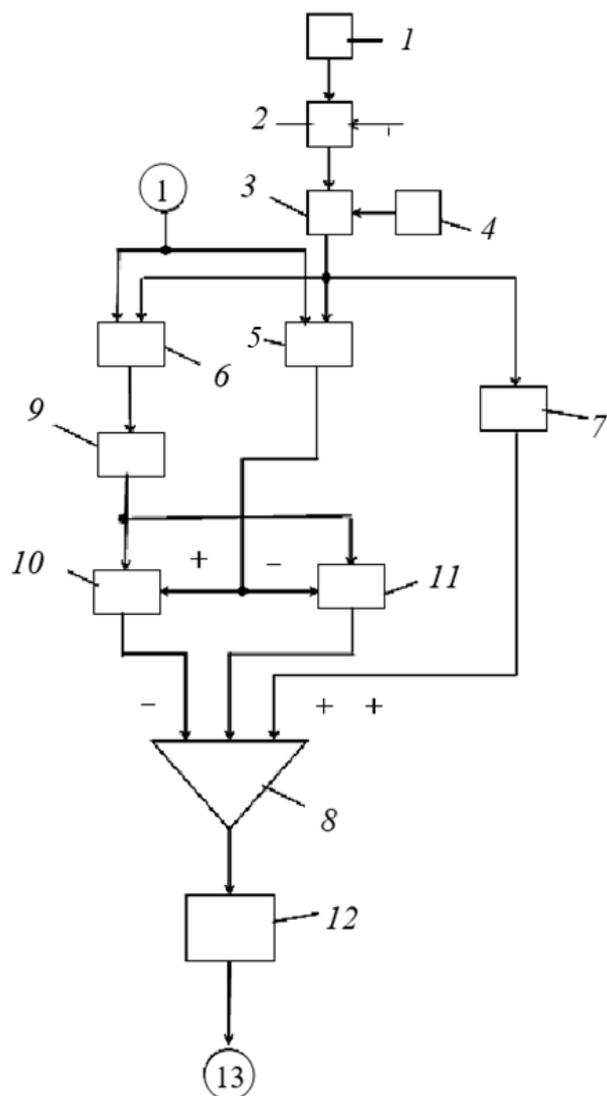
Для связи со схемой цикловой автоматики станок оснащен счетчиками числа зубьев 29 и 30, расположенными на делительных передачах 20 и 21, и конечными выключателями 31–34, которым соответствуют упоры 35–38, установленные на продольном столе 1.

Система управления состоит из устройства функциональных связей исполнительных органов и устройства цикловой автоматики. Коммутация связей осуществляется через центральный программируемый контроллер.

Устройство функциональных связей обеспечивает согласование движений исполнительных органов в сложных гибридных кинематических группах  $\Phi_3(B_2B_3)$  и  $Bp(\Pi_4 B_3^1)$ , воспроизводящих соответственно зацепление двух зубчатых колес и рейки с колесом. Ведущими координатами в указанных группах являются шпиндель и продольный стол, а ведомыми координатами – делительные столы.

Сигнал управления продольным столом воспроизводится гидросхемой, обеспечивающей движение позиционирования с постоянной скоростью и направляемое движение подачи касательного врезания.

Сигнал управления шпинделем 22 долбяка в движении  $B_2$  воспроизводится электронным формирователем (рисунок 6.11), выполненным по схеме с автоматической двухсторонней коррекцией погрешности его привода.



**Рисунок 6.11. – Формирователь задающего сигнала шпинделя долбяка**

Эталонный генератор *1* соединен посредством элемента *И 2*, управляемого потенциальным сигналом с входом делителя частоты, состоящего из счетчика импульсов *3* и блока установки коэффициента деления *4*, выполняющего функцию органа настройки круговой подачи шпинделя. Выход счетчика *3* соединен с первыми входами знакового *5* и фазового *6* дискриминаторов, и через импульсно-аналоговый преобразователь *7* – с первым положительным входом параллельного сумматора *8*. Вторые входы дискриминаторов *5* и *6* соединены с импульсным измерительным преобразователем *27*, установленным на шпинделе *22* (см. рисунок 6.10). Выход фазового дискриминатора *6* соединен через импульсно-аналоговый преобразователь *9* с аналоговыми входами элементов *И 10* и *И 11*, управляемых соответственно положительным и отрицательным потенциалами, а выход знакового дискриминатора *5* – с потенциальными входами этих элементов.

Выходы элементов *И 10* и *И 11* соединены соответственно с отрицательным и положительным входами параллельного сумматора 8, выход которого через усилитель мощности 12 соединен с электродвигателем привода круговой подачи шпинделя. При подаче потенциала на управляющий вход элемента *И 2* импульсный сигнал с эталонного генератора 1 поступает на вход счетчика 3 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 4 коэффициентом деления. Сигнал с выхода счетчика 3 после преобразования его в импульсно-аналоговом преобразователе 7 в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, поступает через параллельный сумматор 8 и усилитель мощности 12 на электродвигатель привода круговой подачи шпинделя.

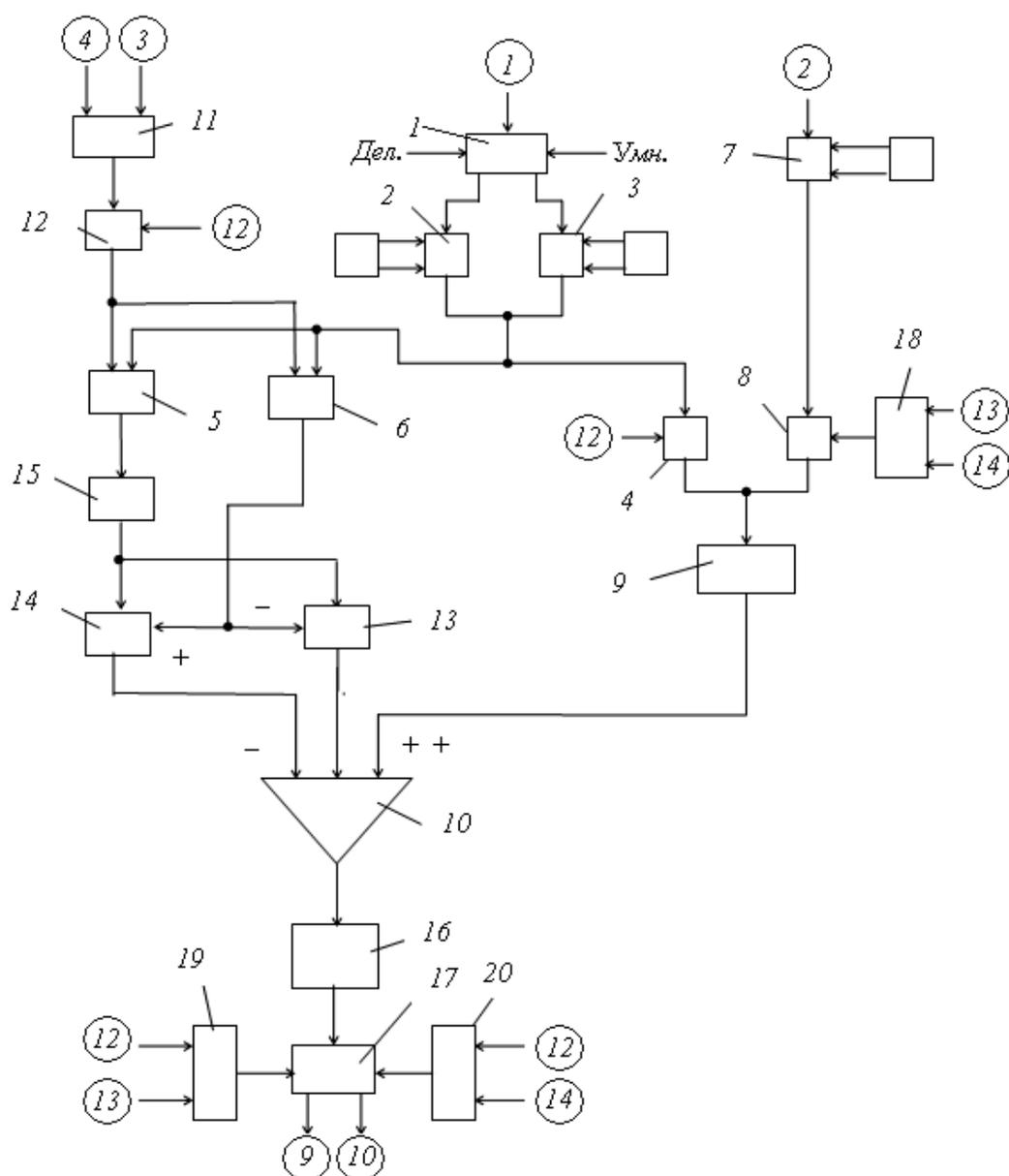
Одновременно для устранения девиации механики этого привода осуществляется коррекция управляющего сигнала. На первые входы дискриминаторов 5 и 6 непрерывно поступает задающий сигнал со счетчика 3, а на вторые входы этих дискриминаторов – импульсный сигнал с импульсного измерительного преобразователя, установленного на шпинделе 1, соответствующий мгновенному значению круговой подачи. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора 6 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 9 поступает на аналоговые входы элементов *И 10* и *И 11*.

Одновременно на выходе знакового дискриминатора 5 непрерывно образуются отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный потенциал при опережении, который поступает на потенциальные входы элементов *И 10* и *И 11* и открывает один из них. При открывании элемента *И 11*, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 8, а при открывании элемента *И 10*, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания этого сумматора. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре происходит увеличение или уменьшение задающего сигнала, действующего на его первом входе, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно номинального значения, или двухстороннее адаптивное управление.

Формирователь сигнала управления ведомых координат – делительных столов (рисунок 6.12) – выполнен по схеме отслеживающей синхронизации [28].

Задатчиками для делительных столов являются импульсные измерительные преобразователи 27 и 28, установленные соответственно на дели-

тельных передачах шпинделя 22 и продольного стола 1. Импульсный измерительный преобразователь 27 соединен с входом элемента 2И 1, имеющим два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого элемента соединен с входом делителя частоты 2, а другой – с входом умножителя частоты 3. Выходы делителя частоты 2 и умножителя частоты 3 объединены и соединены с входом элемента И 4, управляемого аналоговым сигналом, и с первыми входами фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов. Импульсный измерительный преобразователь 28 соединен с входом делителя частоты 7, у которого выход соединен с входом элемента И 8, управляемого аналоговым сигналом.



**Рисунок 6.12. – Формирователь сигнала управления ведомых координат (электронный вал)**

Выходы элементов *И 4* и *8* объединены и соединены с входом импульсно-аналогового преобразователя *9*, соединенного своим выходом с первым положительным входом параллельного сумматора *10*. Импульсные измерительные преобразователи, установленные на делительных передачах ведомых координат (делительных столах), соединены через элемент *ИЛИ 11* с входом элемента *И 12*, выход которого соединен со вторыми входами фазового *5* и знакового *6* дискриминаторов. Выход знакового дискриминатора *6* соединен с потенциальными входами элементов *И 13* и *14*, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход элемента *И 13* соединен со вторым положительным входом параллельного сумматора *10*, а выход элемента *И 14* – с отрицательным входом этого сумматора. Выход фазового дискриминатора *5* через импульсно-аналоговый преобразователь *15* соединен с аналоговыми входами элементов *И 13*, *14*. Выход параллельного сумматора *10* через усилитель мощности *16* и ключ *17*, имеющий два управляющих входа и два выхода, соединен с электродвигателями *М<sub>2</sub>* и *М<sub>3</sub>* (см. рисунок 6.10) ведомых координат (делительных столов).

Формирователь сигнала управления ведомых координат соединен с устройством цикловой автоматики посредством элементов *ИЛИ 18*, *19*, *20*, через которые на управляющие входы элементов *И 4*, *8* и ключ *17* подаются по циклу обработки управляющие потенциалы на этапах врезания и профилирования.

Делители частоты *2* и *7* аналогичны делителю частоты, используемому в схеме формирования сигнала управления привода круговых подач шпинделя. Умножитель частоты *3* состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента умножения.

Выбор делителя частоты *2* или умножителя частоты *3* зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка:

$$i_x = c \frac{z_d}{z},$$

где  $i_x$  – передаточное отношение станочного зацепления;

$c$  – коэффициент, зависящий от передаточного отношения делительных передач;

$z_d$  и  $z$  – числа зубьев соответственно долбяка и нарезаемого колеса.

При  $cz_d < z$  ключом *5* устанавливаем связь импульсного измерительного преобразователя *20* с делителем частоты *6*, при  $cz_d > z$  – с умножителем частоты *7*. При  $cz_d = z$  эта связь может устанавливаться с любым из этих блоков при условии установки коэффициента деления или умножения равным единице.

Таким образом, блоки установки коэффициента деления или умножения соответственно в делителе частоты 2 или в умножителе частоты 3 выполняют функцию органа настройки на круговую подачу делительных столов 2 и 3 станочного зацепления долбяк – заготовка, а совместно с делителем частоты шпинделя 22 – органа настройки на траекторию этого зацепления. Блок установки коэффициента деления делителя 7 выполняет функцию органа настройки на дополнительный поворот делительных столов на этапе врезания.

Устройство цикловой автоматики (рисунок 6.13) состоит [29] из ключей 1–4, аналоговые входы которых объединены и соединены с источником питания 5. Выход ключа 1 соединен с электромагнитами 7 и 16 реверсивных золотников 6 и 12, выход ключа 2 – с электромагнитами 8 и 14 реверсивных золотников 6 и 11, выход ключа 3 – с электромагнитом 13 реверсивного золотника 11, выход ключа 4 – с электромагнитом 15 реверсивного золотника 12. Потенциальные (управляющие) входы ключей 1–4 соединены с выходами триггеров соответственно 6–9. Первый вход триггера 6 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 10, у которого второй вход соединен с конечным выключателем 32 (см. рисунок 6.10). Вторым входом триггера 6 соединен с выходом элемента *И* 11, у которого первый вход соединен с конечным выключателем 31, а вторым входом – с выходом элемента *ИЛИ* 12.

Первый вход триггера 7 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 13, соединенного вторым входом с конечным выключателем 34. Вторым входом триггера 7 соединен с выходом элемента *И* 14, у которого первый вход соединен с конечным выключателем 33, а вторым входом – с выходом элемента *ИЛИ* 12. Первый вход элемента *ИЛИ* 12 соединен с кнопкой «Пуск» пульта управления станка (ПУ), а вторым – с выходом реле времени 15. Первый вход триггера 8 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 16, у которого вторым входом соединен с *ВК* 33. Вторым входом триггера 8 соединен с выходом элемента *И* 17, соединенного первым входом с *ВК* 32, а вторым входом через элемент *НЕ* – с выходом триггера 7.

Первый вход триггера 9 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 19, соединенного вторым входом с конечным выключателем 31. Вторым входом триггера 9 соединен с выходом элемента *И* 20, у которого первый вход соединен с *ВК* 34, а вторым входом через элемент *НЕ* 21 – с выходом триггера 6. Первый вход триггера 22 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 23, соединенного вторым входом с выходом счетчика зубьев 29. Вторым входом триггера 22 соединен с конечным выключателем 33. Выход триггера 22 соединен со счетчиком зубьев 29. Первый вход триггера 24 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 25, соединенного вторым входом с выходом счетчика зубьев 30. Вторым входом

триггера 24 соединен с конечным выключателем 31. Выход триггера 24 соединен с входом счетчика зубьев 30. Выходы счетчиков зубьев 29 и 30 соединены также с входами элемента ИЛИ 26, выход которого соединен с реле времени 15 и ПУ. Первые входы элементов ИЛИ 10, 13, 16, 19, 23, 25 соединены с блоком 27 начальной установки триггеров.

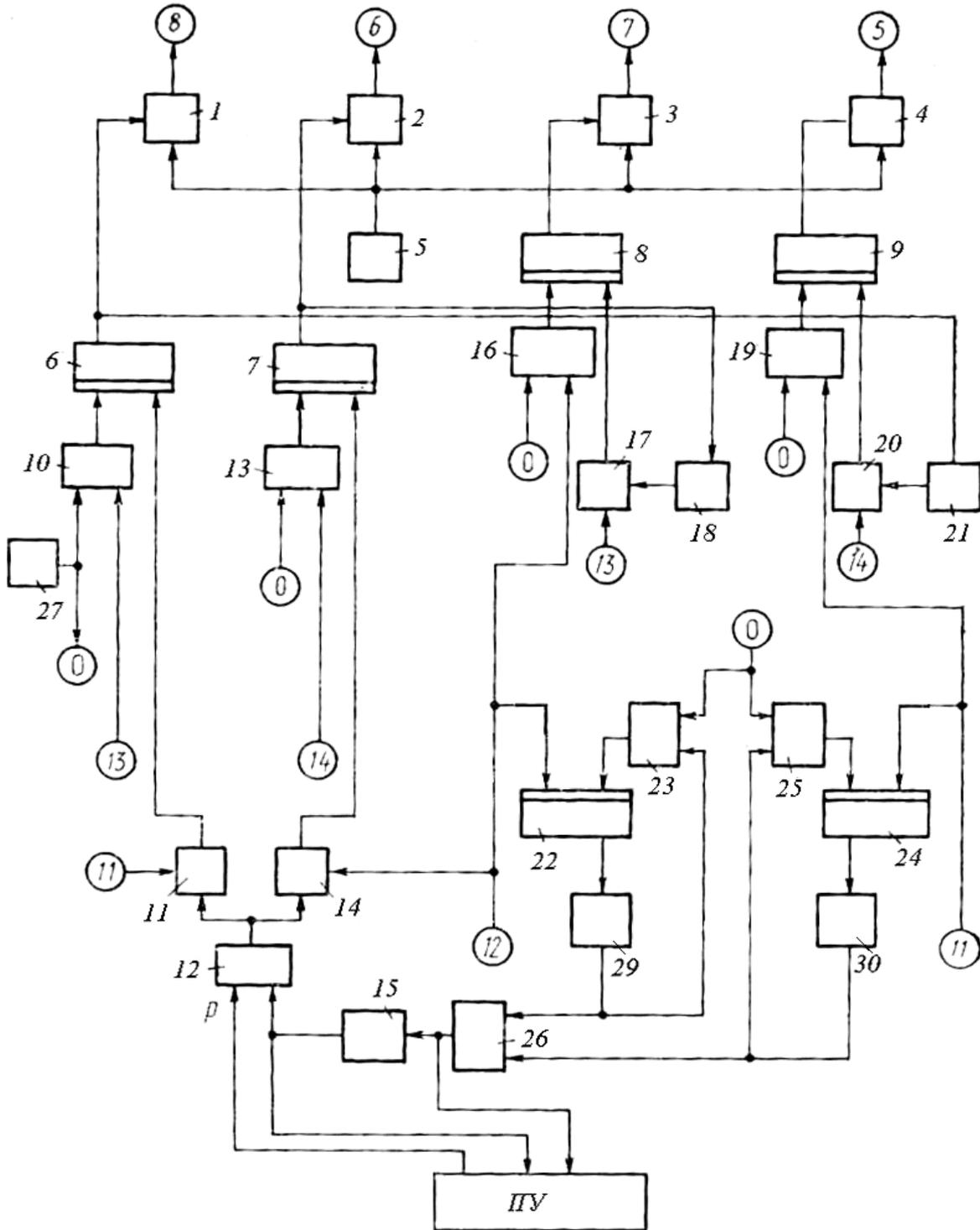


Рисунок 6.13. – Блок-схема циклового автомата

Станок работает следующим образом. После включения схемы триггеры 6–9, 22, 24 (см. рисунок 6.13) устанавливаются в исходное состояние сигналом с блока 27 начальной установки через соответствующие элементы ИЛИ. При нажатии кнопки «Пуск» на первый вход элемента ИЛИ 22 поступает управляющий сигнал «Р», который после прохождения через открытый по первому входу сигналом от конечного выключателя 31 элемент И 11 поступает на второй вход триггера 6. На его выходе устанавливается сигнал, открывающий ключ 1, который соединяет с блоком питания 5 электромагниты 7 и 16 реверсивных золотников 6 и 12. Электромагниты перемещают плунжеры золотников, и поток масла из гидростанции 5 поступает в гидроцилиндры 4 и 10.

Гидроцилиндр 4 сообщает движение  $П_4$  (на рисунке 6.10 – влево) позиционирования продольному столу 1, а гидроцилиндр 10 выводит свою ползушку в исходное положение. При набегании упора 36 на конечный выключатель 32 на последнем появляется сигнал, который поступает через элемент ИЛИ 10 на первый вход триггера 6 и на первый вход элемента И 17. Сигнал на выходе триггера 6 сбрасывается и ключ 1 отключает электромагниты 7 и 16. Одновременно сигнал, поступивший на первый вход элемента И 17, открытого по второму входу сигналом с выхода элемента НЕ 18, поступает на второй вход триггера 8, устанавливая на его выходе сигнал, открывающий ключ 3. Этот ключ соединяет с блоком питания электромагнит 13 реверсивного золотника 11, который обеспечивает поток масла из гидростанции 5 в рабочую полость гидроцилиндра 9 подачи врезания. В итоге продольный стол 1 в движении  $П_4$  переключается с позиционирования на врезание.

Одновременно сигнал с конечного выключателя 32 через ПУ включает электродвигатель  $M_1$  привода поступательно-возвратного движения  $П_1$  шпинделя долбяка и открывает через элемент ИЛИ 18 элемент И 8, а через элемент ИЛИ 19 – ключ 17 (см. рисунок 6.12). В результате задающий сигнал с импульсного измерительного преобразователя 28 поступает на вход делителя частоты 7, где происходит его деление в соответствии с заданным значением. С выхода этого делителя сигнал через открытый по управляющему входу элемент И 8 поступает в импульсно-аналоговый преобразователь 9, где происходит его преобразование в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода этого преобразователя аналоговый сигнал через первый вход – выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 и открытый по одному из управляющих входов ключ 17 сообщается электродвигателю  $M_2$  привода делительного стола 2. В итоге на этапе врезания этот стол получает вращательное движение  $B_3$ , согласованное с движением  $П_4$  продольного стола 1.

Этап врезания продолжается до набегания упора 37 на конечный выключатель 33. Сигнал, появившийся на этом выключателе, поступает на первый вход элемента И 14 и через элемент ИЛИ 16 на первый вход триггера 8. На выходе этого триггера сигнал сбрасывается, ключ 3 отключает электромагнит 13 реверсивного золотника 11 и продольный стол останавливается. Одновременно снимается сигнал с управляющего входа элемента И 8 ведомой координаты. Сигнал с конечного выключателя 33 открывает элемент И 2 ведущей координаты (см. рисунок 6.11), элементы И 4 и через элемент ИЛИ 19 ключ 17 ведомой координаты. Одновременно этот сигнал поступает на второй вход триггера 22, устанавливая на его выходе сигнал, который включает счетчик зубьев 39. В результате таких переключений схемы начинается этап профилирования колеса.

Задающий сигнал с импульсного измерительного преобразователя 27, установленного на шпинделе, поступает через элемент И 2 на делитель или умножитель частоты формирователя сигнала управления ведомой координаты, где происходит его деление или умножение в соответствии с передаточным отношением станочного зацепления шпиндель – заготовка. Результирующий сигнал через открытый по управляющему входу элемент И 4 поступает на вход импульсно-аналогового преобразователя 9. Аналоговый сигнал, пропорциональный частоте входного сигнала, с выхода этого преобразователя через первый вход – выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 и открытый по управляющему входу ключ 17 поступает на вход электродвигателя  $M_2$  делительного стола 2.

Одновременно следующим образом происходит устранение девиации механики привода делительного стола посредством двухсторонней коррекции сигнала на выходе параллельного сумматора 10. На первые входы фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов непрерывно поступает задающий сигнал с выхода делителя или умножителя частоты, а на вторые входы этих дискриминаторов через элементы ИЛИ 11 и И 12 поступает сигнал – аналог мгновенного значения действительной круговой подачи делительного стола. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора 5 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 15 поступает на аналоговые входы элементов И 13 и 14. Одновременно на выходе знакового дискриминатора 6 непрерывно образуется отрицательный потенциал при отставании делительного стола от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот потенциал поступает на потенциальные входы элементов И 13 и 14 и открывает один из них. При открывании элемента И 13 сигнал с его выхода поступает на второй вход

сложения параллельного сумматора *10*, а при открывании элемента *И 14* сигнал с его выхода поступает на вход вычитания этого сумматора. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре происходит увеличение или уменьшение задающего сигнала, действующего на его первом входе, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая адаптация относительно заданного номинального значения.

Этап профилирования продолжается в течение одного оборота делительного стола *2* после прекращения врезания. За время выполнения этапа устанавливается очередная заготовка на делительном столе *3*. По выполнении делительным столом одного оборота, что соответствует окончанию профилирования, на выходе счетчика зубьев *29* появляется сигнал, который через элемент *ИЛИ 26* поступает в ПУ, обеспечивающий прекращение движения  $P_1$  шпинделя и вывод его в крайнее верхнее положение, включает реле времени *15* и через элемент *ИЛИ 23* поступает на первый вход триггера *22*. На его выходе сигнал сбрасывается, и счетчик зубьев *29* отключается.

Реле времени *15* задерживает начало повторения цикла обработки на другом делительном столе из исходного положения, соответствующего наличию сигнала на конечном выключателе *33*, на время, необходимое для вывода шпинделя в верхнее положение.

По окончании паузы на выходе реле времени появляется сигнал, который поступает через элементы *ИЛИ 12* и *И 14* на второй вход триггера *7*, устанавливая на его выходе сигнал, открывающий ключ *2*. Этот ключ соединяет с блоком питания электромагниты *8* и *14* реверсивных золотников. Плунжеры этих золотников перемещаются, и поток масла поступает в гидроцилиндры *4* и *9*. Гидроцилиндр *4* сообщает движение позиционирования  $P_4$  (на рисунке 6.10 – вправо) продольному столу *1*, а гидроцилиндр *9* выводит ползушку в исходное для врезания положение. При набегании упора *38* на конечный выключатель *34* на нем появляется сигнал, который через элемент *ИЛИ 13* поступает на первый вход триггера *7* и на первый вход элемента *И 20*, открытого по второму входу сигналом с элемента *НЕ 21*. На выходе триггера *7* сигнал сбрасывается, ключ *2* отключает электромагниты *8* и *14*, и поток масла в гидроцилиндры *4* и *9* перекрывается. С выхода элемента *И 20* сигнал поступает на второй вход триггера *9*, устанавливая на его выходе сигнал, включающий посредством ключа *4* реверсивный золотник *12*, открывающий поток масла в гидроцилиндр *10* подачи врезания. В итоге продольный стол *1* переключается с позиционирования на подачу врезания. Одновременно сигнал с конечного выключателя *34* перестраивает структуру схемы управления, по командам которой через ПУ включаются привод движения  $P_1$  шпинделя, электродвигатель  $M_3$  движения  $B_3$  делительного стола *3* и реверсируется электродвигатель  $M_4$  круговой подачи шпинделя долбяка.

Последующая работа станка на этапах врезания и профилирования заготовки на делительном столе 3 осуществляется так же, как при обработке заготовки на делительном столе 2. Однако продолжительность этапа врезания будет ограничиваться набеганием упора 35 на конечный выключатель 31, а один оборот делительного стола 3 будет отсчитываться счетчиком зубьев 30, включаемым сигналом с конечного выключателя 31 через триггер 24. После обработки заготовки на делительном столе 3 сигнал с выхода реле времени 15 перестраивает схему управления для обработки очередной заготовки на столе 2 и т.д.

Таким образом, последовательная обработка двух заготовок обеспечивает сокращение времени обработки за счет совмещения установки на рабочей позиции каждой последующей заготовки с обработкой предшествующей. По условиям взаимодействия долбяка и заготовок автоматически изменяется направление круговой подачи при обработке каждой последующей заготовки, что обеспечивает повышение периода размерной стойкости инструмента посредством обеспечения равномерного износа его входной и выходной режущих кромок.

### **6.7 Зубодолбежный станок со спиральным врезанием для многопроходной обработки зубчатых колес**

Рассмотрим реализацию способа многопроходного зубодолбления со спиральным врезанием, рассмотренного выше (см. рисунок 6.3) в кинематической структуре станка [21]. Кинематическая структура станка (рисунок 6.14) унифицирована со структурой выпускаемых зубодолбежных станков с механическими связями.

Кинематическая структура станка содержит следующие кинематические группы: скорости воспроизведения линии зуба (скорости резания)  $\Phi_v \uparrow (П_1)$ , скорости воспроизведения профиля зубьев (круговой подачи)  $\Phi_s (B_2 B_3)$ , радиального врезания  $Vp (П_4)$  и группу  $Пз \uparrow (П_5)$  радиального отвода – подвода долбяка к заготовке, функционирующую синхронно с группой скорости резания. Данные кинематические группы, традиционные для зубодолбежных станков, подробно рассмотрены при анализе типовой структуры зубодолбежного станка (см. рисунок 6.4).

