

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1. ПРИВОДЫ ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ .....</b>	<b>7</b>
1.1. Основные сведения о станках для нарезания шевронных цилиндрических колес .....	7
1.2. Основные сведения о зубофрезерном станке модели 5330 .....	10
1.2.1. Технические характеристики зубофрезерного станка модели 5330 .....	10
1.2.2. Принцип работы станка.....	11
1.2.3. Внутренние кинематические цепи станка .....	11
1.2.4. Кинематическая схема станка, обеспечивающая обработку шевронных цилиндрических колес .....	15
1.3. Кинематические цепи на основе гидравлического шагового двигателя .....	22
<b>2. АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ЗУБОРЕЗНОГО СТАНКА С МЕХАНИЧЕСКИМИ ЗВЕНЬЯМИ В ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЦЕПЯХ.....</b>	<b>26</b>
2.1. Основные погрешности типового звена кинематической цепи .....	26
2.2. Определение составляющих погрешностей звеньев в кинематических цепях .....	28
2.2.1. Погрешности изготовления и монтажа звеньев кинематических цепей .....	28
2.2.2. Погрешности сменных звеньев .....	29
2.2.3. Температурные погрешности .....	30
2.3. Определение действующих, приведенных и выходных погрешностей в кинематических цепях станков .....	30
2.3.1. Принципы суммирования погрешностей в кинематических цепях .....	30
2.3.2. Действующие и приведенные погрешности звеньев кинематических цепей .....	32
2.3.3. Выходные показатели точности системы.....	34
2.3.4. Баланс точности кинематической системы .....	35
2.4. Расчет точности кинематической цепи обката, составленной из механических звеньев .....	37
<b>3. РАЗРАБОТКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ШАГОВОГО ВОЛНОВОГО ПРИВОДА.....</b>	<b>57</b>
3.1. Принцип действия и отличительные свойства волновой передачи .....	57
3.2. Классификация волновых передач.....	66

3.3. Классификация передач с деформирующими звеньями.....	70
3.4. Схемы волновых передач.....	72
3.5. Схемы и конструкции приводов с многоплунжерными шаговыми гидравлическими двигателями с различными схемами коммутации.....	81
3.6. Расчет гидравлического шагового волнового двигателя.....	92
3.6.1. Определение крутящего момента, развиваемого двигателем .....	92
3.6.2. Математическая модель шагового двигателя .....	96
3.6.3. Анализ качества двигателя.....	98
3.6.4. Выбор гидравлического шагового двигателя для привода подачи.....	99
3.6.5. Расчет гибкого и жесткого колеса волнового двигателя .....	99
3.6.6. Проверочный расчет гибкого колеса .....	101
3.6.7. Расчет геометрии жесткого колеса.....	102
3.6.8. Расчет плунжеров.....	103
3.7. Проверочный расчет валов.....	104
3.8. Выбор и расчет подшипников .....	106
3.9. Выбор передачи «винт — гайка качения».....	107
3.10. Проверочный расчет передачи «винт — гайка качения» .....	108
3.10.1. Расчет винта на жесткость .....	108
3.10.2. Расчет на продольную устойчивость .....	109
3.10.3. Расчет винта на виброустойчивость .....	109
3.10.4. Расчет на статическую прочность .....	110
3.10.5. Расчет винта на долговечность.....	110
3.11. Смазка волнового двигателя .....	111
3.12. Смазка шариковинтового механизма.....	111
<b>4. ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ВО ВНУТРЕННИХ ЦЕПЯХ СТАНКОВ .....</b>	<b>112</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>120</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>122</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых важных и актуальных задач современного машиностроения является повышение точности, надежности и производительности технологического оборудования.

Анализируя результаты исследований, а также данные производственной эксплуатации технологического оборудования, в частности металлорежущих станков со сложными кинематическими связями, можно выделить ряд способов, благодаря которым возможны совершенствование и оптимизация механических кинематических цепей по критерию кинематической точности.

Все это свидетельствует о том, что применение механических связей во внутренних кинематических цепях станков и другого технологического оборудования затрудняет дальнейшее повышение точности и жесткости цепей.