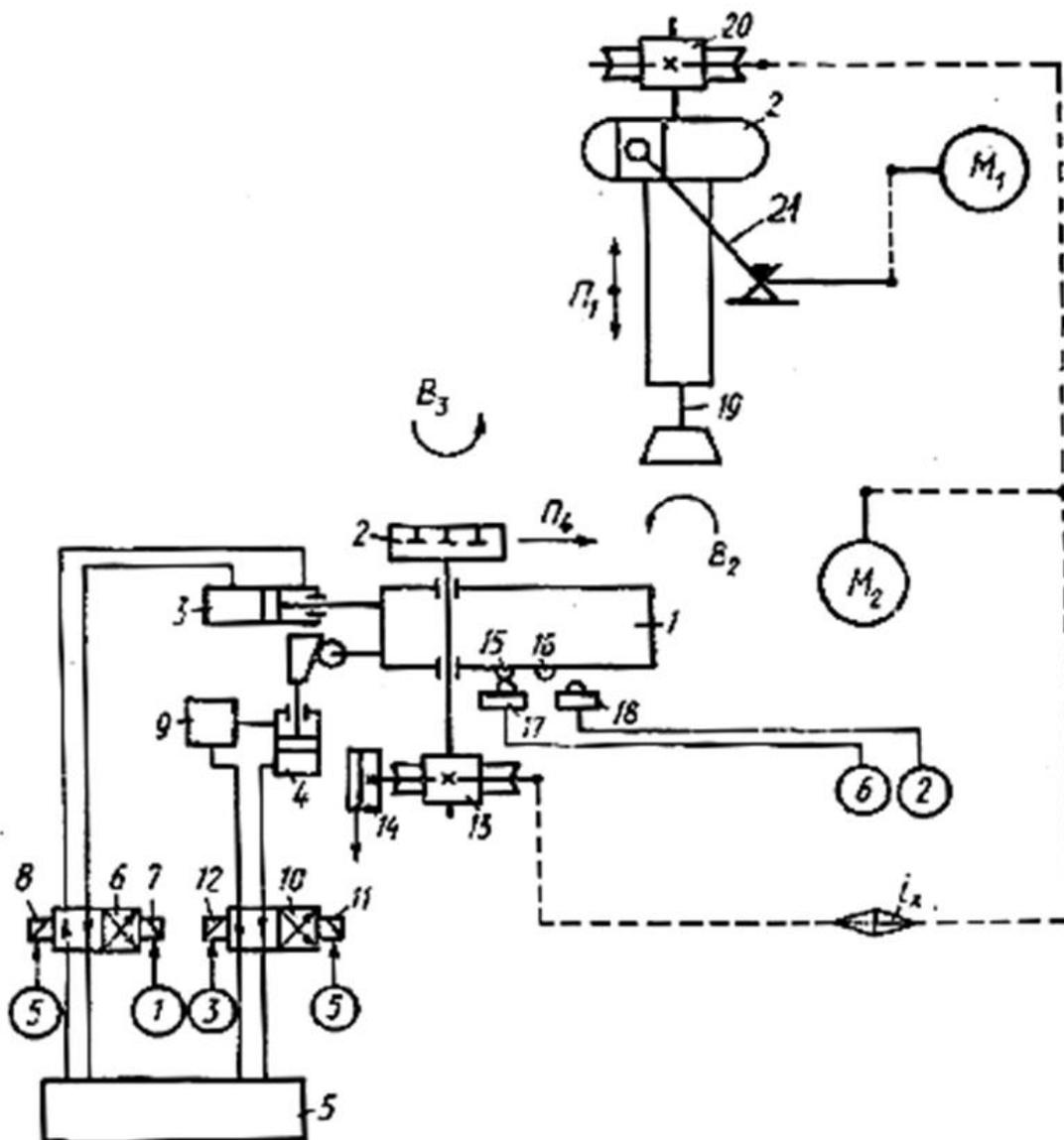


Рисунок 6.14. – Кинематическая структура станка

Продольный стол 1, несущий делительный стол 2, оснащен гидроцилиндрами ускоренного перемещения 3 и врезания 4. Гидроцилиндр ускоренного перемещения 3 соединен с гидростанцией 5 посредством реверсивного золотника 6, управляемого электромагнитами 7 и 8, а гидроцилиндр врезания 4 – посредством регулятора (регулируемого дросселя) 9, предназначенного для задания подачи радиального врезания, и реверсивного золотника 10, управляемого электромагнитами 11 и 12. На делительной паре 13 делительного стола установлен счетчик 14 числа зубьев, служащий для отсчета одного оборота делительного стола.

На продольном столе установлены упоры 15 и 16, контактирующие с путевыми переключателями 17 и 18. Первый путевой переключатель соответствует исходному положению продольного стола, второй – началу движе-

ния врезания. Станочное зацепление делительный стол 2 – шпиндель 19 долбяка воспроизводится традиционной группой обката, содержащей во внутренней связи делительную пару 13, гитару сменных зубчатых колес  $i_x$  и делительную пару 20. Источником энергии в этой группе является регулируемый электродвигатель  $M_2$ .

Привод поступательно-возвратного движения шпинделя 19 осуществляется кулисным механизмом 21, кинематически связанным с регулируемым электродвигателем  $M_1$ .

Электромагниты 7 и 8 реверсивного золотника 6 соединены с выходами ключей 1 и 2 (рисунок 6.15), а электромагниты 11 и 12 реверсивного золотника 10 – с выходами ключей 2 и 3.

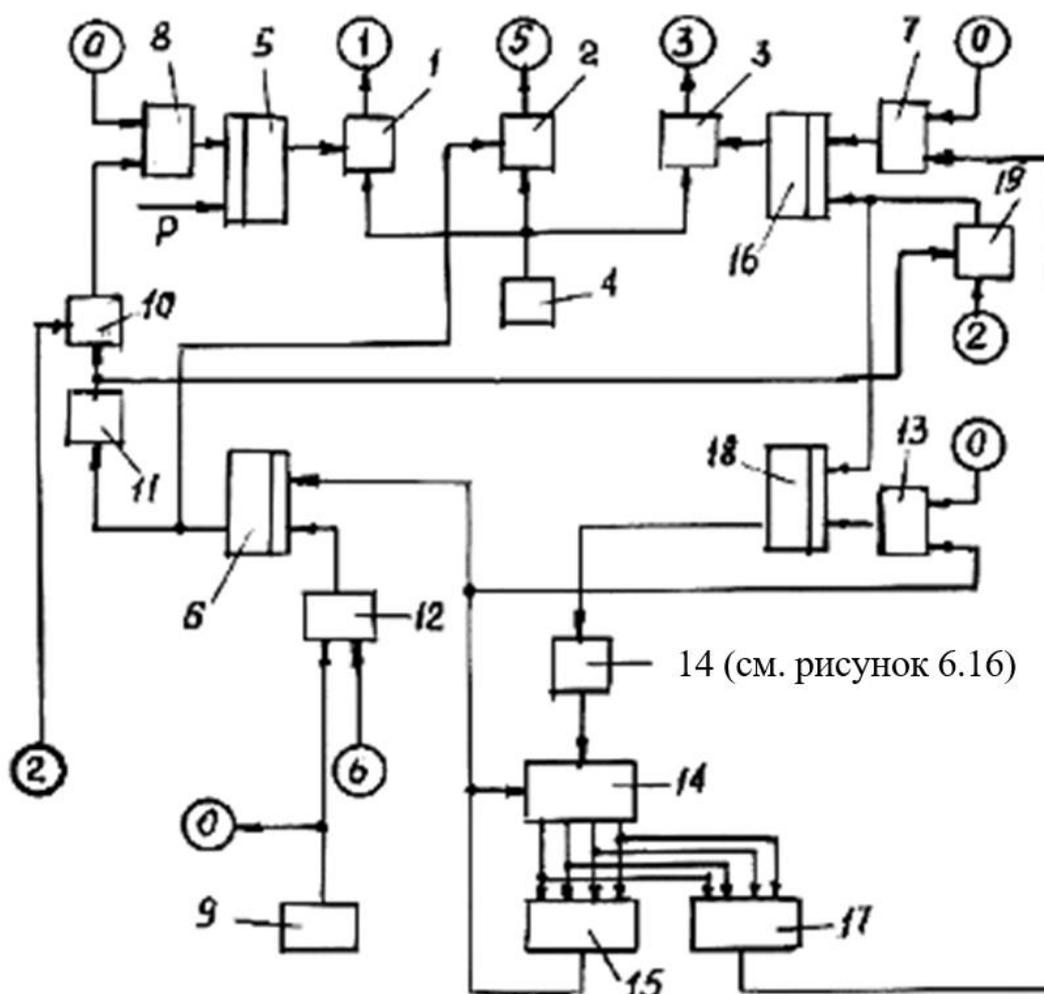


Рисунок 6.15. – Блок-схема циклового автомата

Аналоговые входы ключей 1, 2, 3 объединены и соединены с источником питания 4, а управляющие входы – с выходами триггеров 5, 6, 16.

Первый вход триггера 5 соединен с выходом элемента ИЛИ 8, соединенного первым входом с блоком 9 начальной установки триггеров, а вторым

входом – с выходом элемента *И 10*, у которого первый вход соединен с путевым переключателем *18*, а второй вход через элемент *НЕ 11* – с выходом триггера *б*.

Второй вход триггера *5* используется для включения рабочего цикла. Первый вход триггера *б* соединен с выходом элемента *ИЛИ 12*, соединенного первым входом с блоком *9* начальной установки триггеров, а вторым входом – с путевым переключателем *17*. Второй вход триггера *б* объединен с первым входом элемента *ИЛИ 13*, с входом «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика *14* и соединен с выходом блока задания общего количества проходов *15*. Первый вход триггера *16* соединен с выходом элемента *ИЛИ 7*, соединенного первым входом с блоком *9* начальной установки триггеров, а вторым входом – с выходом блока задания количества черновых проходов *17*. Вторые входы триггеров *16* и *18* объединены и соединены с выходом элемента *И 19*, у которого первый вход соединен с путевым переключателем *18*, а второй вход – с выходом элемента *НЕ 11*. Первый вход триггера *18* соединен с выходом элемента *ИЛИ 13*, а выход этого триггера – с входом счетчика числа зубьев *14*. Выход этого счетчика соединен с входом двоичного 4-разрядного счетчика, выходы которого соединены соответствующими входами блоков задания количества проходов *15* и *17*. Блоки задания количества проходов *15* и *17* содержат диодно-резисторный 4-входовый конъюнктор на диодах *1, 2, 3, 4* (рисунок 6.16), выходы которых объединены и соединены через резистор *5* с источником питания.

Входы конъюнктора через ключи *6, 7, 8, 9* соединены с соответствующими входами двоичного 4-разрядного счетчика *14*. Управляющие входы ключей *6, 7, 8, 9* используются для набора кода количества проходов. К выходу 4-входового конъюнктора подключен вход одноустойчивого мультивибратора *10*.

Выходы  $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$  двоичного 4-разрядного счетчика имеют веса  $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ . Следовательно, на входах конъюнктора возможны состояния счетчика от 0000 до 1111, то есть от 0 до 15. Первое состояние соответствует исходному положению схемы или отсутствию сигнала на входе счетчика, последнее – 15-му импульсу на входе. Таким образом, возможный максимальный цикл проходов равен 15. Каждый проход соответствует одному обороту делительного стола станка.

При наладке станка для получения на выходе 4-входового конъюнктора сигнала о конкретном числе проходов посредством ключей *6, 7, 8, 9* необходимо отключить от диодов *1, 2, 3, 4* те выходы двоичного 4-разрядного счетчика *14*, состояние которых равно нулю в двоичной записи числа входных

импульсов. В этом случае одноустойчивый мультивибратор 10 срабатывает и выдает на выходе импульс, соответствующий количеству выполненных проходов.

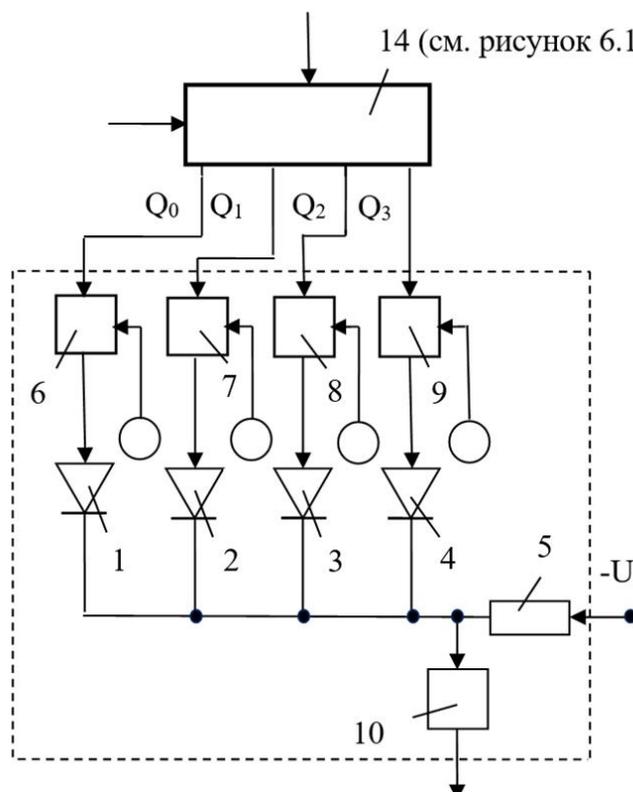


Рисунок 6.16. – Схема блока задания количества проходов

Нормируемыми параметрами обработки являются скорость резания (движение  $П_1$ ) и круговая подача долбяка (движение  $B_2$ ). При наладке станка данные параметры обработки устанавливаются посредством регуляторов круговой частоты электродвигателей  $M_1$  и  $M_2$  соответственно.

Функциональная связь между элементарными движениями в группе обката  $\Phi_5(B_2B_3)$  устанавливается посредством гитары сменных зубчатых колес  $i_x$ . Вывод ФН для этого органа настройки подробно рассмотрен при анализе типовой структурной схемы зубодолбежного станка. Радиальная подача определяется на основе ее функциональной связи с круговой подачей. Эта связь подробно рассмотрена выше при анализе способа зубодолбления со спиральной подачей (см. рисунок 6.3).

Цикл работы станка осуществляется после подачи на второй вход триггера 5 управляющего сигнала  $P$  (см. рисунок 6.15). На выходе триггера устанавливается сигнал, открывающий ключ 1, который посредством электромагнита 7 перемещает из нейтрального положения плунжер реверсивного золотника 6.

Поток масла, поступающий из гидростанции 5 через золотник 6 в полость цилиндра 3, обеспечивает ускоренное перемещение  $П_4$  продольного стола 1 в точку, соответствующую началу цикла.

При набегании упора 16 на путевой переключатель 18, на выходе которого появляется сигнал, поступающий на первый вход элемента И 10, открытого по второму входу. На выходе этого элемента появляется сигнал, который, поступая на первый вход триггера 5, сбрасывает с его выхода сигнал, и ключ 1 отключает электромагнит реверсивного золотника, управляющего ускоренным перемещением  $П_4$  продольного стола 1. Сигнал с путевого переключателя 18 включает также привод поступательно-возвратного движения  $П_1$  шпинделя 19 долбяка и электродвигатель  $М_2$  группы обката, обеспечивающей согласованные движения  $В_2$  долбяка и  $В_3$  делительного стола с круговой подачей, соответствующей черновым проходам. Одновременно сигнал с путевого переключателя 18 через элемент И 19, открытый по второму входу, поступает на вторые входы триггеров 16 и 18. Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 16, открывает ключ 3, который посредством электромагнита 12 перемещает плунжер реверсивного золотника 10. Поток масла через золотник поступает в полость гидроцилиндра 4 врезания, сообщающего продольному столу 1 подачу врезания в движении  $П_4$ . Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 18, включает счетчик 14 числа зубьев. В итоге указанного воздействия на схему сигнала с путевого переключателя 18 движениями  $П_1$ ,  $П_4$  и  $В_2В_3$  осуществляются черновые проходы.

После каждого чернового прохода, соответствующего одному обороту делительного стола 2, на выходе счетчика 14 (см. рисунок 6.10) числа зубьев появляется сигнал, поступающий на вход двоичного 4-разрядного счетчика 14. После выполнения заданного на блоке 17 количества черновых проходов на выходе последнего появляется сигнал, поступающий на первый вход триггера 16. Сигнал с выхода триггера сбрасывается, ключ 3 отключает электромагнит 12 золотника 10 и движение врезания прекращается. Одновременно электродвигатель  $М_2$  переключается на другую круговую частоту, соответствующую круговой подаче чистового прохода.

После прекращения движения врезания в течение одного оборота делительного стола выполняется чистовой проход. Окончание его соответствует появлению на счетчике 14 очередного импульса, который поступает на вход двоичного 4-разрядного счетчика. В итоге на выходе блока 15 задания общего количества проходов появляется сигнал, который отключает приводы движений  $П_1$  и  $В_2В_3$  и одновременно поступает на вход «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика 14, на первый вход триггера 18 и на второй вход триггера

гера 6. На выходе триггера 18 сигнал сбрасывается, и счетчик 14 отключается. Одновременно на выходе триггера 6 устанавливается сигнал, включающий ключ 2. Электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10 срабатывают, и изменяется направление потока масла в гидроцилиндрах 3 и 4. Продольный стол 1 под воздействием гидроцилиндра 3 ускоренно перемещается в исходное положение. Одновременно ползушка гидроцилиндра 4 также перемещается в исходное положение. В исходном положении продольного стола упор 15 набегаёт на путевой переключатель 17. Сигнал с его выхода поступает на первый вход триггера 6, сбрасывая сигнал с его выхода. Ключ 2 обесточивает электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10, и продольный стол 1 фиксируется в исходном положении. После смены заготовки цикл обработки повторяется.

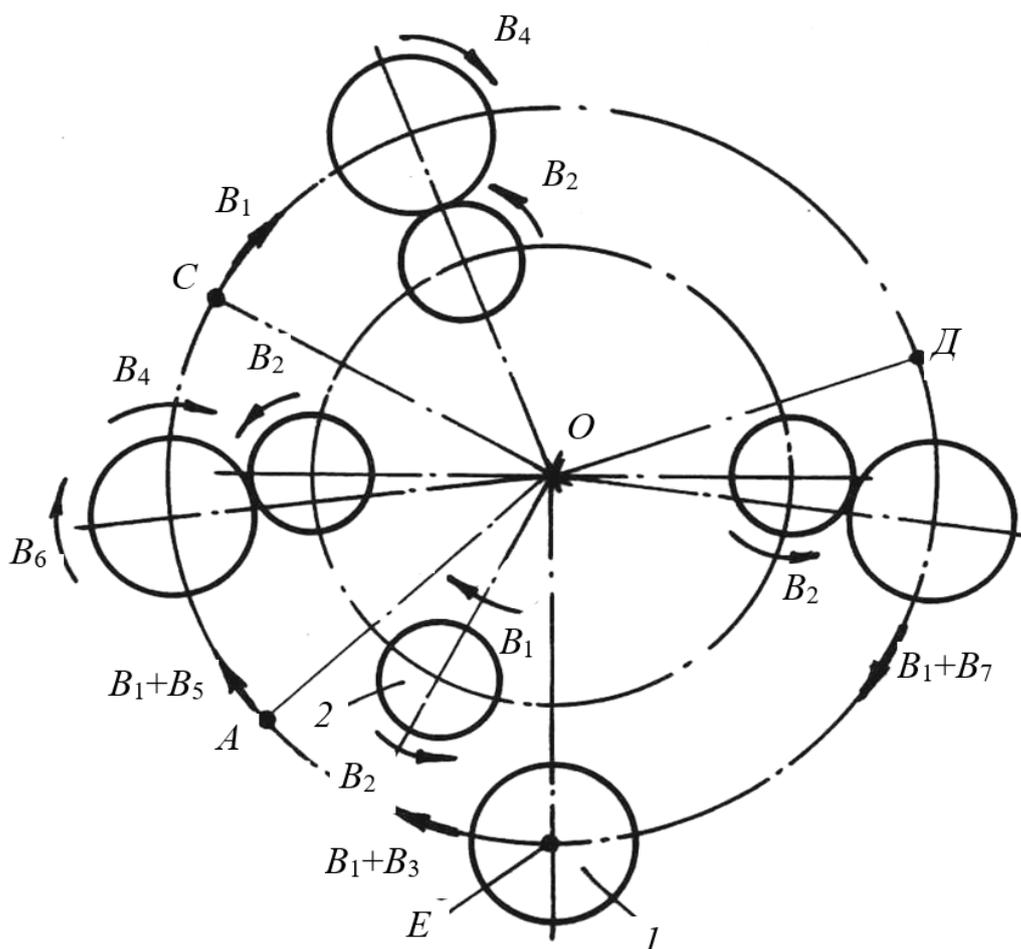
При необходимости разделить общее количество проходов на черновые, получистовые и чистовые, в схему системы управления циклом вводится дополнительный блок задания количества проходов, ключами которого устанавливается количество получистовых проходов. Дополнительный блок присоединяется входами к соответствующим выходам двоичного 4-разрядного счетчика параллельно входам блоков 15 и 17, задающих количество проходов. Сигнал с выхода дополнительного блока используется для переключения электродвигателя группы обката на получистовую круговую подачу и соответствующего изменения подачи радиального врезания.

## **6.8 Роторный зубодолбежный станок с гибридными кинематическими группами**

Способ зубодолбления при касательном движении врезания (см. рисунок 6.2) является первообразным для способа зубодолбления по роторной схеме [25], совмещающий обработку с транспортированием. Обработка заготовки 1 долбяком 2 по роторной схеме (рисунок 6.17) осуществляется при их перемещении по концентрическим окружностям с общим центром  $O$ .

В течение цикла обработки долбяк 2, совершающий движение  $\Pi_1$  скорости резания и движение отвода – подвода  $\Pi_6$ , синхронизированное с движением  $\Pi_1$  (на рисунке 6.17 эти движения не показаны), перемещаются относительно центра  $O$  с постоянной угловой скоростью движения транспортирования  $V_1$  и вращается вокруг собственного центра с угловой скоростью  $V_2$

круговой подачи. Угловая скорость заготовки  $I$  относительно центра  $O$  имеет различные значения. В начальный момент цикла после установки заготовки  $I$  в положение  $E$  ей сообщают движение позиционирования  $B_1+B_3$ , превышающее угловую скорость  $B_1$  транспортирования долбяка на величину угловой скорости  $B_3$  позиционирования. В результате на участке позиционирования  $EA$  заготовка догоняет долбяк с угловой скоростью позиционирования  $B_3$ .



**Рисунок 6.17. – Способ зубодолбления при непрерывном транспортировании пары долбяк – заготовка**

На участке касательного врезания  $AC$  заготовке сообщают движение  $B_4$ , согласованное с движением  $B_2$  долбяка (согласованные движения  $B_2$  долбяка и  $B_4$  заготовки образуют движение обката  $B_2B_4$ ), движение касательного врезания  $B_1+B_5$ , превышающее угловую скорость  $B_1$  транспортирования долбяка на угловую скорость подачи касательного врезания  $B_5$  (движение  $B_5$  является аналогом прямолинейного движения подачи касательного врезания в первообразном способе по рисунку 6.1) и согласованное с движением  $B_5$  дополнительное движение  $B_6$ . Врезание на высоту зуба заканчивается в позиции  $C$ , где движения  $B_5$  и  $B_6$  прекращаются.

На участке  $CD$  заготовка и долбяк относительно центра  $O$  перемещаются с одинаковыми угловыми скоростями транспортирования  $V_1$ . На этом участке осуществляют профилирование заготовки движением обката  $V_2V_4$ , которое продолжается в течение одного поворота заготовки вокруг собственного центра. Профилирование заканчивается в позиции  $D$ . Здесь долбяк выводят в крайнее верхнее положение в движении  $П_1$ , движение  $V_4$  заготовки прекращают и одновременно ей сообщают движение  $V_1+V_3$ , превышающее угловую скорость транспортирования  $V_1$  долбяка относительно центра  $O$  на угловую скорость позиционирования  $V_3$ . В итоге на участке  $DE$  заготовка уходит от долбяка, и при достижении позиции загрузки-выгрузки  $E$  останавливается, где производят замену обработанного колеса новой заготовкой. За время смены заготовки долбяк в движении  $V_1$  проходит позицию  $E$  и обгоняет заготовку. Затем цикл обработки повторяется.

Рассмотренный способ позволяет одновременно обрабатывать несколько заготовок за счет последовательного перемещения по концентрическим окружностям относительно центра  $O$  нескольких пар долбяк – заготовка. Допустим, например, что приведенная на рисунке 6.17 схема является мгновенным положением четырех пар долбяк – заготовка. Тогда можно утверждать, что на позиции  $E$  устанавливается очередная заготовка, на участках  $AC$  и  $CD$  две заготовки проходят зону обработки, а на участке  $DE$  еще одна заготовка после окончания ее обработки в позиции  $D$  перемещается в зону загрузки-выгрузки  $E$ . При увеличении диаметров концентрических окружностей, по которым совместно перемещаются пары долбяк – заготовка, количество таких пар может быть увеличено.

Данный способ при использовании одной пары долбяк – заготовка по производительности равнозначен первоначальному способу зубодолбления с касательным врезанием. Вместе с тем он сложнее, так как содержит в кинематической структуре дополнительную составляющую, осуществляющую транспортирование пары долбяк – заготовка. При использовании  $n$  пар данный способ представляет собой совокупность  $n$  способов, включающих по одной паре долбяк – заготовка, объединенных общей транспортирующей составляющей кинематической подсистемы. Увеличение производительности в  $n$  раз в этом случае обеспечивается за счет объединения  $n$  одинаковых способов, а следовательно, и зубодолбежных станков с касательным (дуговым) врезанием в одном объекте (на общем роторе, несущем  $n$  одинаковых зубодолбежных станков).

Способ зубодолбления при непрерывном транспортировании  $n$  пар долбяк – заготовка создает условия для последовательно-параллельной об-

работки зубчатых колес. Это обстоятельство обеспечивает некоторое увеличение производительности обработки по сравнению с  $n$  отдельных одинаковых зубодолбежных станков. При этом увеличение производительности будет тем выше, чем больше на общем роторе одинаковых станков.

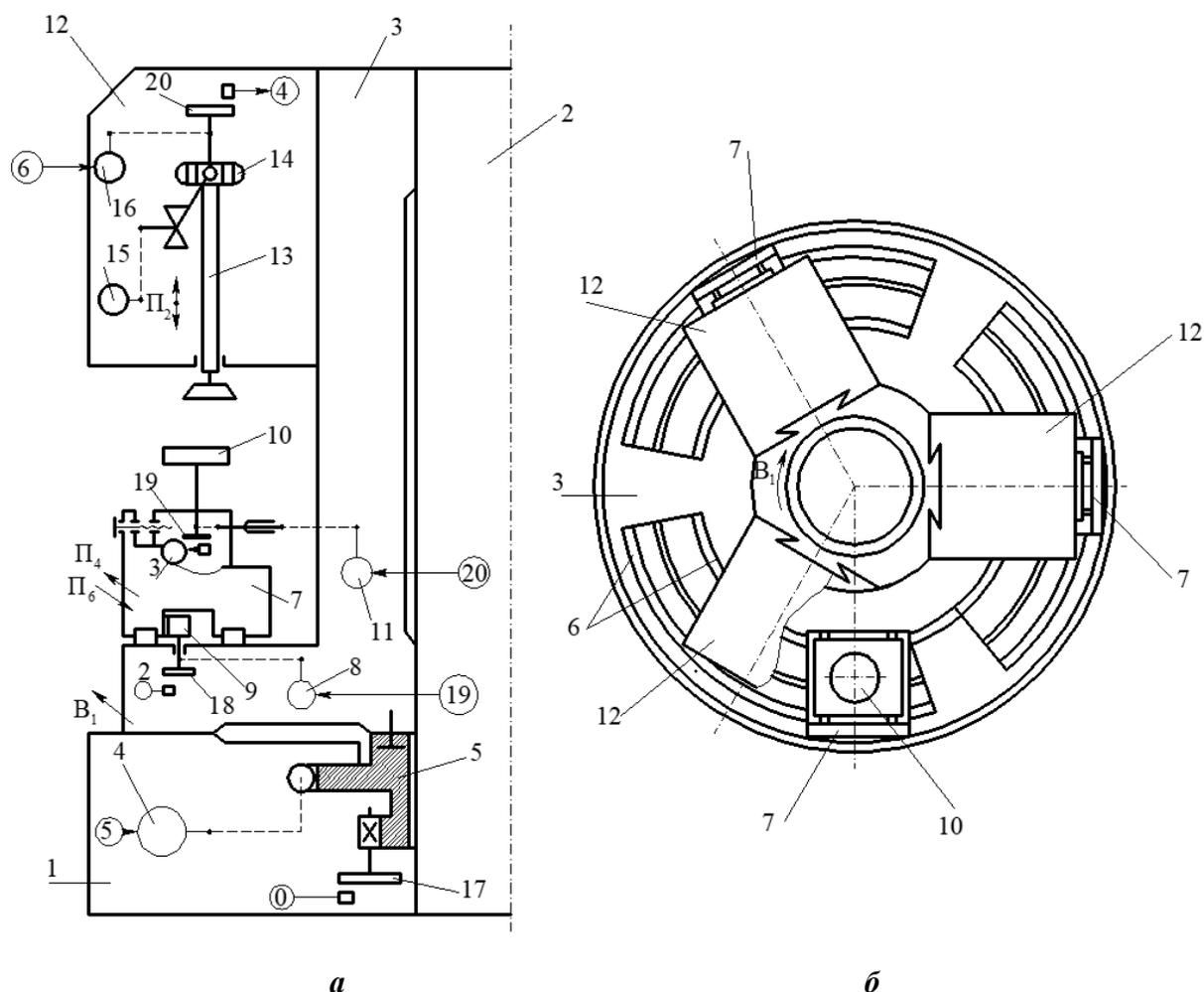
Рассмотрим возможный вариант реализации данного способа в кинематико-компоновочной схеме роторного зубодолбежного станка. В станках такого типа нерационально использовать развитые кинематические цепи между исполнительными органами, так как это ведет к существенному усложнению его механики, увеличению металлоемкости и трудоемкости изготовления, снижению ремонтпригодности. Поэтому в соответствии с современной тенденцией в области станкостроения в станках роторного типа представляется целесообразной замена кинематических связей между исполнительными органами электронными связями между электродвигателями их приводов и использование программируемых контроллеров для управления.

На рисунке 6.18 представлена кинематико-компоновочная схема одного из  $n$ -го количества одинаковых зубодолбежных станков с касательным врезанием, составляющих роторный зубодолбежный станок, у которого каждый исполнительный орган оснащен отдельным электродвигателем [30].

На станине 1 установлен с возможностью вращения относительно колонны 2 ротор 3. Привод вращения ротора осуществляется регулируемым электродвигателем 4 через червячную передачу 5. На основании ротора 3 равномерно по окружности с возможностью движения по направляющим 6 размещены круговые столы 7. Привод каждого кругового стола 7 осуществляется от отдельного регулируемого электродвигателя 8 через зубчато-реечную передачу 9. На каждом круговом столе 7 смонтирован делительный стол 10, получающий круговую подачу от кинематически связанного с ним регулируемого электродвигателя 11. В верхней части ротора 3 установлены инструментальные суппорты 12 в количестве, равном количеству делительных столов. В каждом суппорте 12 смонтирован шпиндель 13, несущий стандартный долбяк. Привод поступательно-возвратного движения шпинделя осуществляется кулисным механизмом 14, кинематически связанным с электродвигателем 15. Приводы круговых подач шпинделей осуществляются от регулируемых электродвигателей 16.

На делительных передачах исполнительных органов (роторе, круговых и делительных столах и шпинделях) установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно 17, 18, 19, 20, предназначенные для преобразования круговых частот вращения исполнительных органов в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему отслеживающей синхронизации их приводов.

Система отслеживающей синхронизации выполнена по схеме ведущая – ведомая координаты. Ведущими координатами являются шпиндели 13 и круговые столы 7.



*a* – кинематико-компоновочная схема; *б* – вид в плане при  $n = 3$ .

**Рисунок 6.18. – Роторный зубодолбежный станок**

На рисунке 6.19 представлен один канал блок-схемы формирования сигналов управления круговыми подачами ротора и ведущих координат (круговых столов и шпинделей). Причем формирование сигнала управления круговой подачи шпинделя осуществляется по схеме с автоматической двухсторонней коррекцией погрешностей его привода по сигналу эталонного генератора [27].

Задатчиком для электродвигателя привода круговой подачи шпинделя является делитель частоты 1, соединенный своим входом с эталонным генератором 2, а выходом через импульсно-аналоговый преобразователь 3, элемент И 4, первый положительный вход-выход параллельного сумматора 5,

усилитель мощности 6 – с электродвигателем 16 привода вращения шпинделя 13 (см. рисунок 6.18) и с первыми входами фазового 7 и знакового 8 дискриминаторов. Вторые входы дискриминаторов соединены с выходом счетчика импульсов 9, вход которого соединен с импульсным измерительным преобразователем 20, установленным на шпинделе.

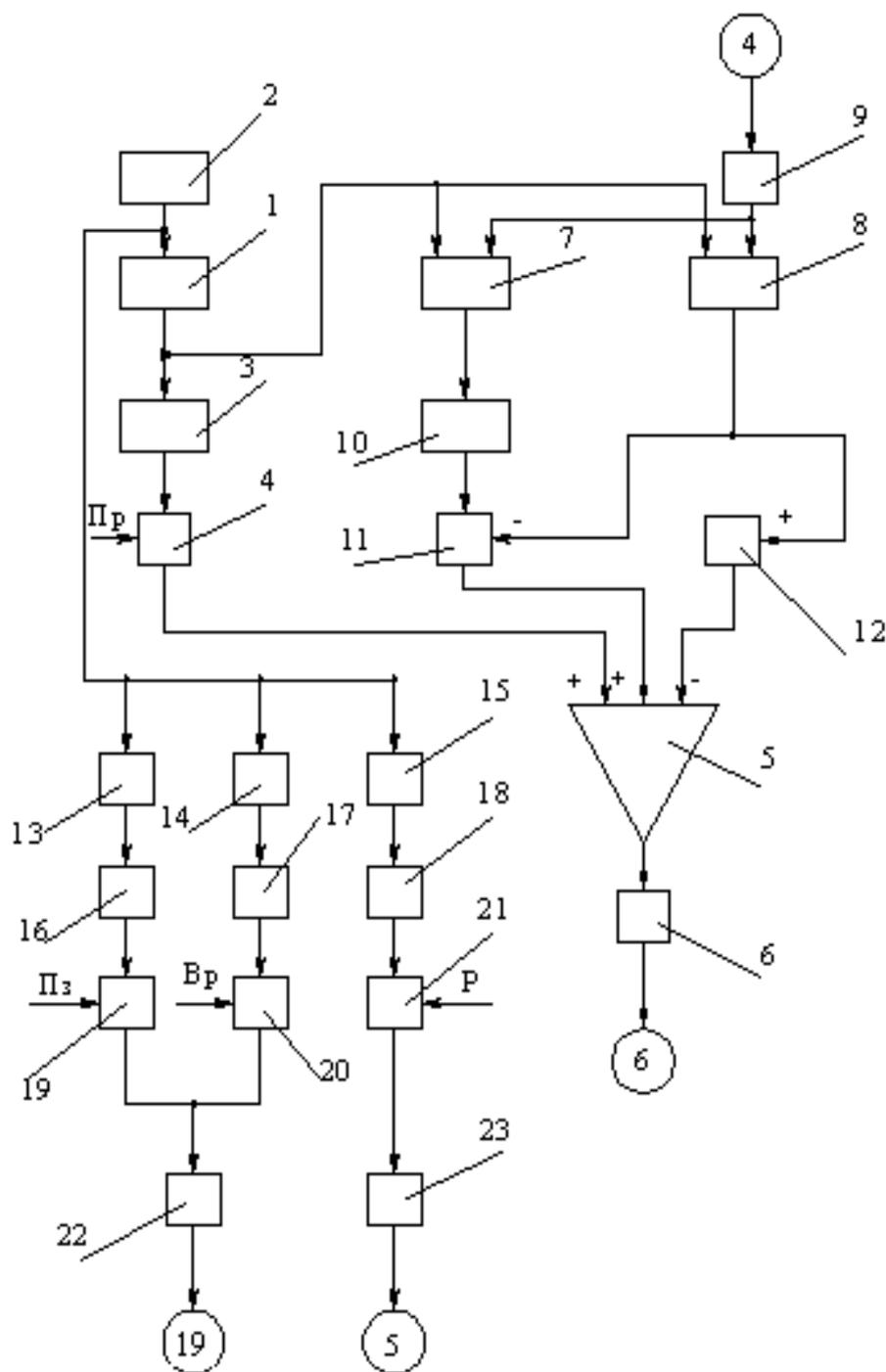


Рисунок 6.19. – Блок-схема формирователя сигналов управления шпинделей, круговых столов и ротора

Выход фазового дискриминатора 7 через импульсно-аналоговый преобразователь 10 соединен с аналоговыми входами ключей 11 и 12, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход знакового дискриминатора 8 соединен с потенциальными входами ключей 11 и 12, а выходы этих ключей соединены соответственно со вторым положительным и отрицательным входами параллельного сумматора 5.

Делитель частоты 1 состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента деления. Импульсный сигнал с выхода этого делителя преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 3 в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Это напряжение после усиления по мощности в усилителе мощности 6 запускает электродвигатель привода круговой подачи (вращения шпинделя). Одновременно следующим образом устраняется девиация механики этого привода. На первые входы дискриминаторов 7 и 8 непрерывно поступает задающий сигнал с делителя частоты 3, а на вторые входы этих дискриминаторов – импульсный сигнал с импульсного измерительного преобразователя 20, соответствующий мгновенному значению действительной круговой подачи. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора 7 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 10 поступает на аналоговые входы ключей 11 и 12.

Одновременно на выходе знакового дискриминатора 8 непрерывно образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный при опережении. Этот потенциал поступает на потенциальные входы ключей 11 и 12 и открывает один из них. При открывании ключа 11, управляемого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 5, а при открывании ключа 12, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора 5. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре 5 происходит увеличение или уменьшение задающего сигнала, действующего на его первом входе, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно номинального значения.

Формирование сигналов управления приводами круговых подач остальных  $n - 1$  шпинделей происходит аналогично. При этом общим задатчиком для схем формирования служит делитель частоты 1.

Задатчиками для приводов подач позиционирования и врезания круговых столов, а также для привода подачи ротора являются делители частоты

соответственно 13, 14, 15, имеющие такую же структуру, что и делитель частоты 1. Входы этих делителей частоты объединены и соединены с выходом эталонного генератора 2, а их выходы соединены с импульсно-аналоговыми преобразователями 16, 17, 18 соответственно. Выходы этих преобразователей соединены с входами аналоговых элементов И 19, 20, 21 соответственно. Выходы элементов И 20, 21 объединены и соединены с усилителем мощности 22, у которого выход соединен с электродвигателями круговых столов. Выход элемента И 19 связан с усилителем мощности 23, соединенного своим выходом с электродвигателем ротора. Таким образом, на входах элементов И 19, 20, 21 при включенном эталонном генераторе 2 постоянно действуют сигналы управления приводами соответствующих круговых столов и ротора.

Девиация приводов механики ротора и круговых столов при необходимости ее устранения осуществляется на основе сравнения задающих сигналов, постоянно функционирующих на выходах импульсно-аналоговых преобразователей 16, 17, 18 с сигналами – аналогами действительных подач, действующими на соответствующих импульсных измерительных преобразователях 17 и 18 (см. рисунок 6.18).

Схема сравнения и двухсторонней коррекции управляющих сигналов аналогична рассмотренной при описании решения такой же задачи при коррекции сигнала управления приводом круговой подачи шпинделя.

С точки зрения кинематической структуры блоки установки коэффициента деления в делителях частоты выполняют функцию органов настройки соответствующих подач.

Система формирования сигнала управления делительного стола на этапе врезания и на этапе профилирования нарезаемого колеса выполнена по схеме (рисунок 6.20), где делительный стол является ведомой координатой.

На этапе врезания шпиндель и круговой стол одновременно являются задающими координатами, а при профилировании задающей координатой служит шпиндель. При этом на этапе профилирования осуществляется двухсторонняя коррекция сигнала управления привода делительного стола (на схеме представлен один канал) по сигналу задающей координаты.

Задатчиками для электродвигателя привода ведомой координаты (делительного стола) на этапе врезания являются импульсные измерительные преобразователи 18 и 20, установленные на делительных передачах соответственно кругового стола 7 и шпинделя 13 (см. рисунок 6.17). Импульсный измерительный преобразователь 18 через соединенные последовательно делитель частоты 1, импульсно-аналоговый преобразователь 2 и элемент И 3,

управляемый аналоговым сигналом, соединен с первым входом сумматора 4. А импульсный измерительный преобразователь 20 соединен с входом ключа 5 (например, элемент 2И), имеющего два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого ключа соединен с входом делителя частоты 6, а другой выход – с входом умножителя частоты 7. Выходы делителя частоты 6 и умножителя частоты 7 объединены и соединены с входом элемента И 9, управляемого аналоговым сигналом, и с входом импульсно-аналогового преобразователя 8, соединенного своим выходом со вторым входом сумматора 4. Выход этого сумматора соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 10. Выход элемента И 9 соединен с первыми входами знакового 11 и фазового 12 дискриминаторов.

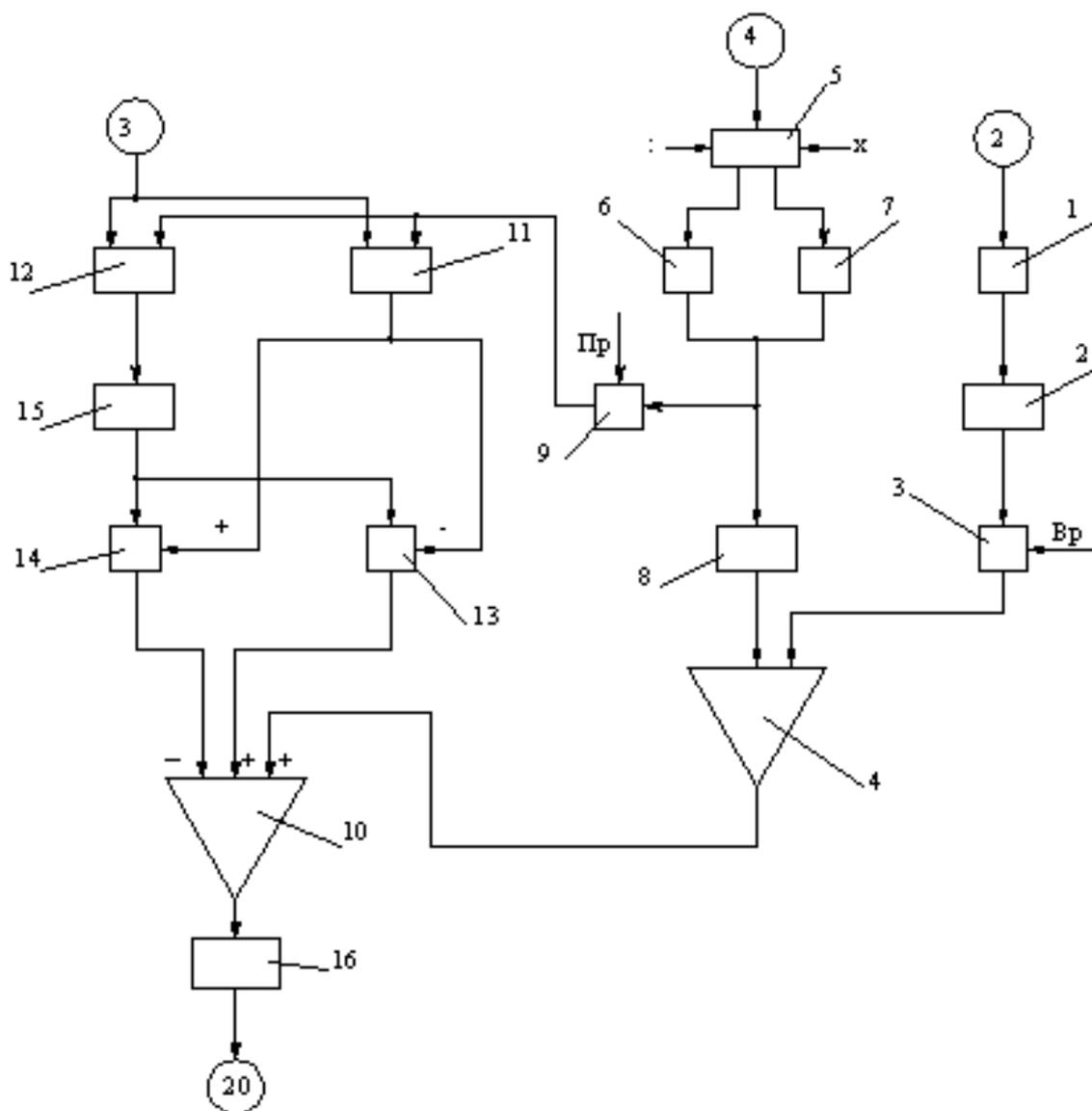


Рисунок 6.20. – Блок-схема формирователя сигнала управления делительного стола (ведомая координата)

Вторые входы этих дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 19, установленным на делительной передаче ведомой координаты. Выход знакового дискриминатора 11 соединен с потенциальными входами элементов И 13, 14, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход элемента И 13 соединен со вторым положительным входом параллельного сумматора 10, а выход элемента И 14 – с отрицательным входом этого сумматора. Выход фазового дискриминатора 12 через импульсно-аналоговый преобразователь 15 соединен с аналоговыми входами элементов И 13, 14. Выход параллельного сумматора 10 через усилитель мощности 16 соединен с электродвигателем 11 делительного стола (ведомая координата).

Делители частоты 1 и 6 аналогичны делителю частоты, используемому в схеме формирования сигнала управления приводами круговых подач шпинделя. Умножитель частоты 7 состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента умножения. Выбор делителя частоты 6 или умножителя частоты 7 зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка. Таким образом, блоки установки коэффициента деления или умножения соответственно в делителе частоты 6 или в умножителе частоты 7 выполняют функцию органа настройки на круговую подачу делительного стола станочного зацепления долбяк – заготовка, а совместно с делителем частоты 1 ведущей координаты (см. рисунок 6.18) – органа настройки на траекторию этого зацепления. Блок установки коэффициента деления делителя частоты 1 выполняет функцию органа настройки на дополнительный поворот делительного стола на этапе врезания, а совместно с блоком установки коэффициента деления делителя частоты 14 (см. рисунок 6.18) ведущей координаты на этапе врезания – органа настройки на траекторию станочного зацепления заготовка (касательное движение) – заготовка (дополнительный поворот).

Схемы формирователей сигналов управления приводами подач остальных  $n - 1$  ведомых координат (делительных столов) аналогичны.

Связь системы синхронизации с центральным или программируемым контроллером осуществляется посредством бесконтактных конечных переключателей, установленных на станине и роторе станка в точках, соответствующих позициям *E*, *A*, *C*, *D* (см. комментарий к способу зубодолбления по роторной схеме, приведенной на рисунке 6.17).

Циклы обработки зубчатых колес на каждом из делительных столов одинаковы, но смещены во времени на величину, равную времени поворота ротора в движении  $V_1$  на угол  $2\pi/n$ , где  $n$  – количество однотипных зубодолбежных станков, составляющих структуру роторного станка.

На рисунке 6.18 показано исходное для обработки положение, при котором круговой стол 7 находится в положении относительно инструментального суппорта 12 на позиции загрузки-выгрузки. В следующем по направлению вращения ротора положении исполнительных органов 7 и 12 происходит профилирование зубчатого колеса. В третьем положении профилирование закончено, осуществляется вывод долбяка из зоны зацепления и начинается этап позиционирования кругового стола в зону загрузки-выгрузки. Рассмотрим взаимодействие исполнительных органов станка по циклу обработки одного зубчатого колеса.

При включении эталонного генератора 2 импульсный сигнал с его выхода (см. рисунок 6.19) преобразуется в импульсно-измерительных преобразователях 3, 16, 17, 18 в постоянное напряжение. Затем по программе на элементы И 19 и 21 подается управляющий потенциал (символы  $P_3$  и  $P$ ). Напряжение с выхода импульсно-аналогового преобразователя 18 сообщается через элемент И 21 и усилитель мощности 23 электродвигателю ротора, а напряжение с выхода импульсно-аналогового преобразователя – через элемент И 19 и усилитель мощности 22 электродвигателю продольного стола. В результате ротору сообщается движение подачи  $B_1$ , а круговому столу –  $B_3$ . На участке позиционирования  $EA$  (см. рисунок 4.5) круговой стол догоняет инструментальный суппорт. В конечной точке  $A$  участка позиционирования срабатывает конечный переключатель системы управления циклом, с элемента И 19 снимается управляющий потенциал  $P_3$ , а элементу И 20 сообщается управляющий потенциал (символ  $B_p$ ). В результате круговому столу сообщается подача врезания  $B_5$ . Одновременно включается привод поступательно-возвратного движения шпинделя долбяка.

На этапе врезания делительному столу сообщается движение  $B_6$ , согласованное с движением  $B_5$ . Осуществляется это следующим образом. Сигнал – аналог подачи  $B_5$  кругового стола – поступает с импульсного измерительного преобразователя 18 на делитель частоты 1 канала отслеживающей синхронизации (см. рисунок 6.20), где происходит его деление в соответствии с коэффициентом деления, определяющим передаточное отношение станочного зацепления сложного движения врезания. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 2 через последовательно включенные элемент И 3, открытый по управляющему входу потенциалом  $B_p$ , сумматор 4, параллельный сумматор 10 и усилитель мощности 16, сообщается электродвигателю 11 привода делительного стола.

Этап врезания прекращается в конечной точке  $C$  участка врезания  $AC$  по команде конечного переключателя системы управления циклом. Управля-

ющий потенциал  $V_p$  снимается с соответствующих элементов  $I$ . В результате сложное движение врезания  $B_5B_6$  прекращается. Одновременно на входы элементов  $I 4$  и  $I 9$  (см. рисунок 6.20) поступает управляющий потенциал на профилирование колеса (символ  $Pr$ ). Управляющий потенциал, действующий на управляющем входе элемента  $I 4$ , включает привод круговой подачи шпинделя, являющегося ведущей координатой движения обката (профилирования)  $B_2B_4$  (работа схемы формирования сигнала управления этим приводом описана выше). Функциональная связь движений  $B_2$  и  $B_4$  осуществляется схемой отслеживающей синхронизации (см. рисунок 6.20).

Сигнал – аналог круговой подачи шпинделя – поступает с импульсного измерительного преобразователя  $20$ , установленного на шпинделе, на вход элемента  $I 22$ , один из управляющих входов которого при наладке открыт для прохождения задающего сигнала на вход делителя частоты  $6$  или умножителя частоты  $7$  (символы : или  $\times$ ) в соответствии с передаточным отношением станочного зацепления долбяк – заготовка.

После умножения или деления задающий сигнал преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе  $8$  через сумматор  $4$ , первый вход – выход параллельного сумматора  $10$ , усилитель мощности  $16$  сообщается электродвигателю кругового стола. Одновременно устраняется девиация привода кругового стола. Сигнал с выхода делителя или умножителя частоты через открытый по управляющему входу потенциалом  $Pr$  элемент  $I 9$  поступает на первые входы знакового  $11$  и фазового  $12$  дискриминаторов, на вторых входах которых одновременно поступает сигнал с импульсного измерительного преобразователя, установленного на делительной передаче делительного стола. При непрерывном мгновенном сравнении сигналов на выходе фазового дискриминатора образуется сигнал абсолютной погрешности, а на выходе знакового дискриминатора – ее погрешности по знаку. Сигнал с выхода знакового дискриминатора  $11$  открывает по управляющему входу элемент  $I 13$ , управляемый отрицательным потенциалом, или элемент  $14$ , управляемый положительным потенциалом. С выхода фазового дискриминатора сигнал абсолютной погрешности преобразуется в аналоговую форму и поступает на входы элементов  $I 13$  и  $14$ . Этот сигнал в зависимости от его знака поступает через один из элементов  $I$  на второй положительный или на отрицательный входы параллельного сумматора  $10$ , происходит двухсторонняя коррекция задающего сигнала ведомой координаты (делительного стола).

Профилирование прекращается по сигналу конечного переключателя после переноса ротором исполнительных органов (обоих столов и инструментального шпинделя) в конечное положение участка профилирования  $СД$ . В этом положении управляющий потенциал  $Pr$  снимается с соответствующих

ключей, приводы шпинделя и делительного стола отключаются. Прекращается также поступательно-возвратное движение шпинделя, и он выводится в крайнее верхнее положение. Одновременно на элемент *И 19* подается управляющий потенциал, и круговой стол на подаче врезания уходит из зоны профилирования по направляющим ротора по ходу его вращения. В положении загрузки-выгрузки конечным переключателем системы управления циклом электродвигатель кругового стола реверсируется и одновременно включается реле времени. Круговой стол, перемещаясь в направлении, противоположном направлению движения ротора, остается неподвижным в зоне загрузки-выгрузки в течение времени, определяемого циклом обработки. За это время снимается нарезанное колесо, устанавливается новая заготовка, а инструментальный суппорт перемещается на участок позиционирования. По окончании времени выдержки реле времени выключается, на управляющий вход соответствующего элемента *И* поступает потенциал *Пз* и цикл обработки повторяется.

Рациональная область использования такого станка – крупносерийное и массовое производство зубчатых колес.

## ГЛАВА 7. ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ДЛЯ ЗУБОТОЧЕНИЯ ОБКАТНЫМ РЕЗЦОМ

### 7.1 Анализ способа зуботочения цилиндрических колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка

При обкатном зубодолблении зуборезными долбяками срезание стружки происходит только при рабочем ходе долбяка в движении  $\uparrow P_1$  скорости резания. Вместе с тем движение обката ( $B_2B_3$ ), скорость которого определяется круговой подачей долбяка, в течение всего цикла обработки происходит непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения функционируют в качественно различном ритме. Это неизбежно при каком-то значении круговой подачи и при принятой величине «отскока» долбяка на холостом ходу в движении  $P_5$  приводит к возникновению явления затираания, которое проявляется в виде трения скольжения боковых режущих кромок зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса.

Среди технических решений, обеспечивающих устранение явления затираания, предпочтительны решения, основанные на согласовании ритмов формообразующих движений. Для решения этой задачи возможны два пути согласования ритмов этих движений. Первый путь – приведение ритма движения обката, воспроизводящего направляющую (профиль зубьев) к ритму движения скорости резания, воспроизводящей образующую (линию зуба). Следовательно, необходимо на периоды холостого хода долбяка прекращать движение обката. Такой вариант, признанный изобретением [20], посредством изменения правила выполнения одного из формообразующих движений обеспечивает устранение явления затираания при зубодолблении.

Второй путь основан на приведении ритма движения скорости резания к ритму движения обката. В этом случае оба формообразующих движения осуществляют непрерывно. Полученный таким образом процесс обработки был назван зуботочением, а режущий инструмент – обкатным резцом типа долбяка.

Первые технические решения в области зуботочения были защищены патентами в США в 1920-е годы [31]. В приведенном первоисточнике крат-

кое описание способа зуботочения повторяет его описание по первому патенту. Такое описание не соответствует современной парадигме познания способов формообразующей обработки [15]. Не рассматривается также условие, при котором возможно зуботочение обкатным резцом типа долбяка при воспроизведении профиля зубьев обкатом (по описанию изобретения по патентам – огибанием).

При рассмотрении зацепления двух цилиндрических колес с винтовыми зубьями, работающими с перекрещивающимися осями, наблюдается скольжение боковой поверхности зубьев одного колеса относительно другого. Одно из двух сцепляющихся колес заменим обкатным резцом типа зуборезного долбяка, а другое – заготовкой. При сообщении инструменту и заготовке согласованных вращательных движений, имитирующих зацепление зубчатой передачи, скольжение боковой поверхности зубьев инструмента преобразуется в резание (точение). При этом прямозубые колеса необходимо нарезать обязательно косозубым инструментом, так как только в этом случае угол скрещивания осей не будет равен нулю. Косозубые колеса можно нарезать как прямозубым, так и косозубым инструментом. При названных условиях скорость резания определяется относительным скольжением боковых поверхностей зубьев и зависит от суммы углов подъема зубьев инструмента, зубьев нарезаемого колеса и угла скрещивания осей инструмента и нарезаемой заготовки. По библиографическим источникам наивыгоднейшая сумма этих углов равна 90 градусов. При этом угол скрещивания осей обычно принимают равным 60 градусам.

При зуботочении прямозубого колеса (рисунок 7.1) заготовка 1 относительно инструмента 2 устанавливается так, чтобы их оси скрещивались под углом  $\lambda$ . Процесс получения зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения инструменту и заготовке двух формообразующих движений.

Профиль зубьев (образующая) зубчатого колеса и процесс деления, совмещенный с формообразованием, воспроизводится двухэлементарным движением обката  $\Phi_v(B_1B_2)$ , состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения  $B_1$  инструмента 2 и вращения  $B_2$  заготовки 1. Движение обката с замкнутой траекторией. Настраивается это движение по трем параметрам: на траекторию – согласованием движений  $B_1$  и  $B_2$ , на скорость – изменением круговой частоты движения  $B_1$ , на направление – изменением направления траектории обката.