Этим объясняется то, что в последнее время в качестве внутренних кинематических связей делаются попытки применять немеханические связи, используя для этих целей электрические, электронные, гидравлические связи или их комбинации.

Одним из путей повышения точности технологического оборудования, в частности металлорежущих станков, при одновременном росте их эксплуатационной надежности является сокращение протяженности кинематических цепей благодаря применению приводов, обеспечивающих возможность непосредственного соединения исполнительного двигателя с нагрузкой (заготовкой и инструментом), исключая промежуточные механические передачи, коробки скоростей, редукторы, коробки подач [3].

Одним из возможных решений сокращения протяженности кинематической цепи с целью повышения точности, жесткости станка, уменьшения металлоемкости и массы станка может быть применение гидравлических связей, выполненных в виде гидравлического шагового привода.

В качестве исполнительных силовых органов в гидравлических связях используются гидравлические шаговые двигатели, преобразующие последовательность гидравлических импульсов управления в дискретные угловые или линейные перемещения. При этом скорость вращения и суммарный угол поворота выходного вала шагового гидродвигателя пропорциональны соответственно частоте и количеству поданных управляющих импульсов; при отсутствии входных сигналов звено удерживается в зафиксированном положении.

Использование дискретных устройств позволяет существенно упростить систему управления, получить достаточную точность и быстродействие при разомкнутой системе управления за счет однозначного соответствия между числом и частотой управляющих импульсов, числом и частотой отработки дискретных перемещений (угловых или линейных) на выходе исполнительных органов.

Используя свойство частотного регулирования скоростей исполнительных силовых шаговых гидродвигателей, представляется возможным заменить

механическую кинематическую связь между заготовкой и инструментом в зу-  
бофрезерном станке гидравлической системой синхронной связи, которая обес-  
печивает высокую точность согласованных угловых перемещений заготовки и  
инструмента.

Практическая целесообразность заключается в следующем: повышение  
точности станка; повышение эксплуатационной надежности; сокращение про-  
тяженности кинематических цепей; возможность непосредственного соедине-  
ния исполнительного двигателя с нагрузкой (заготовкой, инструментом), ис-  
ключая при этом промежуточные механические передачи, коробки скоростей, ре-  
дукторы, коробки подач; осуществление унификации как элементов привода,  
так и приводов в целом для станков одного назначения по отдельным коорди-  
натам и для станков различного назначения и разных типоразмеров; улучшение  
технологичности конструкции внутренних цепей, так как возможно создать бо-  
льше рациональную компоновку при сложном пространственном расположении  
рабочих органов станка, что одновременно обеспечивает повышение жесткости  
и точности, снижение металлоемкости и массы станка.

# 1. ПРИВОДЫ ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ

## 1.1. Основные сведения о станках для нарезания шевронных цилиндрических колес

По форме зубчатого венца шевронные колеса разделяют на открытые и закрытые. К первой группе относятся колеса с разнесенными венцами (рис. 1.1) и с широкой дорожкой между полушеvronами. Осевое врезание фрезы следует производить от наружного торца колеса или заменять его радиальным врезанием. Нужно также рационально выбирать осевое положение фрезы относительно межосевой линии, для того чтобы повысить ее стойкость и обеспечить нарезание зубьев без отклонения профиля.

**Рис. 1.1**

Шевронное колесо венцов зубчатых  
с разнесенными венцами

**Рис. 1.2**

Типы шевронных колес:  
*a* — открытый; *б* — закрытый с узкой канавкой; *в* — сплошной остроугольный; *г* — сплошной скругленный.

Закрытые венцы бывают двух типов: 1) с узкой канавкой, тогда обработка зубьев возможна долблением, строганием или пальцевой фрезой (рис. 1.2*б*); 2) со сплошным (неразрывным) шевроном, тогда обработка возможна долблением, или строганием (остроугольный шеврон, рис. 1.2*в*), или пальцевой фрезой (скругленный шеврон, рис. 1.2*г*).

Применяют цилиндрические зубчатые колеса со спиральным зубом, в частности те, назначение которых то же, что и шевронных. Зубообработку таких колес выполняют на станках типа зубофрезерных зуборезными головками, подобными применяемым для нарезания круговых зубьев конических колес.