Линия зуба (направляющая) – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным движением  $\Phi_s(P_3)$  инструмента. Это движе-

ние с незамкнутой траекторией, и настраивается на скорость изменением величины подачи, на путь и исходное положение – по упорам.

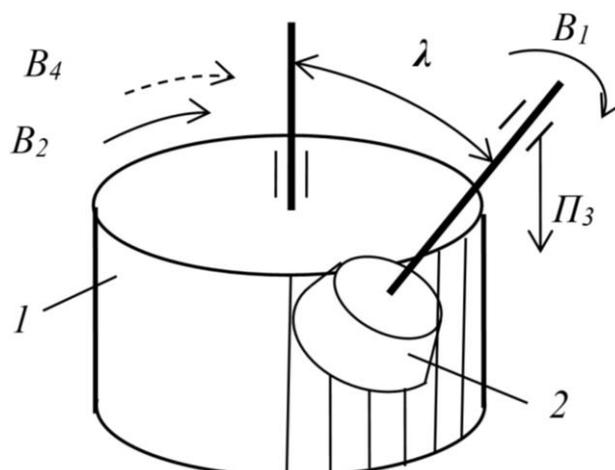


Рисунок 7.1. – Способ зуботочения цилиндрических зубчатых колес

Для зуботочения косозубых колес (производная цель) в схеме рассмотренного способа зуботочения прямозубых колес элементарное движение  $\Phi_s(P_3)$  необходимо преобразовать в двухэлементарное винтовое движение  $\Phi_s(P_3 B_4)$ , где  $B_4$  – дополнительное вращательное движение заготовки (на рисунке 7.1 показано пунктирной стрелкой). Полученный таким образом способ зуботочения косозубых цилиндрических колес отличается от прототипа (первообразного способа) дополнительным элементом (движением  $B_4$ ) и правилом его выполнения, определяемым через функциональную связь с движением  $P_3$ .

При зуботочении косозубых колес заготовка 1 одновременно участвует в движениях  $B_2$  и  $B_4$ . Возможно как физическое, так и математическое сложение двух элементарных движений на одном исполнительном органе. При физическом сложении в кинематической структуре станка обязательно наличие дифференциала (суммирующего механизма).

Синергизм обоих рассмотренных способов зуботочения (первообразного и производного от него) характеризуется производными целями: изменением функции формообразующих движений, на этой основе упрощением структуры посредством исключения движений врезания и отвода – подвода инструмента к заготовке, характерного для зубодолбления, отсутствием явления затирания инструмента, повышением производительности. По bibliографическим источникам производительность зуботочения выше производительности обкатного зубодолбления и фрезерования червячными фрезами в 3–5 раз. Однако дальнейшие исследования показали, что зуботочение существенно уступает зубодолблению в универсальности.

## 7.2 Типовая структурная схема станка для зуботочения цилиндрических колес обкатным резцом

На рисунке 7.2 приведена типовая структурная схема станка с механическими связями [32], реализующая способ зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка. Схема содержит две сложные формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3B_4)$  с общим электродвигателем  $M_1$  и группу  $P_3(P_5)$  для установочных (позиционирования) перемещений суппорта при наладке станка.

Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящая профиль (образующую) зубьев обрабатываемого колеса, создает сложное, двухэлементарное, замкнутое движение обката (станочное зацепление). Ее внутренняя связь, имитирующая зубчатое зацепление, – кинематическая цепь, состоящая из механических передач, имеет вид:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \leftarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow \\ \rightarrow 5 \rightarrow \text{дифференциал} \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow \text{шпиндель с заготовкой} \\ \text{обрабатываемого колеса } 9 \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M_1 \rightarrow 10 \rightarrow i_v \rightarrow \text{звено соединения связей } 3.$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию – органом настройки  $i_x$ , на скорость воспроизведения профиля зубьев колеса (скорость резания) – органом настройки  $i_v$ .

Группа  $\Phi_s(P_3B_4)$ , воспроизводящая линию зубьев по длине (направляющую) нарезаемого колеса, создает сложное, двухэлементарное, незамкнутое винтовое движение (станочное зацепление). Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, имитирующая передачу винт – гайка, состоящая из механических передач:

$$P_3 \leftarrow \text{суппорт} \leftarrow ТВ \leftarrow 11 \leftarrow \text{муфта } 12 \leftarrow 13 \rightarrow i_y \rightarrow 14 \rightarrow \\ \rightarrow \text{дифференциал} \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow \text{шпиндель с заготовкой} \\ \text{обрабатываемого колеса } 9 \rightarrow B_4.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M_1 \rightarrow 10 \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow \text{дифференциал} \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow \\ \rightarrow i_s \rightarrow \text{звено соединения связей } 13.$$

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию – органом настройки  $i_y$ , на скорость воспроизведения линии зуба (подачу) – органом настройки  $i_s$ , на исходную точку и путь – по упорам системы управления.

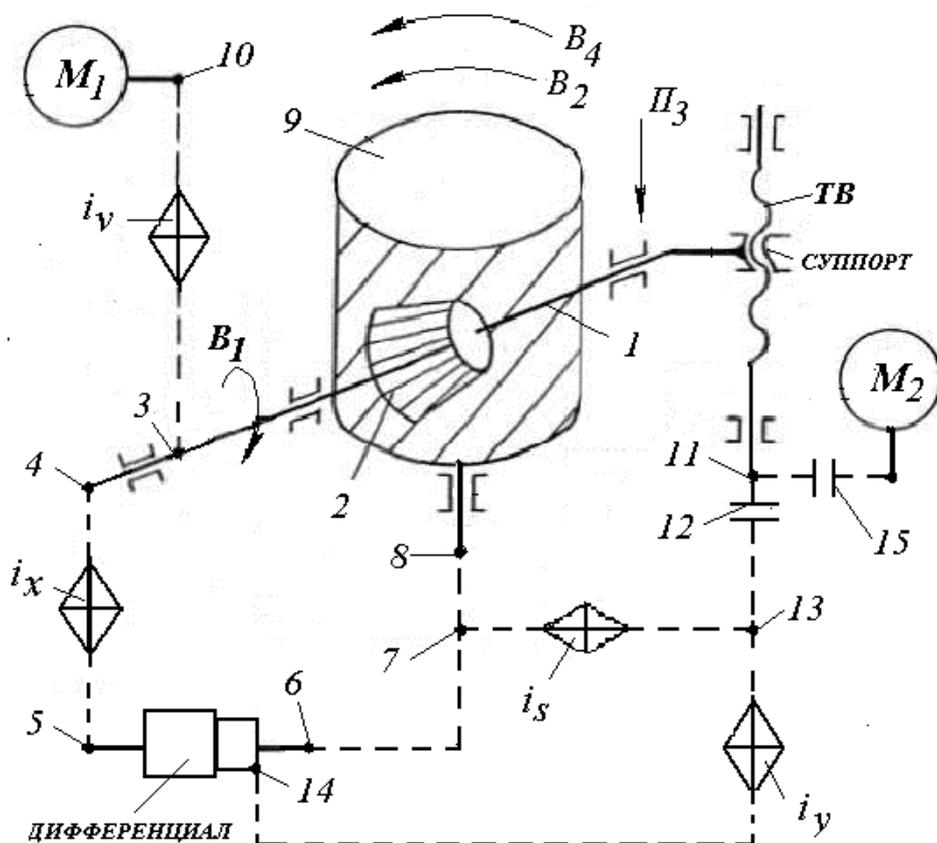


Рисунок 7.2. – Кинематическая структура станка для зуботочения цилиндрических колес обкатным резцом типа долбяка

Вспомогательная, ненастраиваемая группа  $\Pi_3(\Pi_5)$  – простая. Ее исполнительный орган – суппорт инструмента – одновременно является исполнительным органом формообразующей группы  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$ . Внутренняя связь вспомогательной группы имеет вид:

*суппорт → вертикальные направляющие станины.*

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$M_2 \rightarrow \text{муфта } 15 \rightarrow 11 \rightarrow \text{звено соединения связей } ТВ.$

Траектория движения, воспроизводимого группой, совпадает с траекторией движения  $\Pi_3$ .

Вывод ФН для органов настройки (в станках с механическими связями это, как правило, гитары сменных зубчатых колес)  $i_x, i_y, i_v, i_s$ .

Орган настройки  $i_x$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_v(B_1B_2)$ . РП имитирует зубчатое зацепление:

$1$  об. обкатного резца ( $B_1$ )  $\rightarrow z_u / z$  об. заготовки колеса ( $B_2$ ),

где  $z_u$  – число зубьев обкатного резца;  
 $z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Тогда УКЦ:

$$z_u/z = I \cdot c_1 \cdot i_\Sigma \cdot i_x,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$i_\Sigma$  – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Откуда ФН:

$$i_x = z_u / c_1 \cdot i_\Sigma \cdot z.$$

Орган настройки  $i_y$ . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_s(P_3B_4)$ . РП имитирует передачу винт – гайка:

$T$  мм перемещения суппорта инструмента ( $P_3$ )  $\rightarrow 1$  об. заготовки нарезаемого колеса ( $B_4$ ).

Тогда УКЦ:

$$I = T / t_{TB} \cdot i_y \cdot c_2 \cdot i_\Sigma,$$

где  $T = \pi m z_u / \sin \beta$ ;

$T$  – шаг винтовой линии нарезаемого колеса;

$\beta$  – угол подъема винтовой линии нарезаемого колеса;

$c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$i_\Sigma$  – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Откуда ФН:

$$i_y = t_{TB} / T c_2 \cdot i_\Sigma.$$

Орган настройки  $i_v$ . Скорость воспроизведения образующей задается посредством скорости резания. Поэтому расчетная цепь – это кинематическая связь электродвигатель  $M_1$  шпиндель  $1$  обкатного резца  $2$ . Следовательно, РП имеют вид:

$n_M$  мин<sup>-1</sup> электродвигателя  $M_1 \rightarrow n_u$  мин<sup>-1</sup> обкатного резца  $2$  ( $B_1$ ).

Тогда УКЦ:

$$n_u = n_M \cdot c_3 \cdot i_v,$$

где  $c_3$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_v = n_u / c_3 \cdot n_M.$$

Орган настройки  $i_s$ . При использовании общего электродвигателя в формообразующих группах скорость воспроизведения направляющей задается посредством оборотной подачи инструмента. Поэтому расчетная цепь – это кинематическая связь шпиндель заготовки 9 суппорт шпинделя обкатного резца 2. Следовательно, РП:

$$1 \text{ об. заготовки } 9 \rightarrow s \text{ мм/об обкатного резца } 2 (П_3).$$

Тогда УКЦ:

$$s = l \cdot c_4 \cdot i_s \cdot t_{TB},$$

где  $c_4$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_s = s / c_4 \cdot t_{TB}.$$

Рассмотренная структурная схема используется в качестве базовой в станках для зуботочения обкатным резцом цилиндрических зубчатых колес моделей ЕЗ 13, ЕЗ-24, ЕЗ-165 и др., различающихся размерами нарезаемых колес.

В названных моделях станков внутренние связи сложных формообразующих групп, состоят из механических передач и отдельных механизмов (дифференциалов, гитар сменных зубчатых колес), обеспечивающих статическую возможность задания точных передаточных отношений между исполнительными органами группы и не требуют дополнительных настроек в процессе работы. Наряду с этим, внутренние механические связи при большой их протяженности, характерной для станков названных моделей, не всегда обеспечивают необходимую кинематическую точность работы формообразующих групп. На кинематическую точность внутренней связи сложной формообразующей группы влияют геометрическая неточность ее элементов и неточность их взаимного расположения, обусловленная погрешностями обработки и сборки. Существенное влияние на кинематическую точность внут-

ренной связи оказывают температурные деформации и крутильная жесткость, определяемая взаимным углом поворота валов конечных звеньев исполнительных органов.

При сложном пространственном расположении исполнительных органов станка, большом числе промежуточных подвижных звеньев жесткие внутренние механические связи становятся громоздкими, что приводит к усложнению конструкции станка и к снижению его кинематической точности. Это особенно важно для зубообрабатывающих станков, имеющих сложные разветвленные, многозвенные, механические, переналаживаемые цепи значительной протяженности, где необходимо обеспечивать жесткую связь для создания сложных формообразующих движений.

Как показывает анализ литературных и патентных источников, поиск технических решений, обеспечивающих устранение указанных недостатков, привел к созданию сложных гибридных формообразующих групп. На современном этапе эволюционного развития станочного оборудования сложилось два направления при конструировании сложных гибридных формообразующих групп, принципиально различающиеся элементной базой.

*Первое направление.* Проектирование металлорежущих станков, содержащих сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и гидравлических связей на основе генераторов гидравлических импульсов (ГГИ), гидравлических шаговых двигателей (ГШД) и типовых блочно-модульных гидравлических элементов (механико-гидравлические технические системы).

*Второе направление.* Проектирование металлорежущих станков, содержащих сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем (мехатронные технические системы).

### **7.3 Структурная схема станка для зуботочения с гидравлическими связями в формообразующих группах**

На рисунке 7.3 приведена типовая структурная схема станка с внутренними гидравлическими связями в сложных гибридных формообразующих группах для зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка [33]. В первоисточниках описание структурной

схемы выполнено на языке парадигмы, принятой в научно-технической экспертизе изобретений, а методика настройки вообще не рассматривается.

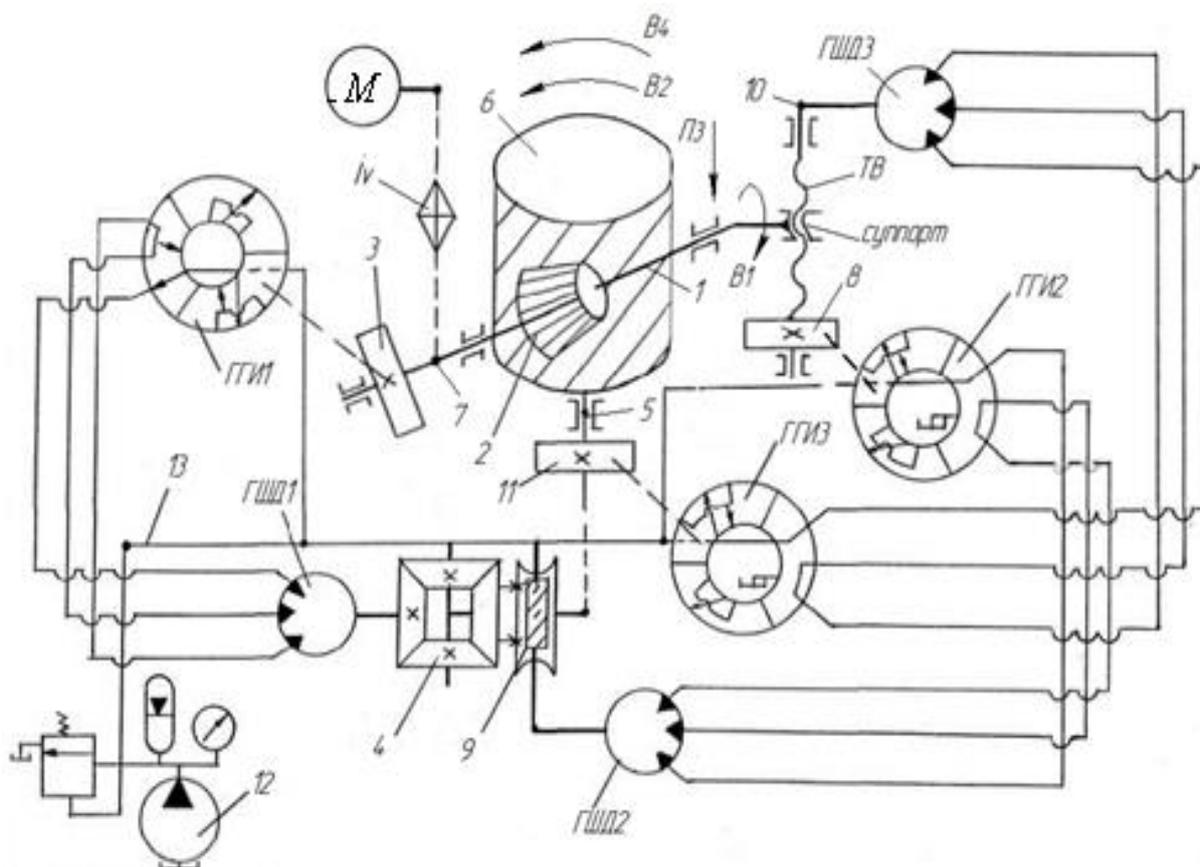


Рисунок 7.3. – Дифференциальная кинематическая структура станка с гидравлическими связями для зубочернения обкатным резцом

В соответствии с современной парадигмой кинематическая структура станка включает две сложные гибридные формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящую профиль (образующую) зубьев нарезаемого колеса, и  $\Phi_s(P_3B_4)$ , воспроизводящую линию зуба (направляющую) этого колеса.

Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$  создает сложное, двухэлементарное, замкнутое движение обката. Ее внутренняя связь – кинематико-гидравлическая цепь, состоящая из механических передач и гидравлических блоков:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \leftarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ } 1 \rightarrow \\ \rightarrow \text{ГШД } 1 \rightarrow \text{дифференциал } 4 \rightarrow \text{шпиндель } 5 \text{ с заготовкой } 6 \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 7 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию – органом настройки  $i_x$ , функцию которого выполняет ГГИ 1, на скорость воспроизведения профиля зубьев колеса (скорость резания) – органом настройки  $i_v$ .

Группа  $\Phi_s(P_3B_4)$  создает сложное, двухэлементарное, незамкнутое винтовое движение. Ее внутренняя связь – кинематико-гидравлическая цепь, также состоящая из механических передач и гидравлических блоков:

$$P_3 \leftarrow \text{суппорт} \leftarrow \text{тяговый вал } 18 \rightarrow 8 \rightarrow \text{ГГИ } 2 \rightarrow \text{ГШД } 2 \rightarrow 9 \rightarrow \\ \rightarrow \text{дифференциал } 4 \rightarrow \text{шпиндель } 5 \rightarrow B_4.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$\text{ГШД } 3 \rightarrow 10 \rightarrow \text{тяговый вал } 18 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Особенность рассматриваемой группы – это использование ГШД 3 в качестве источника энергии движения исполнительного органа – суппорта инструмента. Привод вращательного движения ротора ГШД 3 обеспечивается ГГИ 3, кинематически связанным посредством шестерни 11 со шпинделем 5 заготовки.

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию – органом настройки  $i_y$ , функцию которого выполняет ГГИ 2, на скорость воспроизведения линии зуба (подача) – органом настройки  $i_s$ , функцию которого выполняет ГГИ 3, на исходную точку и путь – по упорам системы управления.

Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов подается от насосной установки 12 по трубопроводу 13.

Обе формообразующие группы выполнены в виде отслеживающей синхронизации по схеме задающая – ведомая координаты. В группе  $\Phi_v(B_1B_2)$  задающая координата – шпиндель 1 фрезы 2, ведомая координата – шпиндель 5 нарезаемого колеса б. В группе  $\Phi_s(P_3B_4)$  задающая координата – шпиндель 5 нарезаемого колеса б, ведомая координата – суппорт инструмента.

Принципиальной особенностью обеих схем отслеживающей синхронизации является размещение источников энергии ведомых координат во внутренних связях формообразующих групп. Функцию задатчиков, делителей частоты и блоков задания коэффициентов деления  $k_x$  и  $k_y$  в обеих группах выполняют струйные элементы соответственно ГГИ 1 и ГГИ 2, преобразующие один оборот соответствующей задающей координаты в последовательность гидравлических импульсов. Конструктивно каждый ГГИ выполнен в виде набора кодирующих дисков, закрепленных на общей оси, получающей вращательное движение. Количество кодирующих дисков определяет общее число передаточных отношений расчетных цепей, совпадающих с внутренними связями обеих гибридных формообразующих групп. Схема ГГИ подробно рассмотрена в работе [34].

Коэффициенты деления  $k_x$  и  $k_y$  определяются по формулам, аналогичным формулам для определения передаточных отношений органов настройки соответственно  $i_x$  и  $i_y$  в механических расчетных цепях по известным в станковедении РП.

РП для вывода коэффициента деления  $k_x$  имеет вид:

$$1 \text{ об. обкатного резца } (B_1) \rightarrow z_u/z \text{ об. заготовки } (B_2),$$

где  $z_u$  – число зубьев обкатного резца;

$z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

Тогда УКЦ:

$$z_u/z = I \cdot c_1 \cdot i_\Sigma \cdot k_x,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$i_\Sigma$  – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Откуда коэффициент деления (ФН):

$$k_x = z_u / c_1 \cdot i_\Sigma \cdot z.$$

РП для вывода коэффициента деления  $k_y$  имеет вид:

$$T \text{ мм перемещения суппорта } (П_3) \rightarrow 1 \text{ об. заготовки колеса } (B_4).$$

Тогда УКЦ:

$$I = T / t_{TB} \cdot k_y \cdot (c_2 \cdot i_\Sigma),$$

где  $T = \pi m z_u / \sin \beta$ ;

$T$  – шаг винтовой линии нарезаемого колеса;

$c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

$i_\Sigma$  – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Откуда коэффициент деления (ФН):

$$k_y = t_{TB} / T c_2 \cdot i_\Sigma.$$

В качестве органа настройки  $i_v$  в станках для зуботочения, как правило, используется двухколесная гитара сменных зубчатых колес. Функцию органа настройки  $i_v$  выполняет ГГИ 3. Вывод соответствующих формул настройки осуществляется по общепринятой методике для расчетных цепей скорости резания и скорости подачи.

Для органа настройки  $i_v$  РП имеют вид:

$n_M \text{ мин}^{-1}$  электродвигателя  $M_1 \rightarrow n_u \text{ мин}^{-1}$  обкатного резца 2 ( $B_1$ ).

Тогда УКЦ:

$$n_u = n_M \cdot c_3 \cdot i_v,$$

где  $c_3$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_v = n_u / c_3 \cdot n_M.$$

Для органа настройки  $i_s$  РП имеют вид:

$n \text{ мин}^{-1}$  ГШД 3  $\rightarrow s \text{ мм/мин}$  подачи обкатного резца 2 ( $\Pi_3$ ).

Тогда УКЦ:

$$s = n \cdot c_4 \cdot k_s \cdot t_{TB}$$

где  $c_4$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

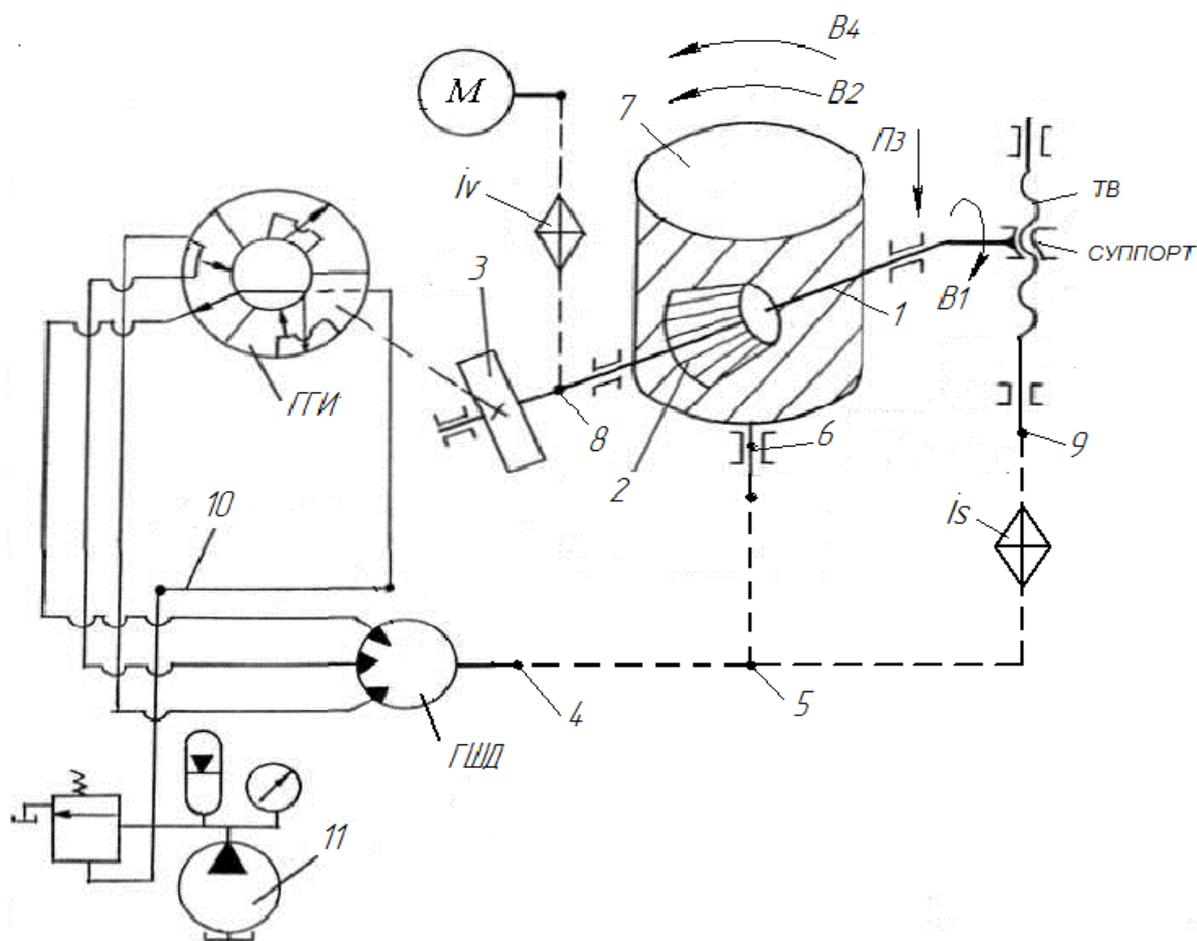
$$k_s = s / n \cdot c_4 \cdot t_{TB}.$$

Уместно отметить, что в рассматриваемой схеме целесообразно ГШД 3 заменить электродвигателем с соответствующим органом настройки. В этом случае из структурной схемы исключается ГПИ 3 и шестерня 11. А в качестве органов настройки  $i_v$  и  $i_s$  в соответствии с современной тенденцией можно использовать частотные преобразователи для бесступенчатого регулирования круговых частот электродвигателей.

Авторы данного направления в станковедении кинематическую связь в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода называют «гидравлический вал». Такой вал используется авторами направления в ряде структурных схем металлорежущих станков, признанных изобретениями. А фундаментальные положения этого направления изложены его авторами в монографии [35].

В кинематической структуре рассмотренного станка на одном исполнительном органе – шпинделе 5 заготовки физически суммируются посредством дифференциала 4 два элементарных движения  $B_1$  и  $B_4$ , выполняемые формообразующими группами соответственно  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$ . Эти движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их оди-

накова, но создаются они разными источниками движения (ГШД 1 и ГШД 2). Следовательно, чтобы перейти к бездифференциальному (математическому) сложению, необходимо модернизировать структурную схему так, чтобы указанные движения осуществлялись одним источником движения. При этом между кинематическими группами обязательно должна быть кинематическая связь. Этим условиям удовлетворяет структурная схема, приведенная на рисунке 7.4. В этой схеме «гидравлический вал ГГИ → ГШД» можно рассматривать как передаточный механизм, расположенный во внутренней связи сложной, гибридной формообразующей группы.



**Рисунок 7.4. – Бездифференциальная кинематическая структура станка с гидравлическим валом для зуботочения**

При математическом сложении формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3B_4)$  преобразуются к виду  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_4)$  и  $\Phi_s(P_3)$ . Таким образом, замена физического сложения математическим упрощает кинематическую структуру станка и повышает кинематическую точность внутренней связи сложной формообразующей группы.

Группа  $\Phi_v(B_1B_2\pm B_4)$  создает сложное, замкнутое движение обката. Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, состоящая из механических передач и гидравлического вала:

$$B_1 \leftarrow \text{шпиндель } 1 \text{ обкатного резца } 2 \leftarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ} \rightarrow \text{ГШД} \rightarrow \\ \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow \text{шпиндель } 6 \text{ с заготовкой } 7 \rightarrow B_2\pm B_4.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 8 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию – органом настройки  $k_x$ , функцию которого выполняет ГГИ, на скорость воспроизведения профиля зубьев колеса (скорость резания) – органом настройки  $i_v$ , например, гитарой сменных зубчатых колес.

Группа  $\Phi_s(P_3)$  создает простое, незамкнутое движение подачи. Ее внутренняя связь – поступательная пара:

$$\text{суппорт резца } 2 (P_3) \rightarrow \text{вертикальные направляющие станины}.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ} \rightarrow \text{ГШД} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow i_s \rightarrow 9 \rightarrow \\ \rightarrow \text{ТВ (звено соединения связей)}.$$

Группа настраивается по трем параметрам: на скорость воспроизведения линии зуба (подачу) – органом настройки  $i_s$ , например, гитарой сменных зубчатых колес, на исходную точку и путь – по упорам системы управления.

Рабочая жидкость к генератору гидравлических импульсов подается по трубопроводу 10 от насосной установки 11.

Вывод коэффициента деления для органа настройки на траекторию. При точении прямозубого колеса за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) обкатной резец совершает  $z/z_u$  оборотов (движение  $B_1$ ) и перемещается на величину  $s$  мм (движение  $P_4$ ). Для получения винтовой линии косозубого колеса при перемещении резца на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $s/T$  оборота (движение  $B_4$ ), что соответствует дополнительному повороту резца на величину  $\pm(z/z_u) \cdot (s/T)$ . Следовательно, РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката  $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$ , преобразуются к виду:

$$1 \text{ оборот шпинделя заготовки } (B_2 \pm B_4) \rightarrow z/z_u (1 \pm s/T) \text{ оборота} \\ \text{чашечного резца } (B_1).$$

Тогда УКЦ:

$$z/z_u (1 \pm s/T) = 1 \cdot c_1 \cdot k_x.$$

Коэффициент деления:

$$k_x = [z/z_u (1 \pm s/T)] / c_1,$$

где  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Вывод ФН для органов настройки  $i_v$  и  $i_s$  выполняется по правилам, принятым для серийных станков этого класса с механическими связями.

РП для органа настройки  $i_v$  имеет вид,

$n_M$  мин<sup>-1</sup> электродвигателя  $M_1 \rightarrow n_u$  мин<sup>-1</sup> обкатного резца 2 ( $B_1$ ).

Тогда УКЦ:

$$n_u = n_M \cdot c_2 \cdot i_v.$$

Откуда ФН:

$$i_v = n_u / c_2 \cdot n_M,$$

где  $c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

РП для органа настройки  $i_s$  имеет вид:

$l$  об. обрабатываемой заготовки  $\rightarrow s$  мм/об обкатного резца ( $P_3$ ).

Тогда УКЦ:

$$s = l \cdot c_3 \cdot i_s \cdot t_{TB}.$$

Тогда ФН:

$$i_s = s / c_3 \cdot t_{TB},$$

где  $c_3$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Синергизм рассмотренной структурной схемы – упрощение конструкции станка и, как следствие, повышение его кинематической точности. Это техническое решение до разглашения его в открытой печати [32] могло быть признано изобретением.

#### **7.4 Структурная схема станка для зуботочения с электронными связями в формообразующих группах**

По библиографическим источникам известны два варианта использования систем ЧПУ в станках, содержащих сложные формообразующие группы. Первый вариант: кинематическая структура внутренних связей сложных фор-

мообразующих групп состоит только из механических передач и традиционных механизмов, например, гитар сменных зубчатых колес, дифференциалов, реверсов. Такая кинематическая структура использована, например, в станках моделей 5Б352ПФ2, ВС-51ПФ2 и других. В этих станках настройка на траекторию сложного исполнительного движения осуществляется посредством механических органов настройки, преимущественно, гитарами сменных зубчатых колес. Настройка и управление остальными параметрами осуществляется программируемыми контроллерами типа NC в соответствующем коде.

Второй вариант: использование сложных, гибридных, формообразующих групп в кинематической структуре станка. Структура гибридных групп – это объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. Настройка на траекторию сложного исполнительного движения в гибридных группах осуществляется посредством электронных блоков – делителей частоты, располагаемых в внутренних связях соответствующих групп.

На рисунке 7.5 приведена структурная схема станка для зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом, содержащая две сложные гибридные (мехатронные) формообразующие группы, внутренние связи которых – это совокупность исполнительных органов и электронных блоков. Обе группы выполнены по схеме равнозначных координат с общим задатчиком – эталонным генератором импульсного сигнала, частота которого превышает частоту импульсных сигналов – аналогов частот вращения шпинделей инструмента, нарезаемого колеса и тягового вала суппорта.

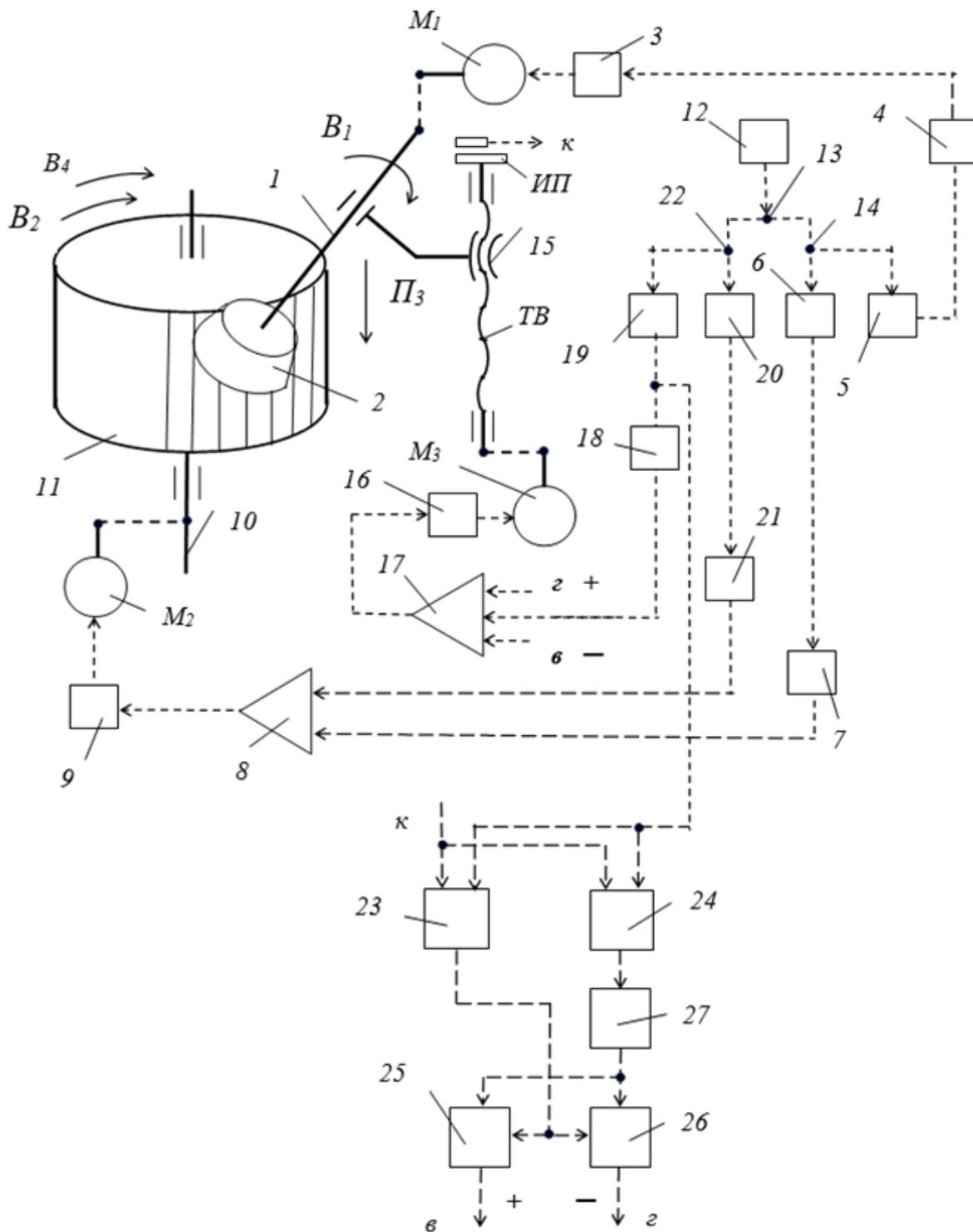
Группа  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводит профиль зубьев нарезаемого колеса (образующую). Ее внутренняя связь мехатронная цепь:

$B_1 \leftarrow$  шпиндель 1 резца  $2 \leftarrow M_1 \leftarrow$  усилитель мощности  $3 \leftarrow$  электронный вал  
(импульсно-аналоговый преобразователь  $4 \leftarrow$  делитель  
частоты  $5 \leftarrow$  разъем  $14 \rightarrow$  делитель частоты  $6 \rightarrow$  импульсно-аналоговый  
преобразователь  $7 \rightarrow$  сумматор  $8) \rightarrow$  усилитель мощности  $9 \rightarrow M_2 \rightarrow$   
 $\rightarrow$  шпиндель 10 заготовки  $11 \rightarrow B_2$ .

Внешняя связь:

высокочастотный импульсный генератор  $12 \rightarrow$  разъем  $13 \rightarrow$  разъем  $14$   
(звено соединения связей).

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию – делителем частоты 6, на скорость воспроизведения профиля зубьев колеса (скорость резания) – делителем частоты 5.



**Рисунок 7.5 – Структурная схема станка для зуботочения с электронными валами в сложных формообразующих группах**

Группа  $\Phi_3(\Pi_3 B_4)$  воспроизводит линию зубьев по длине (направляющую) нарезаемого колеса. Ее внутренняя связь мехатронная цепь:

$\Pi_3 \leftarrow$  суппорт  $17 \leftarrow$  ТВ  $\leftarrow$   $M_3 \leftarrow$  усилитель мощности  $16 \leftarrow$   
 $\leftarrow$  электронный вал (параллельный сумматор  $17 \rightarrow$

→импульсно-аналоговый преобразователь 18→делитель частоты 19 →  
 →разъем 22→делитель частоты 20→импульсно-аналоговый  
 преобразователь 21→сумматор 8) →усилитель мощности 9→ $M_2$  →  
 →шпиндель 10→  $B_4$ .

Внешняя связь:

высокочастотный импульсный генератор 14 → разъем 13 →  
 →разъем 22 (звено соединения связей).

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию – делителем частоты 20, на скорость воспроизведения линии зуба (подачу) – делителем частоты 19, на исходную точку и путь – программно посредством задания размера в коде системы ЧПУ.

В качестве  $M_1, M_2, M_3$  целесообразно использовать синхронные электродвигатели переменного тока. Делители частоты 6, 7, 21, 22 включают счетчики импульсов и блоки задания коэффициентов деления.

Нормируемыми технологическими параметрами при зуботочении являются скорость резания и подача, задаваемые соответственно по круговой частоте обкатного резца и по его продольному перемещению.

На делителе частоты 5 устанавливают коэффициент деления  $k_v$ , при котором на выходе счетчика этого делителя при функционировании схемы образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте шпинделя 1 обкатного резца 2. Для вывода коэффициента деления  $k_x$ , устанавливаемого на делителе частоты 6, воспользуемся известными РП:

1 об. обкатного резца ( $B_1$ ) →  $z_u/z$  об. нарезаемого колеса ( $B_2$ ).

Тогда УКЦ для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы  $\Phi_v(B_1B_2)$ :

$$z_u/z = 1 \cdot c_1 (n_{M1} / n_{M2}),$$

где  $z_u$  и  $z$  – число зубьев инструмента и нарезаемого колеса соответственно;  $c_1$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Круговые частоты электродвигателей  $M_1$  и  $M_2$  однозначно зависят от задающих сигналов на выходе делителей частоты 5 и 6 соответственно. Поэтому в УКЦ круговые частоты электродвигателей можно заменить коэффициентами деления. Тогда:

$$z_u/z = 1 \cdot c_1 (k_v / k_x).$$

Из полученного выражения выводится коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты 6:

$$k_x = c_1 \cdot k_v (z / z_u).$$

Аналогично выводятся коэффициенты деления  $k_y$  и  $k_s$  для делителей частоты 19 и 20. На делителе частоты 19 устанавливают коэффициент деления  $k_s$ , при котором на выходе счетчика этого делителя образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте тягового вала  $TB$ . Вывод коэффициента деления  $k_y$ , устанавливаемого на делителе частоты 20, осуществляется по известным РП:

*$T$  мм перемещения суппорта ( $П_3$ )  $\rightarrow$  1 об. нарезаемого колеса ( $B_4$ ).*

Тогда УКЦ для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы  $\Phi_3(П_3B_4)$ :

$$I = c_2 (n_{M2} / n_{M3}) (T / t_{TB}) = c_2 (k_y / k_s) (T / t_{TB}),$$

где  $T$  – шаг винтовой линии нарезаемого колеса;

$t_{TB}$  – шаг тягового вала;

$c_2$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты 20:

$$k_y = k_s (t_{TB} / c_2 T).$$

Функционирование сложных гибридных формообразующих групп станка осуществляется следующим образом. Эталонный генератор 12 вырабатывает высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на делители частоты 5, 6, 19, 20, в которых происходит деление этого сигнала в соответствии с коэффициентами деления  $k_x, k_y, k_v, k_s$ .

Сигнал с выхода делителя частоты 5 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 4 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через усилитель мощности 3 поступает на управляемый электродвигатель  $M_1$ , сообщающий шпинделю 1 обкатного резца движение  $B_1$ , соответствующее скорости резания. Синхронно сигнал с выхода делителя частоты 6 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 7 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход сумматора 8 и усилитель мощности 9 поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , сообщающий шпинделю 10

заготовки нарезаемого колеса движение  $B_2$ , соответствующее скорости круговой подачи. В итоге такого прохождения задающего сигнала по внутренней связи группы  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  осуществляется воспроизведение образующей – профиля зубчатого колеса сложным формообразующим движением  $B_1\Pi_2$ .

Параллельно сигнал с выхода делителя частоты 19 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 18 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 17 и усилитель мощности 16 поступает на управляемый электродвигатель  $M_3$ . Этот электродвигатель посредством тягового  $TB$  сообщает суппорту 15 инструмента движение  $\Pi_3$ , соответствующее продольной подаче обкатного резца. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 20 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 21 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через второй вход сложения – выход сумматора 8 и усилитель мощности 9 сигнал поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который сообщает дополнительное движение  $B_4$  шпинделю 10 обрабатываемой заготовки 11. В итоге такого прохождения задающего сигнала по внутренней связи группы  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$  осуществляется воспроизведение направляющей – линии зубьев нарезаемого колеса сложным формообразующим движением  $\Pi_3B_4$ .

Таким образом, при одновременном (параллельном) функционировании сложных, гибридных, формообразующих групп  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$  обрабатывается цилиндрическое, винтовое (косозубое) зубчатое колеса.

Рассмотренная структурная схема при незначительной переналадке обеспечивает также обработку цилиндрического прямозубого колеса. Для этого достаточно отключить делитель частоты 20 от эталонного генератора 12. В итоге сложная, гибридная, формообразующая группа  $\Phi_s(\Pi_3B_4)$  преобразуется в простую гибридную группу  $\Phi_s(\Pi_3)$ . При этом определение коэффициента настройки  $k_s$  не изменяется.

В сложных гибридных формообразующих группах основным источником погрешностей, снижающих качественные показатели обрабатываемой поверхности, является девиация механики исполнительных органов этих групп. Технические решения для устранения этого явления в гибридных механико-гидравлических формообразующих группах в профильной литературе нет.

В мехатронных формообразующих группах явление девиации можно устранить посредством модификации внутренних связей, обеспечивающей непрерывную, двухстороннюю коррекцию задающих сигналов управления электродвигателями исполнительных органов.

Вероятно, что максимальная девиации механики возможна в приводе продольной подачи в движении  $П_3$ . Для ее устранения в структурную схему станка (см. рисунок 7.5) включен соответствующий модуль коррекции задающего сигнала управления электродвигателем  $M_3$ .

Модуль коррекции содержит знаковый 23 и фазовый 24 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора 23 соединен с управляющим входом ключа 25, управляемого положительным потенциалом, и с управляющим входом ключа 26, управляемого отрицательным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 24 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 27, а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей 25 и 26.

Первые входы дискриминаторов 23 и 24 соединены с выходом делителя частоты 19, а вторые входы – с импульсным измерительным преобразователем  $ИП$ , установленным на тяговом валу  $ВТ$ . Выходы ключей 25 и 26 соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 17.

Модуль коррекции работает следующим образом. На первых входах знакового 23 и фазового 24 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 19. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с  $ИП$  поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $П_3$  суппорта. В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора 23 образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя суппорта от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 25 и 26.

Синхронно на выходе фазового дискриминатора 24 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 27 поступает на аналоговые входы ключей 25 и 26. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 19 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании суппорта от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 26, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 19, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 25, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 19 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, то есть происходит непрерывная,

двухсторонняя коррекция скорости подачи инструмента относительно номинального значения.

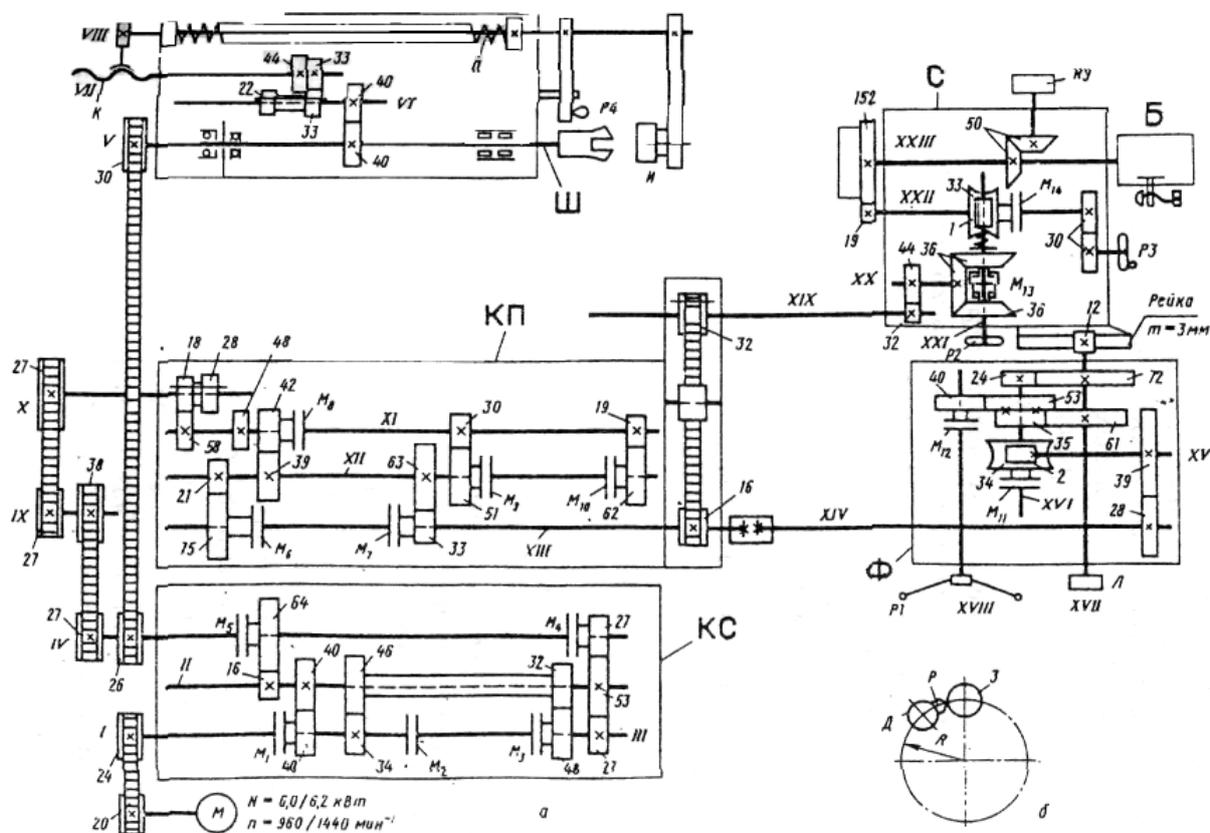
Аналогично можно осуществлять коррекцию круговой частоты шпинделя  $I$  инструмента и шпинделя  $IO$  заготовки как при обработке прямозубого колеса, так и при обработке колеса с винтовыми зубьями.

## ГЛАВА 8. АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ИЗВЕСТНЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Рассмотрим использование изложенной в предшествующих разделах современной парадигмы познания металлорежущих станков на примерах анализа кинематической структуры известных металлорежущих станков.

### 8.1 Токарно-револьверный станок модели 1Г340

Относится к станкам с горизонтальной осью револьверной головки, имеющей 16 гнезд для различных инструментов. На станке можно обрабатывать детали как из прутка, так и из заготовок. Область использования – серийное производство. Кинематическая схема станка представлена на рисунке 8.1.



**Рисунок 8.1. – Кинематическая схема  
токарно-револьверного станка модели 1Г340**

*Техническая характеристика.* Максимальный диаметр обрабатываемого прутка – 40 мм; максимальный диаметр заготовки, обрабатываемой в патроне – 400 мм; количество частот вращения шпинделя – 12, диапазон частот вращения шпинделя – 45–2000 мин<sup>-1</sup>; количество продольных и поперечных (круговых) подач – 12, диапазон подач: продольных – 0,035–1,6 мм/об, поперечных (круговых) – 0,02–0,8 мм/об.

Формообразующая часть кинематической структуры станка включает две основные частные структуры: токарную  $\Phi_v(B_1)$ ,  $\Phi_{s1}(II_2)$  для продольной обработки и токарную  $\Phi_v(B_1)$ ,  $\Phi_{s2}(B_3)$  для поперечной (торцевой) обработки. Группа скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  входит в обе частные структуры. Переход от одной структуры к другой осуществляется посредством механизмов управления станка.

Структура для продольной обработки состоит из простых групп скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  и продольной подачи  $\Phi_{s1}(II_2)$ , соединенных между собой электродвигателем  $M$  и общей частью внешних связей шкив  $20$ , установленный на валу электродвигателя – выходной вал  $IV$  коробки скоростей  $КС$ .

Группа  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую (окружность) обрабатываемой поверхности. Ее внутренняя связь:

*подшипниковые опоры шпиндельной коробки → шпиндель III (вал V) ( $B_1$ ).*

Внешняя связь – кинематическая цепь, состоящая из двух зубчато-ременных передач и коробки скоростей  $КС$ , соединяющая двухскоростной электродвигатель  $M$  со шпинделем, являющимся звеном соединения связей:

$$M \rightarrow 20/24 \rightarrow КС \rightarrow 26/30 \rightarrow \text{шпиндель } (B_1).$$

Группа настраивается на скорость изменением круговой частоты электродвигателя и коробкой скоростей  $КС$  (орган настройки  $i_v$ ), на направление – реверсированием направления вращения электродвигателя. При этом переключение частоты вращения шпинделя осуществляется посредством электромагнитных муфт  $M_1 - M_5$  автоматически при смене позиций револьверной головки в соответствующие положения по программе, заданной на штекерной панели пульта управления.

Расчетная цепь для органа настройки на скорость совпадает с внешней связью группы. Поэтому РП для круговой частоты вращения шпинделя имеют вид:

$$n_m \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя} \rightarrow n_i, \{i = 1, 2, 3, \dots, 12\} \text{ шпинделя } (B_1) \text{ мин}^{-1}.$$

Ряд круговых частот шпинделя:

$$\begin{aligned}
 n_1 &= 960 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{34}{46} (M_3) \cdot \frac{32}{48} \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{16}{24} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 45 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_2 &= 1440 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{34}{46} (M_3) \cdot \frac{32}{48} \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{16}{64} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 65 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_3 &= 960 \cdot \frac{20}{24} (M_2) \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{16}{64} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 90 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_4 &= 1440 \cdot \frac{20}{24} (M_2) \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{16}{64} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 135 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_5 &= 960 \cdot \frac{20}{24} (M_1) \cdot \frac{40}{40} \cdot \frac{16}{64} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 170 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_6 &= 1440 \cdot \frac{20}{24} (M_1) \cdot \frac{40}{40} \cdot \frac{16}{64} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 260 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_7 &= 960 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{34}{46} (M_3) \cdot \frac{32}{48} \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 340 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_8 &= 1440 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{34}{46} (M_3) \cdot \frac{32}{48} \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 510 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_8 &= 1440 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{34}{46} (M_3) \cdot \frac{32}{48} \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 510 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_9 &= 960 \cdot \frac{20}{24} (M_2) \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 690 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_{10} &= 1440 \cdot \frac{20}{24} (M_2) \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 1030 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_{11} &= 960 \cdot \frac{20}{24} (M_1) \cdot \frac{40}{40} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 1360 \text{ мин}^{-1}; \\
 n_{12} &= 1440 \cdot \frac{20}{24} (M_1) \cdot \frac{40}{40} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 2000 \text{ мин}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Торможение шпинделя производится одновременным включением муфт  $M_4$  и  $M_5$ .

Группа  $\Phi_{sI}(II_2)$  воспроизводит направляющую (прямую, параллельную линии центров станка) обрабатываемой поверхности. Ее внутренняя связь имеет вид:

*направляющие станины  $\rightarrow$  продольный суппорт ( $II_2$ ).*

Внешняя связь – кинематическая цепь, соединяющая двухскоростной электродвигатель  $M$  с продольным суппортом, являющимся звеном соединения связей, посредством трех зубчато-ременных передач, коробки ско-

ростей  $KC$ , коробки подач  $KП$ , фартука  $\Phi$  и тягового вала (зубчато-реечной передачи):

$M \rightarrow 20/24 \rightarrow KC \rightarrow 27/38 \rightarrow 27/27 \rightarrow KП \rightarrow \Phi \rightarrow 28/39 \rightarrow 2/34 \rightarrow 24/72 \rightarrow$   
 $\rightarrow \text{тяговый вал (зубчато-реечная передача)} \rightarrow \text{продольный суппорт } (\Pi_2).$

Группа настраивается на скорость (продольную подачу) коробкой подач  $KП$  (орган настройки  $i_s$ ), на путь – по упору с отсчетом величины пути по лимбу  $L$ , расположенному на валу  $XVII$  фартука  $\Phi$ . При каждом положении подвижного блока  $18-28$  при смене позиций револьверной головки в соответствующие положения по программе, заданной на штекерной панели пульта управления, автоматически посредством включения соответствующих электромагнитных муфт  $M_6 - M_{10}$  получается шесть ступеней продольной подачи.

Продольная подача включается муфтой  $M_{11}$ , при этом муфта  $M_{12}$  выключена (муфты заблокированы). Ручное перемещение осуществляется маховиком  $P1$  через включенную муфту  $M_{12}$ , передачи  $40/53$ ,  $35/61$  и реечное колесо  $12$  (ведущее звено тягового вала). Автоматическое выключение продольной подачи в каждой позиции осуществляется упорами, установленными на барабане управления (БУ).

В учебнике для вузов [36] утверждается «привод подачи осуществляется от шпинделя (вал  $V$ ) через три зубчато-ременные передачи и коробку подач  $KП...$ ». Данное утверждение наделяет шпиндель – исполнительный орган группы  $\Phi_v(B_1)$  воспроизведения – образующей функцией источника энергии движения для группы  $\Phi_{sl}(\Pi_2)$  воспроизведения направляющей воспроизводимой поверхности. Такой подход к объяснению функции металлорежущих станков, характерный для парадигмы познания, основанной только на принципе возможных перемещений, некорректен. Тем не менее, по сложившейся традиции эта парадигма познания металлорежущих станков доминирует в учебной литературе для вузов [37 и др.].

В современной парадигме познания для объяснения функции кинематической структуры металлорежущих станков используется принцип разветвления энергии движения в кинематических цепях. В частности, в соответствии с этим принципом движения шпинделя и суппорта анализируемого станка осуществляются с выходного вала  $IV$  общего участка внешних связей формообразующих групп станка.

Для станков токарной группы принято задавать подачу относительно  $1$  оборота шпинделя. Для этого на основе принципа возможных перемещений назначается расчетная цепь, как правило, не совпадающая с внешней связью кинематической группы. Из этого правила следует, что расчетная цепь про-

дольных подач анализируемой группы связывает шпиндель станка с тяговым валом. Для этой цепи РП имеют вид:

*1 оборот шпинделя →  $s_{прод.}$  мм перемещения суппорта ( $\Pi_1$ ).*

Минимальная продольная подача:

$$s_{прод.1} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{18}{58} (M_{10}) \cdot \frac{19}{62} \cdot \frac{21}{75} (M_6) \cdot \frac{28}{39} \cdot \frac{2}{34} (M_{11}) \cdot \frac{24}{72} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 12 = 0,035 \text{ мм/об.}$$

Максимальная продольная подача:

$$s_{прод.12} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{28}{48} (M_8) \cdot \frac{42}{39} \cdot \frac{63}{33} (M_7) \cdot \frac{28}{39} \cdot \frac{2}{34} (M_{11}) \cdot \frac{24}{72} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 12 = 1,6 \text{ мм/об.}$$

Группа  $\Phi_{s2}(\Pi_3)$  воспроизводит направляющую обрабатываемой поверхности при торцовой обработке. Ее внутренняя связь:

*подшипниковые опоры → револьверная головка  $\Gamma$  ( $\Pi_3$ ).*

Внешняя связь, соединяющая электродвигатель  $M$  с револьверной головкой, являющейся звеном соединения связей, включает общую с внешней связью группы  $\Phi_{s1}(\Pi_2)$  часть от электродвигателя до вала XIII коробки подач КП и последовательно расположенные передачи 16/32, 32/44, 36/36 (реверс, управляемый муфтой  $M_{13}$ ), 1/33 (муфта  $M_{14}$ ), 19/152.