*Технологические процессы обработки.* Технологический процесс обработки шевронных колес, технологические базы, технические требования к заготовке, припуски на отделку после термической обработки, а также варианты обработки заготовок. Порядок и точность зубообработки шевронных колес, межоперационные припуски на зубообработку, а также методы и точность установки колес на зубообрабатывающих станках.

Отделку посадочных баз шевронных колес после термической обработки выполняют так же, как и цилиндрических колес с косыми зубьями.

Отделку закаленных зубьев шевронных колес с канавкой, узкой для обычного зубошлифования, можно осуществлять фрезерованием твердосплавным обкаточным инструментом, непрерывным зубостроганием, а также шлифованием профильным эльборовым кругом небольшого диаметра.

*Обработка зубьев.* Нарезание сплошных остроугольных шевронных зубьев (рис. 1.2б) выполняют на зубодолбежных станках специальной конструкции одновременно двумя долбяками.

При обработке сплошных (неразрывных) остроугольных шевронных зубьев применяют косозубые долбяки с конусной передней поверхностью (рис. 1.3) или косозубые гребенки (рис. 1.4).

**Рис. 1.3**

Косозубый долбяк с конусной передней поверхностью

**Рис. 1.4**

Косозубая гребенка

Обработку шевронных валов-шестерен без канавки в месте соединения шевронов часто осуществляют на универсальных зубофрезерных станках горизонтальной компоновки пальцевой фрезой, однако жесткость этих станков, рассчитанных в основном для фрезерования методом обкатки, оказывается недостаточной для производительной работы пальцевыми фрезами. Поэтому ряд фирм и заводов изготавливают специальные станки для этой цели.

**Рис. 1.5**

Кинематическая схема зубофрезерного станка модели 5330

Нарезание сплошных скругленных шевронных зубьев выполняют модульными фрезами на специальных зубофрезерных станках с горизонтальной осью заготовки или на универсальных зубофрезерных станках, имеющих механизмы единичного деления и реверсаворота колеса в процессе продольного хода суппорта, а также сменную головку для установки пальцевых модульных фрез. Технические характеристики станков для нарезания шевронных колес пальцевой фрезой приведены в таблице 1.1.

Шевронные колеса с узкой канавкой обрабатывают также на долбежных и строгальных станках или на зубофрезерных станках пальцевой фрезой, как указано выше. При ширине канавки, большей указанной в таблице 1.1, можно применять косозубые долбяки с передней поверхностью, перпендикулярной к зубьям.

Шевронные колеса с открытым венцом или с разнесенными венцами обрабатывают любым из указанных в гл. 1 методом (предпочтительнее червячными фрезами).

При раздельном нарезании зубьев правого и левого полушеvronов, особенно при относительно высокой их точности (6–7-й степени), важно обеспечить наименьшее рассогласование по максимальному отклонению накопленной погрешности шага зубьев обоих полушеvronов. Это достигается обработкой их зубьев на одном станке при одинаковом радиальном и угловом расположении заготовки колеса относительно делительной пары стола (рабочего шпинделя), и желательно использовать червячные фрезы одного направления.

Машинное время обработки зубьев шевронных колес на универсальных станках определяют как сумму времени обработки двух косозубых колес. При обработке зубьев на специальных зубодолбежных или зубострогальных станках машинное время равно времени обработки одного венца. При обработке пальцевыми фрезами расчет ведут по общей ширине венца.

## **1.2. Основные сведения о зубофрезерном станке модели 5330**

### **1.2.1. Технические характеристики зубофрезерного станка модели 5330**

Зубофрезерный станок мод. 5330, кинематическая схема которого дана на рисунке 1.5, предназначен для нарезания всех видов круглых цилиндрических зубчатых и червячных колес. Технологические возможности станка характеризуются следующими данными (табл. 1.1).