Группа настраивается на скорость круговой (торцовой) подачи коробкой подач КП, на путь – упорами, на направление – реверсом. Ручное круговое движение подачи осуществляется маховиком  $P2$  при включенной муфте  $M_{14}$ . Ручной поворот револьверной головки при смене позиций осуществляется маховиком  $P3$  при выключенной муфте  $M_{14}$ .

Расчетная цепь круговых подач связывает шпиндель станка с револьверной головкой. Для этой цепи РП имеют вид:

*1 оборот шпинделя →  $s_{кр.}$  мм перемещения револьверной головки ( $\Pi_3$ ).*

Минимальная круговая подача:

$$s_{кр.1} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{18}{58} (M_{10}) \cdot \frac{19}{62} \cdot \frac{21}{75} (M_6) \cdot \frac{16}{32} \cdot \frac{32}{44} \cdot \frac{36}{36} (M_{13}) \cdot \frac{1}{33} \cdot \frac{19}{152} \cdot 2\pi \cdot 100 = 0,02 \text{ мм/об.}$$

Максимальная круговая подача:

$$s_{кр.12} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{28}{48} (M_8) \cdot \frac{42}{39} \cdot \frac{63}{33} (M_7) \cdot \frac{16}{32} \cdot \frac{32}{44} \cdot \frac{36}{36} (M_{13}) \cdot \frac{1}{33} \cdot \frac{19}{152} \cdot 2\pi \cdot 100 = 0,8 \text{ мм/об.}$$

В приведенных формулах 100 – расстояние от оси поворота револьверной головки до осей гнезд для инструментов, равное R (см. рисунок 8.1, б).

При работе станка частоту вращения шпинделя и подачу можно изменять вручную с помощью переключателей. Автоматическое переключение режимов обработки при смене позиций револьверной головки осуществляется через зубчатую передачу 50/50, связанную с коллектором управления КУ, а на штекерной панели пульта управления программируются режимы обработки для каждой позиции головки.

Длину пути суппорта устанавливают в соответствующих позициях револьверной головки, посредством регулируемых упоров на барабане Б.

Для нарезания наружных и внутренних резьб резцами или гребенками в структуре станка предусмотрена также резьбонарезная (винторезная) группа  $\Phi_v(B_1P_4)$ . Ее внутренняя связь:

*(B<sub>1</sub>) шпиндель Ш → 40/40 → 33/33 или 22/44 → копир К → резьбовая гайка → штанга V111 → державка инструмента И (P<sub>4</sub>).*

Внешняя связь совпадает с внешней связью группы  $\Phi_v(B_1)$ , т.е. представляет собой кинематическую (структурную) цепь, связывающую электродвигатель со звеном соединения связей – шпинделем.

Группа настраивается на траекторию, путь и направление сменными комплектами копира К, резьбовой гайкой и блоком зубчатых колес 33–22. Причем при включении передачи 33/33 шаг нарезаемой резьбы равен шагу резьбы копира, а при включении передачи 22/44 – вдвое меньше.

При нарезании резьбы инструмент И закрепляют в державке, связанной со штангой VIII. Штангу поворачивают рукояткой P4, подводя инструмент к заготовке и вводя резьбовую гайку на левом конце штанги в зацепление с резьбовым копиром К. Копир получает вращение от шпинделя через передачу 40/40 и блок зубчатых колес 33–22. При этом резьбовая гайка со штангой VIII и инструментом И движется вдоль оси.

## 8.2 Зубошлифовальный станок модели 5В833

Относится к станкам для шлифования ЦЗК абразивными червяками. Область использования – серийное производство зубчатых колес. Кинемати-

ческая структура формообразующей части станков, работающих червячными кругами, аналогична кинематической структуре зубофрезерных станков, работающих червячными фрезами.

Кинематическая схема зубошлифовального станка модели 5В833 представлена на рисунке 8.2.

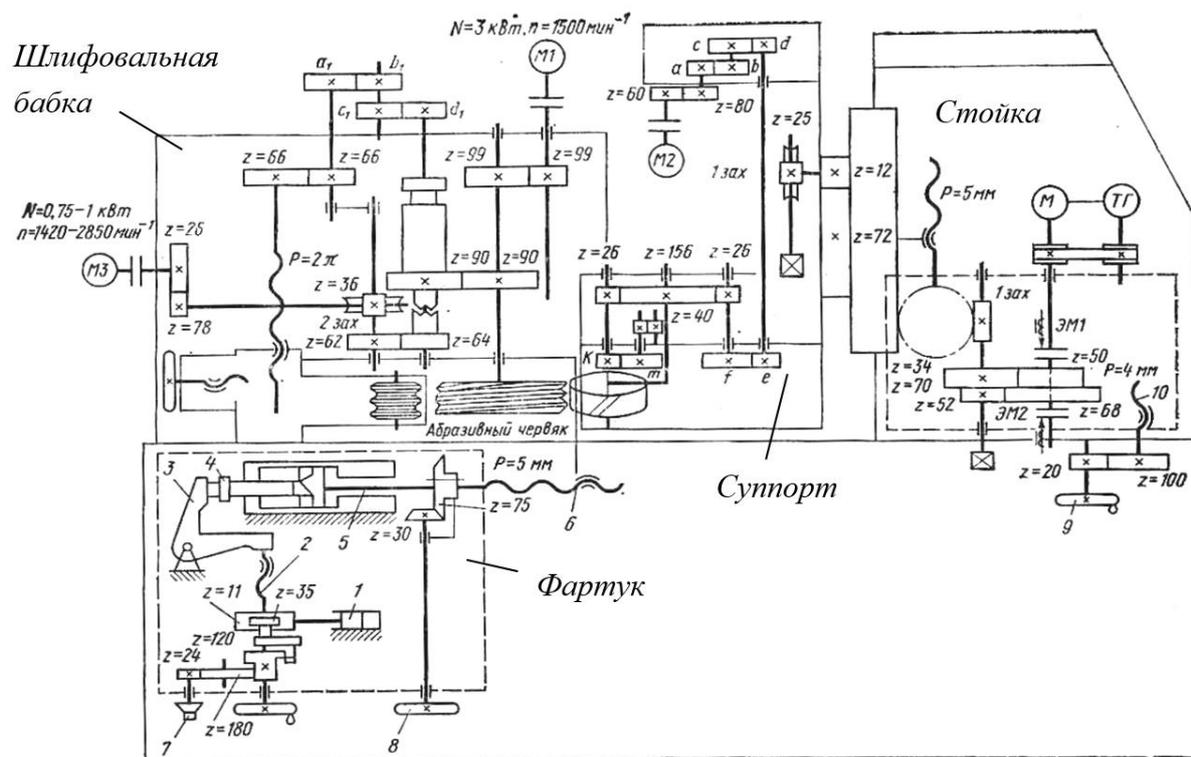


Рисунок 8.2. – Кинематико-компоновочная схема зубошлифовального станка модели 5В833

*Техническая характеристика.* Диаметр шлифуемых ЦЗК с прямыми и винтовыми зубьями – 20–200 мм, модуль 0,3–3 мм, наибольшая высота ЦЗК при  $\beta=0$  – 100 мм, наибольший диаметр абразивного червяка – 400 мм.

Кинематическая структура станка [37] состоит из двух частных структур, из которых одна предназначена для обработки колес с прямыми зубьями, а другая – для обработки колес с винтовыми зубьями.

Формообразующая часть первой из названных частных структур включает сложную группу скорости резания  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящую профиль зубьев, и группу вертикальной подачи  $\Phi_s(P_3)$ , воспроизводящую прямую линию зуба по длине. Формообразующая часть другой частной структуры должна состоять из двух сложных групп:  $\Phi_v(B_1B_2)$ , воспроизводящей профиль зубьев, и  $\Phi_s(P_3B_4)$ , воспроизводящей винтовую линию зуба. Следовательно, в структуре станка должен быть дифференциал для физического сложения движений  $B_2$  и  $B_4$  на одном исполнительном звене – делительном столе, входящем

в обе формообразующие группы. Однако в станке нет дифференциала. Поэтому сложение этих движений осуществляется алгебраически. Условия такого сложения приведены выше при анализе кинематики зубофрезерного станка (см. рисунок 5.5). В итоге обе группы обсуждаемой структуры трансформируются к виду  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_4)$  и  $\Phi_s(P_3 * B_1)$ .

Группа обката  $\Phi_v(B_1B_2)$  при профилировании воспроизводит станочное зацепление червяк – червячное колесо. Ее особенность – применение двух синхронных электродвигателей и «электрического вала», или синхронной электрической связи между осуществляющей согласование круговых частот электродвигателей.

Внутренняя связь группы:

*абразивный червяк* ( $B_1$ )  $\leftarrow 99/99 \leftarrow M_1 \leftarrow$  «электрический вал»  $\rightarrow$   
 $\rightarrow M_2 \rightarrow 60/80 \rightarrow [i_x=(a/b) (c/d) (e/f)] \rightarrow 26/156 \rightarrow$   
 $\rightarrow$ шлифуемое колесо [ $(B_2)$  или  $(B_2 \pm B_4)$ ].

Внешняя связь – выходное звено электрического вала, обеспечивающее синхронизацию круговых частот обоих электродвигателей.

Группа настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_x$ . Орган настройки на скорость не предусмотрен. Поэтому скорость резания зависит только от диаметра абразивного круга.

Выведем ФН для гитары  $i_x$ . РП при шлифовании прямозубого колеса имеет вид:

$1$  об. абразивного червяка ( $B_1$ )  $\rightarrow k/z$  об. шлифуемого колеса ( $B_2$ ).

Тогда УКЦ:

$$k/z = 1 \cdot (99/99) \cdot (n_{M1}=1500 / n_{M2}=1500) \cdot (60/80) \cdot [i_x=(a/b) (c/d) (e/f)] \cdot (26/156).$$

Откуда ФН при однозаходном абразивном червяке ( $k = 1$ ):

– для  $z = 12 - 24$  при  $e/f = 58/58$ ,  $i_x = (a/b) (c/d) = 8/z$ ;

– для  $z = 24 - 200$  при  $e/f = 29/87$ ,  $i_x = (a/b) (c/d) = 8/3z$ .

РП при шлифовании колеса с винтовым зубом имеют вид:

$1$  об. абразивного червяка ( $B_1$ )  $\rightarrow z/k (1 \pm s_g/T)$  об. шлиф. колеса ( $B_2 \pm B_4$ ),

где  $T$  – шаг винтовой линии зуба шлифуемого колеса;

$s_g$  – вертикальная подача червяка.

Тогда УКЦ:

$$z/k (1 \pm s_g/T) = 1 \cdot (99/99) \cdot (1500/1500) \cdot i_x.$$

Откуда ФН при  $e/f = 58/58$ :

$$i_x = (a/b) (c/d) = 8 / [z(1 \pm s_g/T)].$$

Правила выбора знаков «+» или «-» и установки абразивного червяка такие же, как и при установке червячной фрезы при обработке ЦЗК.

Для создания постоянного момента на шпинделе шлифуемого колеса и выборки зазора кинематической цепи электродвигатель  $M_2$  – шпиндель установлен гидротормоз, вращающийся от шпиндельной шестерни 156, через шестерню 26 и сменные шестерни  $k$  и  $m$ .

Группа  $\Phi_s(P_3 * B_1)$  сообщает поступательно-возвратное движение вертикальной подачи суппорту шлифуемого колеса. Внутренняя связь группы:

*вертикальные направляющие стойки → суппорт.*

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$M \rightarrow 50/70$  (или  $68/52$ )  $\rightarrow 1/34 \rightarrow ТВ \rightarrow$  суппорт ( $P_3$ ).

В этой группе используется регулируемый электродвигатель. Диапазон его регулирования совместно с двухступенчатым перебором, переключаемым электромагнитными муфтами ЭМ1 и ЭМ2, обеспечивает подачу 3,78–165 мм/мин. Другие параметры настройки: исходная точка, путь и направление устанавливаются по упорам, обеспечивающим соответствующие переключения в схеме электроавтоматики. Одновременно с изменением направления движения вертикальной подачи синхронно изменяется направление движения  $\Phi_v(B_1 B_2)$ .

В станке предусмотрены также кинематические группы врезания и правки абразивного круга. Группа врезания  $Vp(P_4)$  – простая. Ее внутренняя связь:

*горизонтальные направляющие → шлифовальная бабка.*

Внешняя связь:

*гидроцилиндр 1 → шестерня 35 → храповой механизм →  
→ винт 2 → рычаг 3 → следящий золотник 4 →  
→ гидроцилиндр 5 с поршнем-винтом 6 → шлифовальная бабка ( $P_4$ ).*

Группа работает следующим образом. По команде от системы управления рейка поршень гидроцилиндра 1 сообщает качательное движение шестерне 35, связанной с водилом собачки храпового механизма. Собачка поворачивает храповое колесо 120, а вместе с ним винт 2, который через рычаг 3 перемещает следящий золотник 4, перемещающий поршень-винт 6 гидроцилиндра 5 вместе с шлифовальной бабкой. Подачу врезания (параметр «скорость») настраивают по лимбу 7 через зубчатую передачу 24/180 на храповое колесо 120. Диапазон радиальной подачи врезания на один ход суппорта 0,02–0,08 мм. Команда на радиальное смещение шлифовальной бабки осуществляется от гидроэлектрического золотника, управляющего рейкой-порш-

нем, при подаче сигналов от конечного выключателя, установленного на стойке и регистрирующего крайнее положение при ходе суппорта шлифуемого колеса. Наладочное радиальное перемещение шлифовальной бабки осуществляют вручную от маховика 8 через передачу 30/75 на винт 6.

Вспомогательная группа правки абразивного червяка  $Vc(B_5П_6)$  – сложная. Ее внутренняя связь имеет вид:

$$(B_5) \text{ накатник} \leftarrow \text{абразивный червяк} \leftarrow 90/90 \leftarrow \\ \leftarrow 1 / [i_y = (a_1/b_1) (c_1/d_1)] \rightarrow 66/66 \rightarrow ТВ (П_6).$$

Внешняя связь:

$$M_3 \rightarrow 26/78 \rightarrow 2/36 \rightarrow \text{вал, несущий колесо } z = 66.$$

Группа настраивается на траекторию гитарой  $i_y$ , на скорость – изменением круговой частоты двухскоростного электродвигателя  $M_3$ , на путь и исходную точку – упорами системы управления.

Гитара  $i_y$ . РП имеют вид:

$1 \text{ об. абразивного червяка} \rightarrow \pi t_n \text{ перемещения накатника на шаг червяка,}$

где  $t_n$  – модуль нормальный абразивного червяка.

Тогда УКЦ:

$$\pi t_n = 1 (90/90) i_y (66/66) (t_{ТВ} = 2\pi). \text{ ФН: } i_y = t_n/2.$$

Модуль многониточного накатника равен или больше в целое число раз нормального модуля абразивного червяка.

Абразивный червяк правится при малых скоростях и выключенном электродвигателе  $M_1$  по расчетной кинематической цепи (УКЦ):

$$n = 1420 \text{ или } 2850 (26/78) (2/36) (62/64) (90/90) = 25 \text{ или } 50 \text{ мин}^{-1}.$$

Первое значение круговой частоты абразивного круга используется при правке на рабочем ходе, второе значение – при правке на ускоренном ходе. Правка абразивного червяка бывает предварительная и окончательная и выполняется многониточным накатником или алмазными резцами. Накатник приводится во вращение абразивным червяком. Алмазные резцы устанавливаются вдоль образующих профиля червяка в одной плоскости. Контроль профиля витка абразивного червяка осуществляют микроскопом, устанавливаемым на салазках механизма правки.

Поворот суппорта на угол наклона зуба шлифуемого колеса осуществляют вручную квадратом однозаходного червяка червячного колеса 25. Смещение стойки с суппортом в горизонтальной плоскости для использования рабочей ширины абразивного червяка при шлифовании зубчатых колес осу-

шествляют вручную маховиком 9 через передачу 20/100 и передачу винт – гайка 10. Гидросистема станка обеспечивает зажим шлифуемых колес, поджим заднего подшипника шпинделя абразивного червяка, выбор зазора в делительной цепи гидротормоза и отвод шлифовальной бабки.

### 8.3 Шлицефрезерный станок модели 5350

Основное назначение станка – фрезерование шлицевых валов червячными фрезами. Возможно также фрезерование вал-шестерен. Область использования – серийное производство. Кинематико-компоновочная схема станка представлена на рисунке 8.3.

*Техническая характеристика.* Максимальный диаметр фрезерования – 150 мм. Максимальная длина фрезерования – 1925 мм. Максимальный модуль – 6 мм. Максимальный диаметр фрезы – 140 мм. Количество нарезаемых шлицев (зубьев) – 4...36. Количество круговых частот фрезерного шпинделя – 6. Пределы круговых частот шпинделя 80...230 мин<sup>-1</sup>. Количество подач – 12. Пределы подач 0,63...5 об/мин. Скорость позиционирования каретки – 1,92 м/мин.

На станке можно фрезеровать червячными шлицевыми и модульными фрезами прямобочные и эвольвентные шлицы и вал-шестерни с прямым и винтовым зубом. Следовательно, станок должен содержать две частные кинематические структуры, из которых одна предназначена для обработки прямых шлицев и цилиндрических прямозубых колес, а другая для обработки винтовых шлицев и винтовых (косозубых) колес.

Рассмотрим частную кинематическую структуру для нарезания валов с винтовыми шлицами и винтовых (косозубых) колес.

Червячная фреза представляет собой совокупность исходных режущих реек, расположенных на цилиндре и смещенных одна относительно другой по винтовой линии. Режущий контур зубьев, каждый из которых имеет правую и левую режущие кромки в виде материальных линий, очерчен отрезками прямых для прямобочного шлица и отрезками левой и правой эвольвент для эвольвентного шлица (зуба колеса). Размеры режущих зубьев обычно соответствуют размерам впадин между нарезаемыми шлицами (зубьями), а их геометрическое взаимное положение обусловлено необходимостью выполнения делительного процесса и определяется окружным шагом нарезаемого шлицевого вала (зубчатого колеса). Форма режущей кромки червячной

фрезы и форма профиля зуба или шлица нарезаемого вала различаются между собой. Поэтому профили шлицев (зубьев) можно получить только методом обката. Воспроизводящая винтовая линия по длине шлица (зуба) образуется методом касания, так как образуемая винтовая линия является касательной к ряду дополнительных окружностей, создаваемых вращающимися материальными точками воспроизводящего режущего контура. Таким образом, образование боковой поверхности винтового шлица (зуба) будет осуществляться сочетанием обката (профиль шлица или зуба) и касания (линия шлица или зуба по длине).

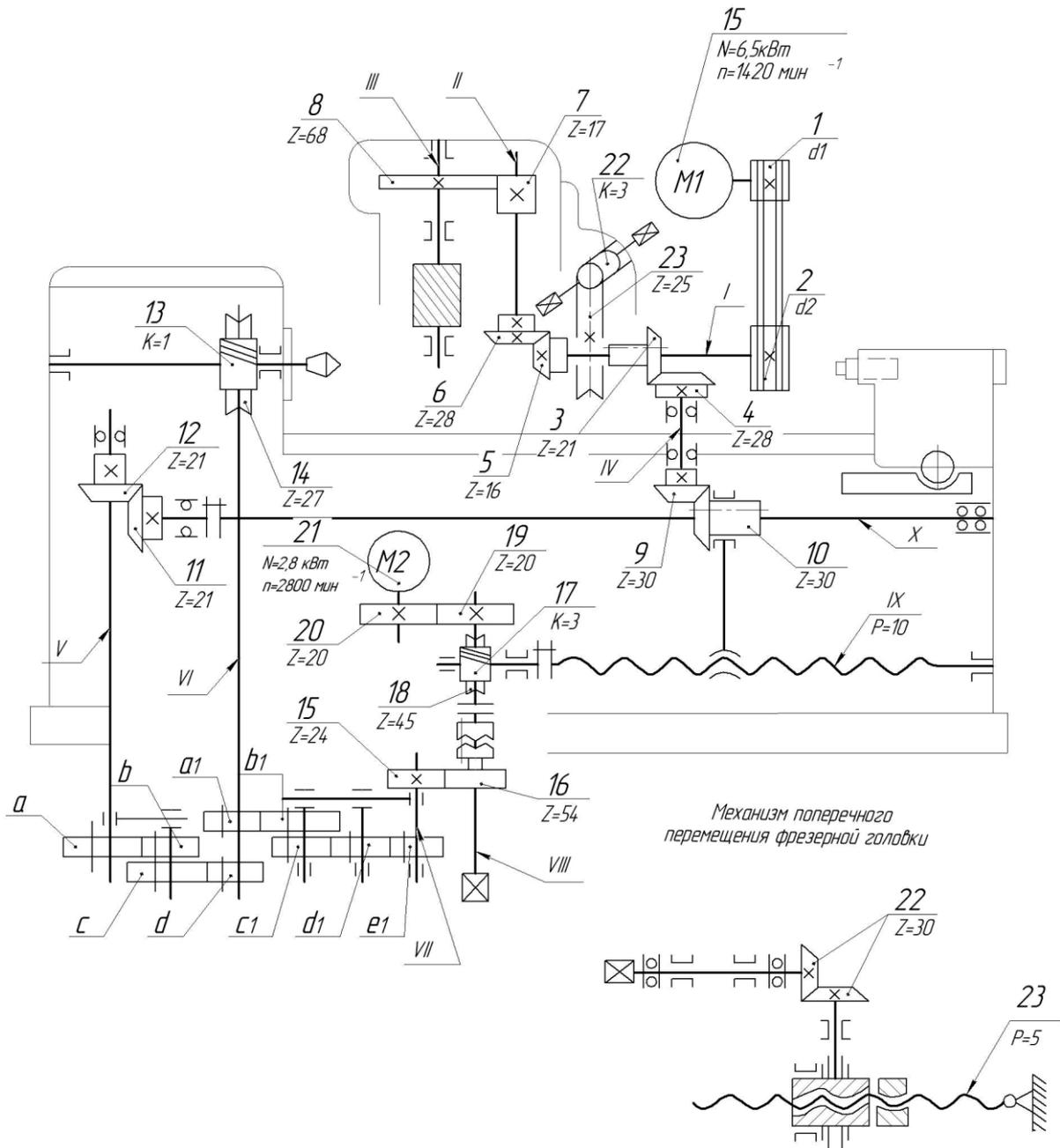


Рисунок 8.3. – Кинематико-компоновочная схема станка модели 5350

По методу образования поверхности устанавливаем количество движений формообразования. Для воспроизведения профиля обкатом требуется одно сложное движение формообразования, состоящее из двух функционально связанных элементарных (простых) движений, а для воспроизведения линии по длине касанием – составное движение, состоящее из двух функционально не связанных простых движений формообразования.

При фрезеровании червячными фрезами процессы деления и врезания осуществляются попутно в процессе формообразования. Следовательно, основная часть структуры станка должна состоять только из формообразующих групп.

По форме производящих геометрических линий образуемой поверхности и форме режущей кромки инструмента определяем состав каждого исполнительного движения и составляем условную запись этих движений.

При формообразовании винтового шлица (зуба) червячной фрезой кинематическая структура станка должна воспроизводить два сложных движения формообразования: движение обката (скорости резания)  $\Phi_v(B_1B_2)$  и винторезное движение (подачи)  $\Phi_s(P_3B_4)$ .

По условной записи исполнительных движений находим исполнительные звенья, совершающие соответствующие элементарные движения. В анализируемом станке такими звеньями являются шпиндель 1 фрезы, шпиндель 2 заготовки и фрезерная головка 3. Таким образом, четыре элементарных движения осуществляют только три подвижных звена. Следовательно, общему исполнительному звену (шпинделю 2) приходится совершать два элементарных движения  $B_1$  и  $B_4$ .

Два элементарных движения на одном звене физически суммируются с помощью дифференциала. Однако в кинематике станка он отсутствует. Слагаемые движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их одинакова и создаются они одним источником движения. Следовательно, эти движения суммируются математически без дифференциала. В этом случае запись исполнительных движений будет иной –  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_4)$  и  $\Phi_s(P_3 * B_1)$ . При этом между кинематическими группами обязательно должна быть кинематическая связь.

Анализируем состав кинематических групп. Группа формообразования, создающая движение обката  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_4)$ . Движение сложное, двухэлементарное, замкнутое, имитирует зацепление червячной передачи.

Внутренняя связь группы:

$$B_1 \leftarrow \frac{68}{17} \leftarrow \frac{24}{16} \leftarrow \frac{21}{28} \leftarrow \frac{30}{30} \rightarrow \frac{21}{21} \rightarrow [i_x = \frac{a}{b} \frac{c}{d}] \rightarrow \frac{1}{27} \rightarrow B_2 \pm B_4.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow [i_v = \frac{d_1}{d_2}] \rightarrow Z_{21} \text{ (звено соединения связей).}$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_x$ , на скорость резания – сменными шкивами  $i_v$ .

Группа формообразования, создающая движение подачи  $\Phi_s(\Pi_3 * B_1)$ . Движение подачи элементарное, незамкнутое. Внутренняя связь группы – поступательная пара:

*суппорт фрезерной головки → направляющие станины.*

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow [i_v = \frac{d_1}{d_2}] \rightarrow \frac{21}{28} \rightarrow \frac{30}{30} \rightarrow \frac{21}{21} \rightarrow [i_x = \frac{a}{b} \frac{c}{d}] \rightarrow [i_s = \frac{a_1}{b_1} \frac{c_1}{d_1} \frac{d_1}{e_1}] \rightarrow \\ \rightarrow \frac{24}{54} \rightarrow \frac{3}{45} \rightarrow TB \rightarrow \Pi_3 * B_1.$$

Группа настраивается по четырем параметрам: на скорость (подачу) – гитарой  $i_s$ , на путь и исходную точку – упорами системы управления, на направление – реверсом, совмещенным с гитарой  $i_s$ .

Из приведенного анализа формообразующих групп  $\Phi_v(B_1 B_2 \pm B_4)$  и  $\Phi_s(\Pi_3 * B_1)$  следует, что часть внутренней связи группы  $\Phi_v$  является также частью внешней связи группы  $\Phi_s$ . Это обстоятельство подтверждает наличие между формообразующими группами кинематической связи. Следовательно, рассмотренное выше математическое сложение двух вращательных движений  $B_2 \pm B_4$  на одном исполнительном звене справедливо. Уместно отметить, что исключение из кинематической структуры дифференциала при прочих равных условиях повышает кинематическую точность внутренней связи сложной кинематической группы  $\Phi_v$ . Следствием этого является повышение точности кинематического параметра детали – шага винтовой линии шлица или зуба колеса.

В схеме предусмотрена ненастраиваемая вспомогательная группа  $Vc(\Pi_5)$  для ускоренного перемещения фрезерной головки при наладке станка с приводом от отдельного электродвигателя  $M_2$ . Ее внутренняя связь совпадает с внутренней связью группы  $\Phi_s$ . Внешняя связь этой группы имеет вид:

$$M_2 \rightarrow \frac{3}{45} \rightarrow TB \rightarrow \Pi_5.$$

В кинематической структуре станка предусмотрены также группы  $Vc(\Pi_6)$  и  $Vc(\Pi_7)$  с ручным приводом для наладочных перемещений соответственно фрезерной головки и задней бабки.

Для нарезания прямых шлицев и прямозубых колес из сложного движения  $\Phi_v(B_1B_2 \pm B_4)$  исключается элементарное движение  $B_4$  шпинделя заготовки. Формально это не изменяет кинематическую структуру группы  $\Phi_v$ . Однако ее настройка изменяется, так как отпадает необходимость в винтовом движении заготовки относительно инструмента. Таким образом, обе выше названные структуры различаются только настройкой формообразующей группы скорости резания  $\Phi_v$ .

Вывод ФН для органов настройки  $i_x, i_v, i_s$ .

Орган настройки  $i_x$ . Внутренняя связь группы  $\Phi_v$  содержит один орган настройки. Поэтому расчетная цепь для этого органа настройки совпадает с внутренней связью.

При нарезании прямых шлицев за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) фреза делает  $\frac{z}{k}$  оборотов (движение  $B_1$ ) и перемещается по образующей цилиндра на величину  $s$  мм. Для получения винтовых шлицев при перемещении фрезы на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $\frac{s}{T}$  оборота (движение  $B_4$ ), что соответствует дополнительному повороту фрезы на  $\pm(\frac{z}{k}) \cdot (\frac{s}{T})$ .

Следовательно, РП при нарезании винтовых шлицев и косозубых (винтовых) колес имеет вид:

$$1 \text{ об. заготовки } (B_2 \pm B_4) \rightarrow \frac{z}{k} \cdot (1 \pm \frac{s}{T}) \text{ об. фрезы } (B_1),$$

где  $k$  – число заходов фрезы;

$z$  – число нарезаемых шлицев или зубьев колеса;

$T$  – шаг винтовой линии шлицев или зубьев колеса;

$s$  – подача, мм/об заготовки.

Тогда УКЦ:

$$\frac{z}{k} \cdot (1 \pm \frac{s}{T}) = 1 \frac{27}{1} \cdot \frac{1}{i_x} \frac{21}{21} \frac{30}{30} \frac{28}{21} \frac{16}{24} \frac{17}{68}.$$

Откуда ФН:

$$[i_x = \frac{a}{b} \frac{c}{d}] = \frac{6k}{z(1 \pm \frac{s}{T})}.$$

При нарезании прямых шлицев и прямозубых колес РП имеют вид:

$$1 \text{ об. заготовки } (B_2) \rightarrow \frac{z}{k} \text{ об. фрезы } (B_1),$$

Тогда, УКЦ:

$$\frac{z}{k} = 1 \frac{27}{1} \cdot \frac{1}{i_x} \frac{21}{21} \frac{30}{30} \frac{28}{21} \frac{16}{24} \frac{17}{68}.$$

Откуда ФН:

$$[i_x = \frac{a}{b} \frac{c}{d}] = \frac{6k}{z}.$$

Орган настройки  $i_v$ . Согласно нормативам резания при фрезеровании скорость резания принимается по круговой частоте фрезы. Поэтому, расчетная цепь для  $i_v$  – это кинематическая цепь, связывающая электродвигатель  $M_I$  с фрезой. Следовательно, РП имеют вид:

$$n_{M_I} \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{фр} \text{ мин}^{-1}(B_I).$$

Тогда УКЦ:

$$n_{фр} = [n_{M_I} = 1420] i_v \cdot \frac{16}{24} \cdot \frac{17}{68}.$$

Откуда ФН:

$$[i_v = \frac{d_1}{d_2}] \cong \frac{n_{фр}}{240}.$$

Орган настройки  $i_s$ . Расчетная цепь – это кинематическая цепь, связывающая шпиндель заготовки с тяговым валом фрезерной головки. Поэтому, РП имеют вид:

$$l \text{ об. заготовки} \rightarrow s \text{ мм продольного перемещения фрезы.}$$

Тогда УКЦ:

$$s = l \cdot \frac{1}{27} \cdot [i_s = \frac{a_1}{b_1} \frac{c_1}{d_1} \frac{d_1}{e_1}] \frac{25}{54} \frac{3}{45} [P_{TB} = 10]$$

Откуда ФН:

$$i_s \cong \frac{s}{90}.$$

Ускоренное перемещение фрезерной головки при наладке станка осуществляется вспомогательной, ненастраиваемой группой  $Bc(II_5)$ . Подача ускоренного перемещения определяется по формуле:

$$i_s = [M_2 = 2800] \frac{3}{45} [P_{TB} = 10] \cong 1,86 \text{ м/мин.}$$

## 8.4 Универсальный токарно-затыловочный станок модели 1Б811

Затылование – это специальный вид обработки задних поверхностей зубьев режущих инструментов. Чаще всего затылуют зубья фрез дисковых, цилиндрических с прямолинейными и спиральными стружечными канавками, резьбовых и червячных, а также зубья метчиков.

Фрезы с затылованными зубьями (рисунок 8.4, *a*) перетачивают только по передним поверхностям, причем плоскость заточки проходит через ось фрезы, благодаря чему профиль зубьев и задний угол сохраняются неизменными. Поэтому фрезы, применяемые для обработки фасонных поверхностей, обязательно подвергают затылованию. Затылование зубьев обычно производят по архимедовой спирали.

Во время затылования заготовка *1* (рисунок 8.4, *б*) равномерно вращается, а резец *2* совершает поступательно-возвратное перемещение – движение затылования. Перемещение резца осуществляется от равномерно вращающегося кулачка *3*, профиль которого выбирают в зависимости от спада *h* затылка зуба фрезы (рисунок 8.4, *в*). Приблизительно

$$h = \pi D \operatorname{tg} \alpha / z,$$

где  $D$  – диаметр фрезы;  
 $z$  – число зубьев фрезы;  
 $\alpha$  – задний угол.

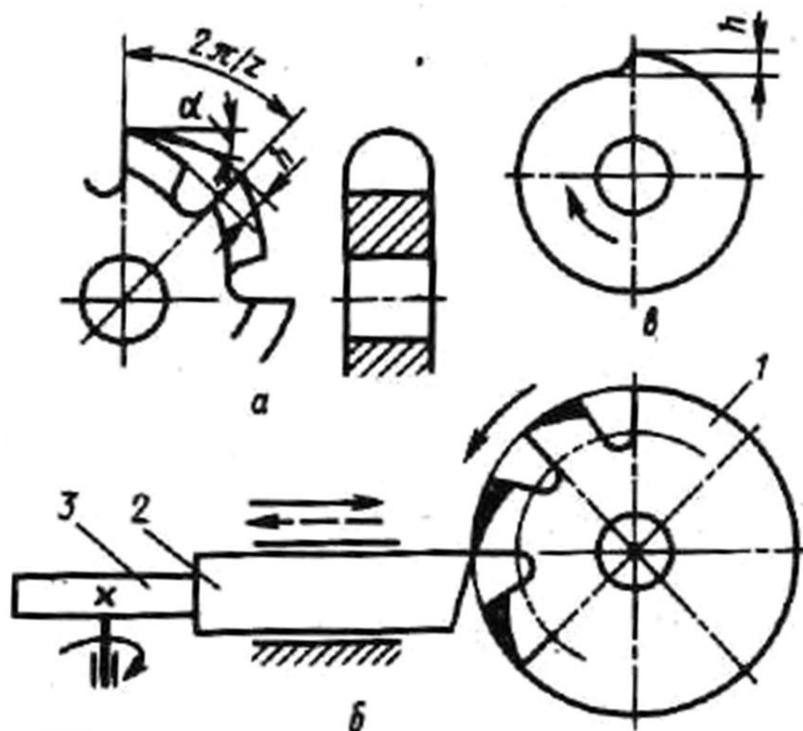


Рисунок 8.4. – Способ затылования зубьев дисковой фрезы

При затыловании за один оборот заготовки фрезы резец должен подойти к ней столько раз, сколько зубьев у фрезы.

При затыловании дисковых фрез, когда периметр профиля зуба невелик, применяют один фасонный резец. Во время обработки заготовка фрезы получает равномерное вращение, а резец – движение затылования и подачу

на глубину резания. При затыловании цилиндрических фрез с прямолинейными стружечными канавками резец дополнительно перемещается параллельно оси заготовки. При затыловании цилиндрических фрез со спиральными стружечными канавками необходимо, чтобы резец, перемещаясь вдоль оси заготовки, следовал бы по спиральной линии зуба.

Класс образования поверхности при затыловании копирование – след ( $E - H^C$ ). Следовательно, формообразующая часть кинематической структуры станка должна содержать одну сложную двухэлементарную или трехэлементарную кинематическую группу.

Рассмотрим вывод общего уравнения затылования на примере затылования червячной фрезы [37]. Червячная фреза (рисунок 8.5, а) имеет резьбовую нарезку с шагом  $P$  и спиральные стружечные канавки с шагом  $T$ , которые выполнены перпендикулярно винтовой нарезки. На рисунке 8.5, б приведена развертка червячной фрезы, где  $k-f$  – направление спиральной стружечной канавки, а линии, перпендикулярные ей, – винтовая нарезка,  $D$  – диаметр червячной фрезы.

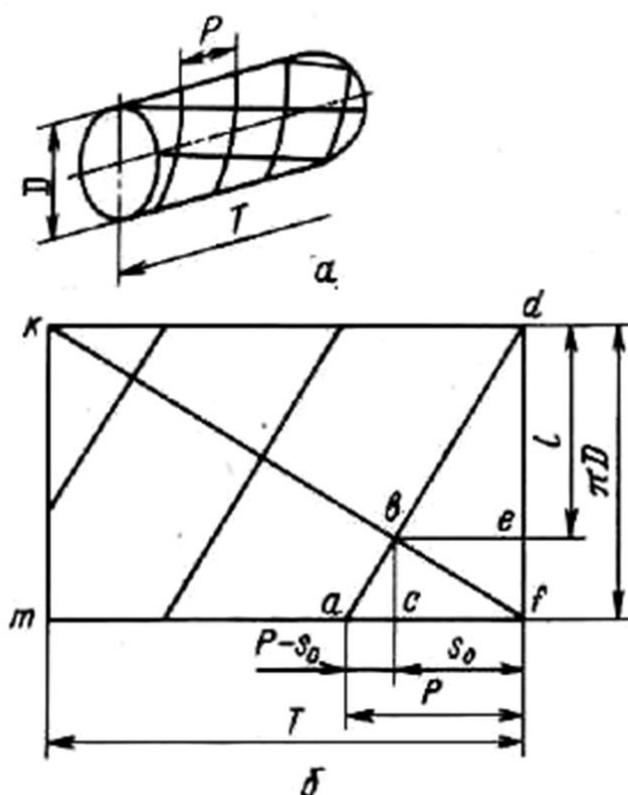


Рисунок 8.5. – Развертка червячной фрезы

Во время затылования резец при продольном перемещении должен за один цикл обработки переместиться на величину  $s_0$ , для того чтобы он пришел в точку  $b$ , находящуюся на линии спиральной стружечной канавки.

Из подобия треугольников  $\Delta adf \sim \Delta bde$  (рисунок 8.5, б) определим обороты заготовки за один цикл затылования

$$l/\pi d = be/af = s_0/P.$$

Выразим отношение  $s_0/P$  через известные величины  $P$  и  $T$ . Тогда из подобия треугольников  $\Delta abc \sim \Delta adf$  и  $\Delta bfc \sim \Delta kfm$  получим

$$bc/\pi D = (P-s_0)/P \text{ и } bc/\pi D = s_0/T.$$

Таким образом,

$$(P-s_0)/P = s_0/T \text{ или } P/T = (P-s_0)/s_0 = (P/s_0) - 1; (T+P)/T = P/s_0,$$

и окончательно

$$s_0/P = T/(T+P).$$

За один цикл затылования кулачок должен выполнить один оборот, тогда РП кинематической связи может быть записано в виде

$$T/(T+P) \text{ оборота заготовки} \rightarrow 1 \text{ обороту кулачка.}$$

Однако расчет настройки расчетной цепи затылования, как правило, ведут на один оборот заготовки. Поэтому разделим обе части РП кинематической связи на величину  $T/(T+P)$ , тогда получим

$$1 \text{ оборот заготовки} \rightarrow (T+P)/T \text{ кулачка.}$$

Это соответствует условию, что затылуемая фреза имеет один зуб. Если же затылуемая фреза имеет  $z$  зубьев, тогда

$$1 \text{ оборот заготовки} \rightarrow z (T+P)/T \text{ оборота кулачка.}$$

Или окончательно

$$1 \text{ оборот заготовки} \rightarrow z + zP/T \text{ оборота кулачка.}$$

Это и есть общее РП, или уравнение затылования. Это уравнение получено при условии, что кулачок имеет один рабочий профиль. В современных затыловочных станках, как правило, используют несколько кулачков с различным числом  $k$  рабочих профилей. Например, во всех модификациях станка модели 1811 используется три сменных кулачка с одним, двумя и тремя рабочими профилями. Введем в уравнение затылования поправку на  $k$  рабочих профилей. Тогда уравнение затылования примет вид

$$1 \text{ оборот заготовки} \rightarrow z/k + z/k (P/T) \text{ или } z/k (1 + P/T) \text{ оборота кулачка.}$$

В современных универсальных затыловочных станках при затыловании цилиндрических фрез и метчиков со спиральными стружечными канавками или червячных фрез первое слагаемое  $z/k$  выполняется цепью затылования,

а второе –  $z/k(P/T)$  дифференциальной цепью. При этом в кинематической структуре обе названные цепи соединены между собой планетарным дифференциалом. При затыловании цилиндрических фрез с прямолинейными стружечными канавками второе слагаемое равно нулю, так как  $T = \infty$ .

В специализированных бездифференциальных станках более ранних выпусков, например, в станке модели 1708 (США) осуществляется бездифференциальная настройка по приведенному уравнению затылования.

При затыловании многозубого инструмента необходимо также движение деления. Это движение в зависимости от затылуемого инструмента может быть элементарным (при затыловании дисковой фрезы) или двухэлементарным винтовым (при затыловании червячной фрезы). Движение деления осуществляется после затылования каждого очередного зуба затылуемого инструмента. При этом движение деления является частью сложного формообразующего движения и, следовательно, выполняется формообразующей группой.

На рисунке 8.6 представлена кинематическая схема универсального токарно-затыловочного станка модели 1Б811. Назначение станка – затылование червячных фрез с прямыми и винтовыми стружечными канавками, модульных и фасонных фрез. Область использования – серийное производство режущих инструментов.

*Техническая характеристика.* Максимальный диаметр затылуемых инструментов – 250 мм. Максимальный модуль – 8 мм. Максимальное число затылуемых зубьев – 40. Шаг винтовой нарезки затылуемых зубьев – 0,5...240 мм. Длина фрезерования – 1925 мм. Расстояние между центрами – не более 530 мм.

Кинематическая структура станка состоит из нескольких частных структур, каждая из которых реализует вполне определенный способ формообразующей обработки.

Частная кинематическая структура для затылования червячных модульных фрез состоит из сложной трехэлементарной группы формообразования  $\Phi_v(B_1\Pi_2\Pi_3)$ . Эта группа во внутренней связи содержит две кинематические цепи:

- цепь деления, связывающую шпиндель с кулачком и состоящую из двух параллельных ветвей, соединенных коническим дифференциалом;
- винторезную цепь, связывающую шпиндель с ходовым винтом.

Первая ветвь цепи деления:

$$\begin{aligned} \text{шпиндель } (B_1) &\rightarrow 96/24 \rightarrow (80/20 \text{ или } 50/50) \rightarrow 44/36 \rightarrow 45/47 \\ &\rightarrow 47/33 \rightarrow \Sigma \rightarrow i_x \rightarrow 27/27 \rightarrow \text{кулачок} \rightarrow \text{суппорт } (\Pi_2). \end{aligned}$$

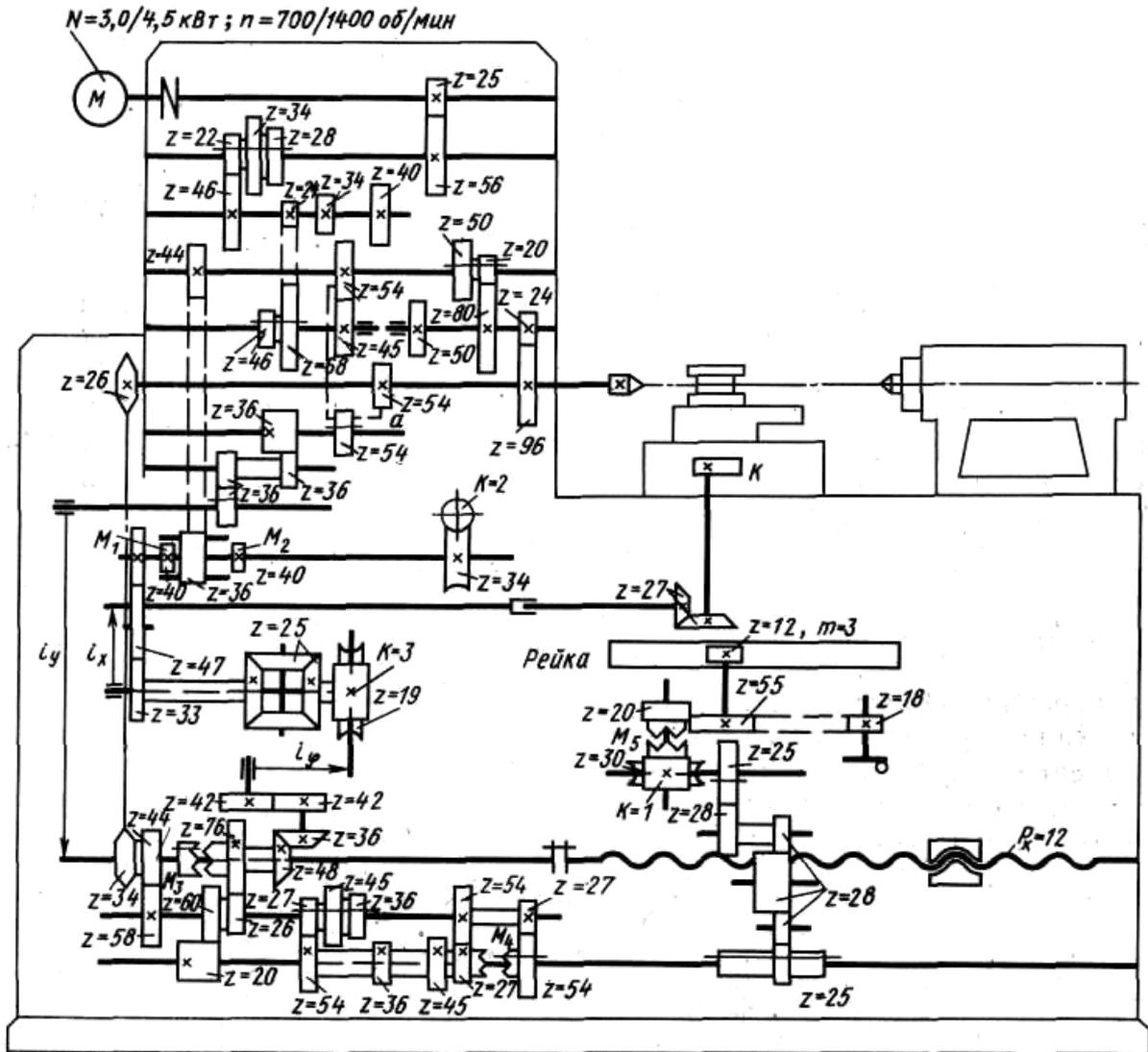


Рисунок 8.6. – Кинематико-компоновочная схема универсального токарно-затыловочного станка модели 1Б811

Вторая ветвь цепи деления:

шпиндель ( $B_1$ )  $\rightarrow$  ((96/24) (80/20) (54/54)) или ((96/24) (50/50) (54/54))  
или (54/54)  $\rightarrow$  (36/36 реверс)  $\rightarrow i_y \rightarrow 48/36 \rightarrow 42/42 \rightarrow i_\phi \rightarrow 3/19 \rightarrow \Sigma \rightarrow$   
 $\rightarrow i_x \rightarrow 27/27 \rightarrow$  кулачок  $\rightarrow$  суппорт ( $\Pi_2$ ).

Винторезная цепь:

шпиндель ( $B_1$ )  $\rightarrow$  ((96/24)  $\rightarrow$  (80/20) (54/54)) или ((96/24) (50/50) (54/54)) или  
(54/54) (36/36 реверс)  $\rightarrow i_y \rightarrow$  тяговый вал  $P_x \rightarrow$  суппорт ( $\Pi_3$ ).

Внешняя связь группы:

$M \rightarrow 25/56 \rightarrow 34/34$  или  $22/46$  или  $28/40 \rightarrow 46/46$  или  $24/68 \rightarrow 45/54 \rightarrow$   
 $\rightarrow 50/50$  или  $20/80 \rightarrow 24/96 \rightarrow$  шпиндель (звено соединения связей).

Движение, воспроизводимое группой – сложное с незамкнутой траекторией, и настраивается по следующим параметрам: траектория – гитарами  $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_\varphi$  и кулачком, скорость – коробкой скоростей  $i_v$ , путь и исходное положение – кулачком и лимбом (упором). При этом кулачок выполняет также функцию специального реверса и отсчетного звена в движении деления.

Рассмотрим настройку станка. Исходными данными для расчета настройки являются параметры затылуемой фрезы и режимы резания.

Гитара  $i_x$ . Расчетная цепь совпадает с первой ветвью цепи деления. В соответствии с общим уравнением затылования РП для расчетной цепи имеют вид:

*1 оборот шпинделя  $\rightarrow z/k$  оборотов кулачка.*

Тогда УКЦ (муфта  $M_1$  включена):

$$z/k = (96/24) ((80/20) \text{ или } (50/50)) (44/36) (45/43) (i_\Sigma = 1/2) i_x (27/27).$$

Откуда ФН:

$$i_{x1} = 3z/10k; \quad i_{x2} = 3z/40k.$$

Первое значение используется при затыловании фрез с  $z = 1-10$ , а второе – при  $z = 4-40$ .

При затыловании вращающийся кулачок, соприкасаясь с пальцем, запрессованным в плите суппорта, сообщает последнему поступательно-возвратное движение.

Гитара  $i_y$ . Расчетная цепь совпадает с винторезной цепью внутренней связи. Поэтому РП имеют вид:

*1 об. шпинделя  $\rightarrow P$  мм перемещения суппорта.*

Тогда УКЦ:

$$P = 1 [(96/24)((80/20)(54/54) \text{ или } (50/50)(54/54))] \text{ или } (54/54)(36/36) i_y (P_x = 12).$$

Откуда ФН:

$$i_{y1} = P/12; \quad i_{y2} = P/48; \quad i_{y3} = P/192.$$

Гитара  $i_\varphi$ . Дифференциальное движение обеспечивает при затыловании червячных фрез со спиральными стружечными канавками дополнительный поворот кулачка затылования, от которого перемещается резец в радиальном направлении при продольном перемещении суппорта. Возможны следующие три расчетные цепи, включающие гитару  $i_\varphi$ :

- кинематическая цепь, связывающая ходовой винт с кулачком, при включенной муфте  $M_3$ ;
- кинематическая цепь, связывающая зубчато-реечную передачу суппорта с кулачком, при выключенной муфте  $M_3$  и включенной муфте  $M_5$ ;
- кинематическая цепь, связывающая шпиндель станка с кулачком.

РП для первых двух расчетных цепей имеют один и тот же вид:

$P$  мм перемещения суппорта  $\rightarrow zP/kT$  дополнительного поворота кулачка.

УКЦ для первой расчетной цепи:

$$zP/kT = P/(P_x=12) (48/36) (42/42) i_\varphi i_\Sigma i_x (27/27).$$

Тогда ФН:

$$i_\varphi = 114 z/k T i_x.$$

УКЦ для второй расчетной цепи:

$$zP/k T = P/\pi(m=3) (z=12) \cdot (55/20) (30/1) (25/28) (28/25) \\ (20/60) (26/76) (48/36) (42/42) i_\varphi (3/19) i_\Sigma i_x (27/27).$$

Тогда ФН:

$$i_\varphi = 114 z/k T i_x.$$

После подстановки в полученные выражения обоих значений  $i_x$ , получим

$$i_{\varphi 1} = 380/T; i_{\varphi 2} = 1520/T.$$

РП для третьей расчетной цепи согласно общему уравнению затылования имеют вид:

$1$  об. шпинделя  $\rightarrow zP/kT$  дополнительного поворота кулачка.

Тогда УКЦ:

$$zP/kT = 1 [(96/24) ((80/20) (54/54) \text{ или } (50/50) (54/54))] \\ \text{или } (54/54) (36/36) i_y (48/36) (42/42) i_\varphi (3/19) i_\Sigma i_x 27/27.$$

ФН получим после подстановки в УКЦ значений  $i_y, i_x, i_\Sigma$

$$i_{\varphi 1} = 380/T; i_{\varphi 2} = 1520/T.$$

Таким образом, при использовании любой из трех расчетных цепей, различающихся между собой количеством передач и конечными, исполнительными звеньями, получаем одну и ту же ФН для рассматриваемой гитары. Данный пример подтверждает тезис о возможности в ряде сложных кинематических структур искусственно назначать для одного и того органа настройки более одной расчетной цепи.

При обработке фрез с правыми спиральными стружечными канавками в гитару  $i_y$  дополнительно устанавливают паразитную сменную шестерню.

Коробка  $i_v$  круговых частот вращения шпинделя. Это движение осуществляется от двухскоростного асинхронного электродвигателя. Прямое (рабочее) вращение осуществляется при  $n_M = 700 \text{ мин}^{-1}$ .

РП для органа настройки  $i_v$ :

$n_M \text{ мин}^{-1}$  оборотов электродвигателя  $\rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1}$  оборотов шпинделя.

Тогда УКЦ:

$$n_{ш} = (n_M = 700) (25/56) ((22/46) \text{ или } (34/34) \text{ или } (28/40)) \\ ((46/46) \text{ или } (24/68)) (45/54) ((50/50) \text{ или } (20/80)) (24/96).$$

В соответствии с УКЦ коробка обеспечивает 12 частот вращения шпинделя в пределах 2,8–63 мин<sup>-1</sup>. Обратное вращение осуществляется реверсированием электродвигателя при  $n_M = 1400$  мин<sup>-1</sup>, при этом частота вращения шпинделя в два раза выше, чем при рабочем ходе.

Частная кинематическая структура  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  для затылования дисковых фрез образуется из рассмотренной структуры для затылования червячных фрез посредством исключения из ее внутренней связи второй ветви цепи деления, называемой дифференциальной, и винторезной цепи. Рассматриваемая структура, состоящая из сложной двухэлементарной группы, настраивается на траекторию гитарой  $i_x$ , на скорость – коробкой частот вращения шпинделя  $i_v$ , на путь и исходное положение – кулачком и лимбом. При этом УКЦ для органов настройки  $i_x$  и  $i_v$  не изменяются.

Кинематика станка содержит также классическую токарную структуру для обработки цилиндрических поверхностей. Эта структура состоит из двух простых формообразующих групп: скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  и продольной подачи  $\Phi_s(\Pi_2)$ , получаемых посредством иной коммутации кинематических цепей, образующих затыловочную структуру.

Группа  $\Phi_v(B_1)$ . Ее внутренняя связь – элементарная вращательная пара  
*подшипниковые опоры  $\rightarrow$  шпиндель.*

Внешняя связь совпадает с внешней связью затыловочной структуры. Настройка этой связи рассмотрена при анализе затыловочной структуры.

Группа  $\Phi_s(\Pi_2)$ . Ее внутренняя связь – элементарная поступательная пара  
*направляющие станины  $\rightarrow$  инструментальный суппорт.*

Внешняя связь – кинематическая цепь, соединяющая электродвигатель с инструментальным суппортом. В ее составе коробка круговых частот вращения шпинделя  $i_v$ , коробка продольных подач  $i_s$ , тяговый вал в виде зубчаточной передачи. Группа настраивается на скорость (продольную подачу) коробкой  $i_s$ , на путь и исходное положение – упорами (лимбом).

Коробка  $i_s$  продольных подач соединена со шпинделем цепной передачей. Муфты  $M_1$  и  $M_3$  выключены, а муфта  $M_5$  включена.

РП для коробки подач имеют вид:

*1 об. шпинделя* → *s мм продольного перемещения суппорта.*

Тогда УКЦ:

$$s = 1 \left( \frac{26}{34} \right) \left( \frac{44}{58} \right) \left( \left( \frac{45}{36} \right) \text{ или } \left( \frac{27}{54} \right) \text{ или } \left( \frac{36}{45} \right) \right) i_n \\ \left( \frac{25}{28} \right) \left( \frac{1}{30} \right) \left( \frac{20}{55} \right) (P_{ТВ} = \pi m z = 36 \pi),$$

где  $i_n$  – передаточное отношение перебора, управляемого муфтой  $M_4$ . При включенной муфте  $M_4$   $i_n = 1$ , а при выключенной  $i_n = (27/54) (27/54) = 1/4$ .

Коробка подач обеспечивает шесть значений продольных подач в пределах  $s = 0,1-1,0$  мм/об.

### **8.5 Резьбофрезерный станок-полуавтомат для обработки коротких резьб модели 5М5Б62**

Назначение станка – фрезерования коротких наружных и внутренних резьб групповой (гребенчатой) фрезой. Область использования – крупносерийное производство. Кинематическая схема станка представлена на рисунке 8.7. Компонировка станка отличается от компоновки винторезного станка, нарезающего резьбу резьбовым резцом, в основном, наличием фрезерной головки, установленной на суппорте станка. Класс воспроизведения резьбовой поверхности копирование – след ( $E - H^C$ ).

*Техническая характеристика.* Наибольший диаметр фрезеруемой резьбы, мм: наружный – 100, внутренний – 80. Наибольшая длина фрезеруемой резьбы, мм – 75. Наибольший шаг в мм фрезеруемой резьбы при длине резьбы 50 мм равен 6, при длине резьбы 75 мм равен 3.

Кинематическая структура станка состоит из двух формообразующих групп  $\Phi_v(B_1)$  и  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  и группы врезания  $Vp(\Pi_4)$ .