*Таблица 1.1*

#### **Технологические возможности станка**

Наибольший диаметр нарезаемого колеса	1500 мм
Наибольший модуль нарезаемых зубчатых колес:	
1) по стали	$m = 15$ мм
2) по чугуну	$m = 15$ мм

### *Продолжение табл. 1.1*

Наибольшее передаточное отношение	$i = 10:1$
Габариты станка	6000×3500×3200
Вес	25 т
Угол наклона зуба нарезаемого колеса:	
1) наибольший	$34^{\circ}17'$
2) наименьший	$15^{\circ}43'$
Число зубьев:	
1) наименьшее при $i = 1:1$	23
2) наименьшее при $i = 10:1$	12
Наибольшее	180

## **1.2.2. Принцип работы станка**

Кинематическая структура сильно усложнена по сравнению с зубофрезерными станками средних размеров, потому что он состоит как бы из трех станков: 1) зубофрезерного станка для обработки прямозубых и косозубых цилиндрических колес червячной фрезой; 2) станка для нарезания червячных колес методами радиального и осевого врезания и 3) зубофрезерного станка для нарезания цилиндрических колес внешнего и внутреннего зацепления, прямозубых, косозубых и шевронных, фасонными модульными фрезами — дисковыми и пальцевыми.

Можно также нарезать цилиндрические колеса с внутренним зацеплением.

Произведем настройку станка на нарезание червячного колеса методом осевого врезания. Для этого со станка снимают фрезерный суппорт нормального исполнения и устанавливают специальный протяжной суппорт (на рис. 1.5 показан справа вверху). Червячную фрезу применяют также специальную с конической передней частью.

Кинематическая структура станка должна состоять из двух кинематических групп. Первая группа нужна для создания движения Фу (B3B4). Она состоит из одной внутренней кинематической цепи, связывающей элементарные движения В3 (вращение фрезы) и В4 (вращение заготовки), и цепи привода — от главного двигателя до зубчатого колеса  $z = 35$  на валу III.

## **1.2.3. Внутренние кинематические цепи станка**

Настроим эти цепи.

1. Цепь деления. Расчетные перемещения:

1 об. фрезы  $\rightarrow k/z$  — об. заготовки.

Уравнение кинематического баланса (см. рис. 1.5).

Формула настройки

## 2. Цепь скорости резания. Уравнение кинематического баланса.

### Формула настройки

Вторая кинематическая группа осевого врезания фрезы  $\Phi_s(\Pi1B2)$  состоит из двух цепей: внутренней, связывающей элементарные движения  $\Pi1$  (осевое перемещение фрезы) и  $B2$  (вращение заготовки), и цепи привода (от главного двигателя до водила планетарной передачи — вал  $XXI$ ). Настроим эти две цепи.

### 3. Цепь дифференциала. Расчетные перемещения.

$L$  мм осевое перемещение фрезы → об. заготовки.

Уравнение кинематического баланса.

### Формула настройки

### 4. Цепь подач. Расчетные перемещения:

1 об. заготовки →  $S_0$  осевое перемещение фрезы.

Уравнение кинематического баланса

### Формула настройки

Произведем также анализ кинематической структуры станка при нарезании цилиндрического колеса с шевронным зубом фасонной пальцевой фрезой; этот вид обработки еще не был рассмотрен.

Кинематическая структура станка должна состоять в этом случае из трех кинематических групп:

- 1) движения резания (вращения пальцевой фрезы);
- 2) движения образования формы шеврона по длине зуба;
- 3) длительного движения.

Настройка движения. На станке устанавливается суппорт для фрезерования зубчатых колес с наружным зацеплением пальцевой фрезой.

## Уравнение кинематического баланса

### Формула настройки

где      , или      , или      .

Настройка движения образования винтовых линий, т. е. образования формы зуба по длине (движение подачи).

Внутренняя кинематическая цепь образования винтовой линии шага  $T$  по длине зуба.

Движение конечных звеньев: вращение стола и продольное перемещение фрезы.

Расчетные перемещения:

1 об. стола  $\rightarrow T$  мм продольное перемещение фрезы.

Уравнение кинематического баланса

### Формула настройки

Как видно из схемы (рис. 1.5),

или

,

следовательно,

или

После определения  $t_x$  и  $t_y$  окончательно определится отсюда и  $i_y$  (см. табл. 1.1).