Группа скорости резания  $\Phi_v(B_1)$  – простая. Ее внутренняя связь – элементарная вращательная пара:

*подшипниковые опоры фрезерной головки – шпиндель фрезы ( $B_1$ ).*

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M_2 \rightarrow 4/34 \rightarrow i_v \rightarrow 24/24 \rightarrow \text{шпиндель фрезы } (B_1).$$

Группа настраивается только на один параметр, скорость резания – двухколесной гитарой  $i_v$ .

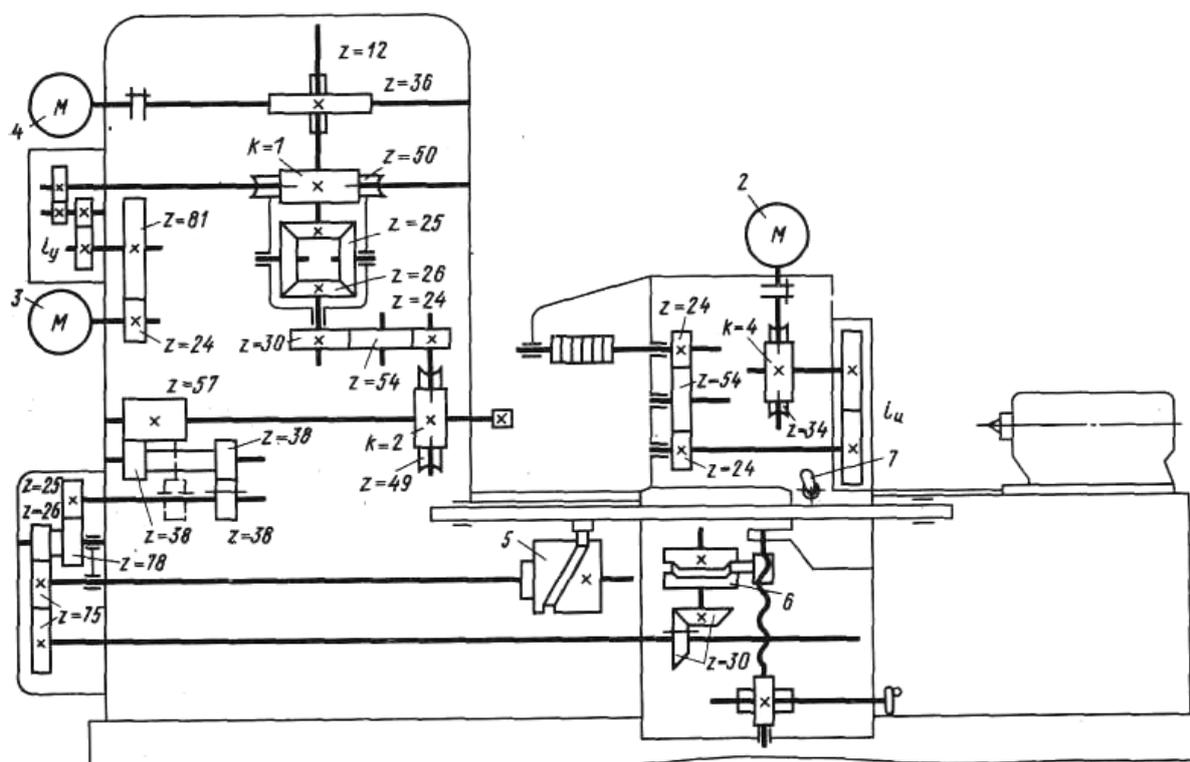


Рисунок 8.7. – Кинематическая схема резьбофрезерного станка для обработки коротких резьб модели 5M5B62

Сложная группа  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  воспроизводит винтовую линию. Ее внутренняя связь имеет вид:

*шпиндель заготовки ( $B_2$ ) → реверс [(57/38) или (57/38) (38/38)] →*  
*→ 25/78 → 26/15 → барабан 5 (тяговый вал) → фрезерная бабка ( $\Pi_3$ ).*

Внешняя связь:

$M_3 \rightarrow 24/81 \rightarrow i_y \rightarrow 1/50 \rightarrow \Sigma \rightarrow 30/24 \rightarrow 2/49.$

Группа настраивается на траекторию сменными кулачками барабана 5; на скорость – гитарой  $i_y$ , на направление – реверсом, расположенным во внутренней связи, на путь и исходную точку – упорами системы путевого управления.

Для ускоренного перемещения фрезерной бабки в исходное положение во внешней связи группы предусмотрена параллельная ненастраиваемая цепь от отдельного электродвигателя

$M_4 \rightarrow 36/12 \rightarrow \Sigma \rightarrow 30/24 \rightarrow 2/49.$

Группа врезания  $Vp(\Pi_4)$  осуществляет врезание в радиальном направлении на полную глубину зубофрезерования. Ее внутренняя связь:

*поперечные направляющие станины → фрезерная бабка ( $\Pi_4$ ).*

Внешняя связь включает часть внешней и внутренней связи группы  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  и имеет вид

$$M_3 \rightarrow 24/81 \rightarrow i_y \rightarrow 1/50 \rightarrow \Sigma \rightarrow 30/24 \rightarrow 2/49 \rightarrow \\ \rightarrow 57/38 \rightarrow 29/26 \rightarrow 15/15 \rightarrow 30/30 \rightarrow \text{кулачок 6 (П}_4\text{)}.$$

Группа настраивается на путь врезания и на исходную точку сменными кулачками барабана 6.

Расчет настройки станка сводится к определению передаточных отношений органов настройки, расположенных в расчетных цепях вращения фрезы и вращения заготовки, а также к подбору кулачков для барабанов 5 и 6. Исходными данными для расчета являются параметры нарезаемой резьбы и режимы резания.

Гитара  $i_v$ . Расчетная цепь совпадает с внешней связью группы  $\Phi_v(B_1)$ . Поэтому РП:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя 2} \rightarrow n_\Phi \text{ мин}^{-1} \text{ фрезы.}$$

Тогда УКЦ:

$$n_\Phi = (n_M = 1425) (4/34) i_v (24/24).$$

Откуда ФН:

$$i_v = n_\Phi / 168.$$

Набор сменных зубчатых колес гитары обеспечивает 9 ступеней частот вращения фрезы в пределах от 75 до 375 мин<sup>-1</sup>.

Гитара  $i_y$ . Расчетная цепь совпадает с внешней связью группы  $\Phi_s(B_2\Pi_3)$  и, следовательно, соединяет электродвигатель 3 со шпинделем заготовки. Круговая частота заготовки определяется минутной подачей, под которой понимают путь, проходимый фрезой по заготовке в процессе обработки за 1 мин. Следовательно, РП можно представить в виде:

$$n_{M3} \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя 3} \rightarrow s_z z_\Phi n_\Phi / \pi D_p \text{ мм/мин,}$$

где  $s_z$  – подача на зуб фрезы, мм/зуб;

$z_\Phi$  – число зубьев фрезы;

$n_\Phi$  – круговая частота фрезы;

$D_p$  – средний диаметр нарезаемой резьбы, мм.

Тогда УКЦ:

$$s_z z_\Phi n_\Phi / \pi D_p = (n_{M3} = 1425) (24/81) i_y (1/50) (i_\Sigma = 2) (30/54) (54/24) (2/49).$$

Откуда ФН:

$$i_y = 0,37 s_z z_\Phi n_\Phi / D_p.$$

РП для ускоренного хода фрезерной бабки в исходное положение:

$$n_{M4} \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя } 4 \rightarrow n_6 \text{ мин}^{-1} \text{ барабана } 5.$$

Тогда УКЦ (ФН):

$$n_6 = (n_{M4} = 1425)(12/36)(i_{\Sigma} = 1)(30/24)(2/49)(57/38)(25/26)(78/75) = 36 \text{ мин}^{-1}.$$

Настройка на траекторию – перемещение фрезы в осевом направлении на шаг нарезаемой резьбы – осуществляется посредством барабана 5 со сменными кулачками. Кулачок через ролик перемещает тягу, связанную с фрезерной бабкой. Положение бабки относительно тяги можно регулировать рукояткой 7. Настройка расчетной цепи подачи на шаг состоит в определении характеристики кулачка. Элементом настройки является подъем  $L$  на кулачке 5, который выполняется для всех кулачков на угле поворота барабана  $\Theta = 110^\circ$ .

РП для определения подъема  $L$  имеют вид

$$1 \text{ оборот заготовки} \rightarrow P \text{ мм. перемещения фрезы,}$$

где  $P$  – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда УКЦ:

$$P = 1 (57/38) (25/78) (26/75) (360^\circ/\Theta^\circ) L.$$

Откуда,

$$L = (11/6) P.$$

Перемещение фрезы в радиальном направлении на полную глубину фрезерования осуществляется от кулачка барабана 6. Кулачок имеет постоянный подъем, и настройка производится по конечному установочному перемещению фрезы посредством передачи винт – гайка, перемещающей бабку фрезы в радиальном направлении. Кулачок обеспечивает врезание с рабочей подачей в течение примерно  $1/6$  оборота заготовки и быстрый отвод после завершения цикла нарезания резьбы. За полный цикл обработки барабан 6 делает один оборот.

Полный цикл обработки с учетом врезания на полную глубину осуществляется за  $7/6$  оборота заготовки. Минимальная длина гребенчатой фрезы должна быть на 2–3 шага больше длины фрезеруемой резьбы.

Ось гребенчатой фрезы располагается параллельно оси заготовки, что приводит к некоторому искажению профиля резьбы. Величина искажения тем больше, чем больше шаг резьбы, диаметр фрезы и чем меньше диаметр резьбы. Однако при нарезании обычных треугольных резьб, имеющих небольшой наклон витков винтовой линии, такое искажение не является существенным.

## ГЛАВА 9. СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА ПОЗНАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ В ЭКСПЕРТИЗЕ ИЗОБРЕТЕНИЙ

### 9.1 Постановка задачи

Научно-техническая экспертиза изобретений (НТЭ) обладает высокой кумулятивностью, то есть способностью «...полностью или частично, но без изменений включать в свой состав содержание других научных дисциплин» [38]. Высокая кумулятивность НТЭ подтверждается также нормативным актом [39], обязывающим при изложении всех разделов описания заявляемого изобретения «...использовать термины, общепринятые в данной области техники». В настоящее время в НТЭ при составлении заявок на изобретения к патентам, защищающим металлорежущие станки как целостные объекты реальной действительности, используется парадигма познания металлорежущих станков, основанная на теории их настройки [2], базирующейся на известном в теоретической механике принципе возможных перемещений.

Теория настройки рассматривает кинематическую структуру станка как совокупность составляющих ее кинематических цепей, связывающих исполнительные органы станка между собой и с источниками механической энергии, и задаваемых из возможности составления уравнения кинематического баланса на основе единой формулы настройки. Наряду с выводом формул настройки эта теория до настоящего времени используется в НТЭ не только для описания кинематической структуры металлорежущих станков, но и для объяснения их функции, или принципа работы.

Вполне определенные сомнения в корректности использования теории настройки для объяснения функции металлорежущих станков высказывал ее автор. Эти сомнения подробно рассмотрены выше в разделе, посвященном введению в методологию познания металлорежущих станков. Там же показано, что функция металлорежущих станков базируется не на принципе возможных перемещений, а на другом законе теоретической механики – принципе разветвления энергии в кинематических цепях.

По существу, использование двух законов теоретической механики устранило противоречие между кинематической структурой и функцией технической системы – металлорежущего станка, и привело к созданию современной парадигмы познания станочного оборудования. По этой пара-

дигме, достаточно подробно рассмотренной в предшествующих разделах данной работы, кинематика станка – это объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит конкретное элементарное (вращательное или поступательное) или сложное, состоящее из элементарных, формообразующее или вспомогательное движение, характеризующееся вполне определенными настраиваемыми параметрами.

Рассмотрим возможность использования современной парадигмы познания станочного оборудования в НТЭ изобретений при патентной защите металлорежущих станков. В качестве примеров используем зубообрабатывающие станки для обработки зубчатых колес с наклонными зубьями, или с линией зуба на делительном конусе, признанные изобретениями. Структурные схемы этих станков как целостных объектов реальной действительности выполнены по методике, предложенной в работе [40].

Подробное описание обоих зубообрабатывающих станков, соответствующее формулам изобретений в терминах современной парадигмы познания, приведено в разделах 5.2 и 5.3 соответственно. При этом при описании изобретений используется логико-математическая символика, характерная для общей теории систем. Для повышения уровня информативности описания изобретений в их содержание включены выводы формул настройки исполнительных органов станков.

## **9.2 Зубодолбежный станок по патенту ВУ 3343**

В разделе 5.2 приведены кинематико-компоновочная схема станка (см. рисунок 5.3) и орган настройки на траекторию движения, воспроизводящего линию зубьев на делительном конусе (см. рисунок 5.4).

*Формула изобретения по патенту.* Станок для долбления зубчатых колес, содержащий суппорт, несущий подвижную в осевом направлении гильзу, в которой смонтирован с возможностью вращения шпиндель долбяка, суппорт установлен с возможностью качательного движения относительно оси червяка делительной передачи шпинделя от кулачкового механизма, кинематически связанного с ведущим звеном кулисного механизма привода поступательно-возвратного движения гильзы, при этом профиль кулачка кулачкового механизма выполнен в виде двух дуг, разделенных переходными кривыми, одна из дуг соответствует поступательному движению гильзы, а другая – ее воз-

вратному движению, **отличающийся тем**, что обе дуги профиля кулачка выполнены по архимедовой спирали, конечный радиус дуги, соответствующей поступательному движению гильзы, больше ее начального радиуса, а начальный радиус дуги, соответствующей возвратному движению гильзы, больше ее конечного радиуса, причем разность радиусов для обеих дуг одинакова.

*Формула изобретения в терминах современной парадигмы познания.* Станок для долбления зубчатых колес, содержащий кинематическую группу поступательно-возвратного движения смонтированной в суппорте гильзы, несущей шпиндель долбяка, кинематически связанный посредством внутренней связи группы обката с делительным столом, кинематическую группу, включающую кулачковый механизм качательного движения суппорта относительно оси червяка делительной передачи шпинделя, при этом профиль кулачка кулачкового механизма выполнен в виде двух дуг, разделенных переходными кривыми, одна из дуг соответствует поступательному движению гильзы, а другая – ее возвратному движению, **отличающийся тем**, что обе дуги профиля кулачка выполнены по архимедовой спирали, конечный радиус дуги, соответствующей поступательному движению гильзы, больше ее начального радиуса, а начальный радиус дуги, соответствующий возвратному движению гильзы, больше ее конечного радиуса, причем разность радиусов для обеих дуг одинакова.

### 9.3 Зубофрезерный станок по патенту ВУ 6134

Структурная схема станка (см. рисунок 5.5) приведена в разделе 5.3.

*Формула изобретения по патенту.* Станок для нарезания цилиндрических зубчатых колес, включающий инструментальный шпиндель с закрепленной в нем червячной фрезой, кинематически связанный цепью обката с делительным столом, несущим зубчатое колесо, при этом инструментальный шпиндель установлен с возможностью продольного перемещения вдоль оси делительного стола от тягового механизма продольного перемещения, кинематически связанного цепью подачи с делительным столом, и радиального перемещения перпендикулярно оси делительного стола от тягового механизма радиального перемещения, **отличающийся тем**, что тяговые механизмы радиального и продольного перемещений инструментального шпинделя соединены между собой кинематической цепью, содержащей орган настройки.

*Формула изобретения в терминах современной парадигмы познания.*

Станок для нарезания цилиндрических зубчатых колес, содержащий формообразующие группы обката, воспроизводящей профиль зубьев нарезаемых колес, и продольной подачи, воспроизводящей линию зубьев, причем обе формообразующие группы соединены общим электродвигателем, группа обката внутренней связью кинематически соединяет инструментальный шпиндель червячной фрезы с делительным столом, несущим заготовку нарезаемого колеса, при этом инструментальный шпиндель установлен с возможностью продольного перемещения вдоль оси делительного стола от тягового механизма продольного перемещения, кинематически связанного цепью подачи с делительным столом, и радиального перемещения перпендикулярно оси делительного стола от тягового механизма радиального перемещения, **отличающийся тем,** что тяговые механизмы радиального и продольного перемещений инструментального шпинделя соединены между собой кинематической цепью, содержащей орган настройки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебная литература для высшей школы, по существу, не рассматривает эволюцию парадигмы познания станочного оборудования на этапах развития станковедения – науки о металлорежущих станках. Этот пробел устраняется в данной монографии. При этом под парадигмой понимается комплекс научных данных или аксиом, принимаемых за истину, на основе которых развивается научная теория для анализа и синтеза кинематической структуры и функции металлорежущих станков.

Структура современной парадигмы познания металлорежущих станков включает три логически связанные части: теорию формообразования реальных поверхностей в машиностроении, понятие о кинематической структуре и функции станка, методику функционального проектирования реального технического решения – кинематической структуры металлорежущего станка – по законам функционирования, задаваемым виртуальными техническими решениями – способами формообразующей обработки. При этом теория настройки металлорежущих станков, основанная на принципе возможных перемещений, кумулятивно включена в методику понятия о кинематической структуре и функции станка.

На начальном этапе развития станковедения металлорежущие станки рассматривались, по существу, на интуитивном уровне как совокупности различных механизмов, связывающих источник механической энергии с исполнительными органами станка. А их настройка сводилась к определению скорости главного движения и подачи. Развитие теоретической механики, в частности раздела кинематика, создало предпосылки для использования принципа возможных перемещений, известного как принцип Даламбера, для создания теории настройки металлорежущих станков. Эта теория ввела в практику познания металлорежущих станков направление кинематика станков. Целевая направленность этого направления – вывод формул настройки для механических органов настройки станочного оборудования, расположенных в расчетных цепях. По существу, произошла смена парадигмы познания металлорежущих станков.

Автор парадигмы познания кинематической структуры на основе теории настройки справедливо сомневался в корректности ее использования для раскрытия физической сущности функционирования металлорежущих станков. Причина такого сомнения – несоответствие объяснения функции металлорежущего станка еще одному закону теоретической механики – принципу разветвления энергии движения в механических кинематических цепях. Тем не менее, эта парадигма в той или иной степени доминирует при познании станочного оборудования на различных уровнях профессионального образования.

Появление теории познания кинематической структуры металлорежущих станков на основе закона разветвления энергии движения в кинематических цепях разрешило противоречие между кинематической структурой и функцией металлорежущих станков. По этой теории кинематическая структура металлорежущего станка – это совокупность кинематических групп, каждая из которых воспроизводит вполне определенное исполнительное движение. Достоинство этой теории – включение кумулятивно, то есть без изменений, теории настройки в данную научную теорию. Таким образом, на основе эволюции познания строго на научной основе была создана современная университетская парадигма познания металлорежущих станков.

Современная парадигма познания разрабатывалась на основе кинематического анализа и синтеза станочного оборудования с механическими связями. На конкретных примерах показано, что изложенные научные положения в полной мере приемлемы также при анализе и синтезе кинематической структуры металлорежущих станков с механико-гидравлическими и мехатронными связями.

На методологии современной парадигмы познания рассмотрена эволюция развития зубодолбежных станков и станков для зуботочения обкатным резцом цилиндрических колес. В качестве приложения приведены примеры анализа кинематической структуры ряда известных металлорежущих станков.

Рассмотрена на конкретных примерах возможная методика использования современной парадигмы познания в научно-технической экспертизе металлорежущих станков при их патентной защите как целостных объектов реальной действительности. Целевая направленность данной методики – повышение уровня информативности описания изобретений.

Специальная проблематика парадигмы излагается с относительно высокой степенью абстракции и в то же время достаточной для понимания. При этом анализ и синтез структурных и кинематических схем выполнен на логико-математическом языке, характерном для общей теории систем.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

*Парадигма* – комплекс научных данных или аксиом, принимаемых за истину, на основе которых развивается научная теория или модель методов исследования, доминирующих в течение определенного периода в научном сообществе.

*Кумулятивность* – включение какой-либо гипотезы (теории) в другую гипотезу (теорию) без изменений в качестве ее составной части.

*Эволюция познания* – смена парадигм.

*Бифуркация* – поле ветвящихся виртуальных путей эволюции.

*Аттрактор* – траектория или некоторый коридор траекторий эволюции способов формообразующей обработки на основе вполне определенного первообразного способа обработки, образующийся в точке бифуркации.

*Общая теория систем* – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще (по Л. Берталанфи).

*Синергетика* – наука о совместном, согласованном поведении многих элементов как единого целого в составе сложной системы (по Г. Хакену).

*Синергизм* – явление, характеризующееся тем, что суммарный эффект воздействия каких-либо факторов на объект или систему больше суммы эффектов воздействия каждого взятого из них в отдельности.

*Система* – совокупность целесообразно организованных функционально связанных элементов, участвующих в процессе достижения определенной цели, выступающая по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Качественная определенность системы обусловлена ее структурой и функцией.

*Структура системы* – схема связей и отношений между ее элементами.

*Функция системы* – способность к целесообразной деятельности (функционалирование) в рамках более сложной системы, в которую она входит.

*Способ формообразующей обработки* – целенаправленное множество приемов воздействия посредством инструмента или объекта, выполняющего его функцию, на твердое тело, осуществляемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил.

*Вспомогательный элемент* – точка, линия или поверхность на инструменте, перемещаемая по виртуальной воспроизводимой линии при формообразующей обработке.

*Характеристический образ инструмента* – объединение вспомогательных элементов, отображаемое в виде множества точек на (в) воспроизводимую линию или поверхность.

*Мощность характеристического образа* – совокупность вспомогательных элементов инструмента, выраженная в виде вполне определенного класса множеств.

*Поверхность* – след, оставляемый одной воспроизводящей линией, называемой образующей, при ее перемещении по другой воспроизводящей линии, называемой направляющей (по Г. Монжу).

*Класс образования воспроизводящей линии* – отображение характеристического образа инструмента на виртуальную (воображаемую) линию.

*Компоненты* – независимые составные части системы, будучи взятые в наименьшем числе, достаточны для построения всей системы.

*Кинематическая структура металлорежущего станка* – целесообразно организованное объединение кинематических групп, выполняющих формообразующие и вспомогательные движения (по А. Федотенку).

*Функциональное проектирование* – синтез частной структурной схемы металлорежущего станка по закону его функционирования, задаваемому способом формообразующей обработки.

*Кинематическая группа* – компонента кинематической структуры металлорежущего станка, выполняющая вполне определенное настраиваемое или ненастраиваемое движение.

*Внутренняя связь кинематической группы* – кинематическая пара или структурная кинематическая связь (цепь), определяющая траекторию исполнительного движения.

*Внешняя связь кинематической группы* – структурная или кинематическая связь (цепь), связывающая источник механической энергии с внутренней связью группы.

*Звено соединения связей* – кинематическая пара или кинематическая передача, одновременно входящая во внутреннюю и внешнюю связи.

*Расчетная кинематическая цепь* – искусственно назначаемая цепь для математического вывода формулы настройки. Может как совпадать, так и не совпадать с внутренними и внешними связями.

*Гибридная кинематическая группа* – сложная формообразующая группа, содержащая в структуре электрический, гидравлический или электронный вал.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бергард, Генри Д. Станки по металлу и работа на них : в 2 т. / Генри Д. Бергард. – 4-е изд. – Л. ; М. : Книга, 1930.
2. Головин, Г. М. Кинематика станков / Г. М. Головин. – М. : МВТУ им. Баумана, 1946.
3. Федотенок, А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. – Изд. 2-е. – М. : Машиностроение, 1970.
4. Голембиевский, А. И. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков / А. И. Голембиевский. – Lap Lambert Academic Publishing, 2019.
5. Коновалов, Е. Г. Основы новых способов металлообработки / Е. Г. Коновалов. – Минск : Наука и техника, 1961.
6. Заманский, М. А. Введение в современную алгебру и анализ / М. А. Заманский. – М. : Наука, 1974.
7. Данилов, В. А. Синтез кинематической структуры металлорежущих станков / В. А. Данилов, А. А. Данилов. – Минск : БНТУ, 2018.
8. Острецов Г. В. Геометрический расчет двухшаговых червячных пар / Г. В. Острецов, С. С. Шарова. – М. : ЭНИМС, 1969.
9. Червячная передача : пат. RU 2044194 / А. И. Голембиевский, В. А. Петров. – Оpubл. 1995.
10. Двухшаговый червяк : пат. RU 2020326 / А. И. Голембиевский, В. А. Петров. – Оpubл. 1994.
11. Голембиевский, А. И. Новая двухшаговая передача / А. И. Голембиевский, В. А. Петров // Машиностроитель. – 1997. – № 5.
12. Голембиевский А. И. Расширение технических возможностей кинематической структуры станка с механическими связями для обработки червяков чашечным резцом / А. И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 18–23.
13. Голембиевский, А. И. Модернизация кинематической структуры станка для обработки червяков чашечным резцом / А. И. Голембиевский // Техника машиностроения. – 2014. – Т. 21, вып. 2(86). – С. 15–20.
14. Голембиевский, А. И. Эволюция развития сложных формообразующих групп металлорежущих станков / А. И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 2–8.
15. Голембиевский, А. И. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении / А. И. Голембиевский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.
16. Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка : пат. ВУ 16976 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

17. Способ долбления зубчатых колес и станок для его осуществления : пат. ВУ 3343 / А. И. Голембиевский, Ю. Я. Сидоренков и др. – Оpubл. 20.12.1999.
18. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. ВУ 6134 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.
19. Гир-Шепер, Ф. Зубодолбежный станок / Ф. Гир-Шепер. – М., 1914.
20. Способ нарезания цилиндрических колес : пат. SU 475761 / М. Тиксье. – Оpubл. 1975.
21. Способ обработки зубчатых колес : а. с. SU 1763112 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 1992.
22. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – М : Мир, 1980.
23. Способ одновременного долбления двух зубчатых колес : а. с. SU 1265017 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 1986.
24. Зубодолбежный станок : а. с. SU 1641533 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 1991.
25. Способ нарезания зубчатых изделий : а. с. SU 1291311 / В. А. Терентьев, А. И. Трофимов. – Оpubл. 1981.
26. Способ долбления зубчатых колес : а. с. SU 1641534 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 1991.
27. Устройство для синхронизации приводов шпинделя и делительного стола зубодолбежного станка : пат. ВУ 8621 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 2006.
28. Устройство управления приводом продольного стола зубодолбежного станка : а. с. SU 1835335 / А. И. Голембиевский. – Оpubл. 1993.
29. Голембиевский, А. И. Управление процессом последовательного зубодолбления при касательном движении врезания / А. И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2007. – № 8. – С. 34–41.
30. Голембиевский, А. И. Синхронизация приводов функционально связанных исполнительных органов зубодолбежного станка роторного типа / А. И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 93–99.
31. Мальков, О. В. Анализ способов обработки резьбы фрезерованием / О. В. Мальков // Электронный журнал. – 2016. – № 4.
32. Голембиевский, А. И. Эволюция развития кинематической структуры металлорежущих станков для зуботочения обкатным резцом типа долбяка / А. И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2018. – № 3. – С. 2–12.
33. Станок с гидравлическими связями для нарезания цилиндрических зубчатых колес методом зуботочения : заявка RU 95111229/02 / В. Ф. Ванин. – Оpubл. 1997.

34. Кинематическая структура зубо- и резьбообрабатывающих станков с гидравлическими связями в формообразующих цепях / В. А. Ванин [и др.] // Вестник ТГТУ. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 167–175.

35. Ванин, В. А. Кинематическая связь в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода / В. А. Ванин, С. В. Мищенко, О. А. Трифонов. – М. : Машиностроение-1, 2005.

36. Металлорежущие станки : учеб. для вузов : в 2 т. / В. В. Бушуев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Бушуева. – М. : Станкин, 2011. – Т. 2. – 585 с.

37. Ефремов, В. Д. Металлорежущие станки : учеб. / В. Д. Ефремов, В. А. Горохов, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 695 с.

38. Ракитов, А. И. Философские проблемы науки / А. И. Ракитов. – М. : Мысль, 1977. – 269 с.

39. Указания по составлению заявки на изобретение (ЭЗ-1-74) // Вопросы изобретательства. – 1974. – № 5. – С. 22–64.

40. Голембиевский, А. И. О выполнении чертежей к описаниям изобретений, объектом которых являются металлорежущие станки / А. И. Голембиевский // Вопросы изобретательства. – 1980. – № 7. – С. 5–6.

*Научное издание*

ГОЛЕМБИЕВСКИЙ Анатолий Иосифович

**СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА ПОЗНАНИЯ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

Редактор *А. А. Прадидова*  
Дизайн обложки *М. С. Мухоморовой*

---

Подписано в печать 27.09.21. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 13.02. Уч.-изд. л. 12.86. Тираж 100 экз. Заказ 617.

---

Издатель и полиграфическое исполнение –  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.