Настройка на путь движения — настройка на длину винтовой линии. Внутри цепи размещен реверсивный механизм (рис. 1.1). На валу XXX сидит на

направляющей шпонке червяк К2. Он может через муфту соединяться со свободно сидящими на том же валу  $z = 51$  или  $z = 34$ . Соответственно будет изменяться направление вращения стола. Перемещение червяка К2 на валу XXX происходит автоматически от реечного колеса  $z = 16$ , постоянно сцепляемого с замкнутой зубчатой рейкой  $z = 128$ . Для вывода формулы настройки можно рассматривать эту передачу как обычную планетарную. Ее передаточное отношение найдется в таком случае из соотношения

при

Здесь  $n_0$  — число оборотов ходила за 1 цикл переключения реверса. За 1 оборот водила суппорт с фрезой переместится на величину  $H = b + c$ , где  $b$  — ширина колеса, а  $c$  — сумма длин путей входа и выхода фрезы.

Уравнение баланса

Отсюда

Настройка цепи деления. Отсчетные звенья (делительные диски) находятся на валу ЗДе (рис. 1.5). Делительные диски Б и В получают движение от отдельного электродвигателя. Каждый из них имеет по одному пазу, на которые входит общий широкий фиксатор. Когда фиксатор находится в пазах делительных дисков, кулачковая муфта М разомкнута, и делительная цепь не работает. После того как зуб профрезерован, через упоры на фрезерном суппорте фиксатор будет выведен из делительных дисков, а кулачковая муфта замкнется на вал 1Де, и начнется делительное движение. Оно будет продолжаться до тех пор, пока прорезы обоих дисков не окажутся один против другого. Тогда фиксатор под действием пружины западает в них, кулачковая муфта выключится, а делительное движение прекратится. За это время делительный диск В сделает целое число оборотов, а заготовка повернется на один зуб. Диски Б и В врачаются с разной скоростью. Диск В отстает от диска Б на  $1/8$  оборота. Пазы дисков займет положение друг против друга, когда диск Б сделает 8 оборотов.

Расчетные перемещения конечных звеньев делительной цепи.

8 оборотов делительного диска Б  $\rightarrow 1/z$  об. заготовки;

Отсюда

или так как                  или                  , то                  или

Настройка цепи подач. В рассматриваемом случае вертикальное перемещение суппорта не может передаваться от стола через червячную передачу 2/41 (как это имеет место при нарезании колеса червячной фрезой), так как стол не получает движения от фрезы. Поэтому муфта на валу XIX у червячной передачи 2/41 выключается, а гитара подач получает движение от скоростной гитары через передачу, 48/52.

Уравнение кинематического баланса

где  $S_m$  — минутная подача;

В станке имеется кинематическая цепь с отдельным электродвигателем для ускоренных вспомогательных движений суппорта и стола. Во время рабочего хода ленточный тормоз в этой цепи зажимает вал XXXII и освобождает вал XXXI, и движение валу XXI передается от цепи подач через зубчатый блок из трех колес (85–79–90). Наоборот, при быстрых включениях движение идет через вал XXXII при зажатом вале XXXI.

Имеются станки с такой же кинематической структурой для нарезания зубчатых колес диаметром от 3000 до 5000 мм.

Как видно из анализа кинематики станка мод. 5330, требование широкой универсальности зуборезного станка неизбежно приводит к усложнению его кинематической структуры, а следовательно, к сложной конструкции станка. Однако для тяжелых моделей станков, предназначенных для обработки деталей больших размеров, это экономически оправданно.

Для того чтобы модернизировать станок с помощью гидравлических связей, выбираем цепь обката.

Запишем уравнение кинематического баланса:

1 оборот стола →      оборотов фрезы.

#### **1.2.4. Кинематическая схема станка, обеспечивающая обработку шевронных цилиндрических колес**

На рисунке 1.6 приведен участок кинематической схемы станка, обеспечивающий обработку шевронных колес. Осевая подача инструмента и дополнительный поворот заготовки производятся от вала 3. В цепь дифференциала встроен механизм реверса. Направление вращения заготовки изменяется автоматически при строго определенном относительном положении элементов цепи

дифференциала. Только в этом случае вершины шевронов зубьев лежат в одной плоскости.

Частота вращения входного вала механизма за один цикл реверсирования составляет 1500–2000 об/мин.

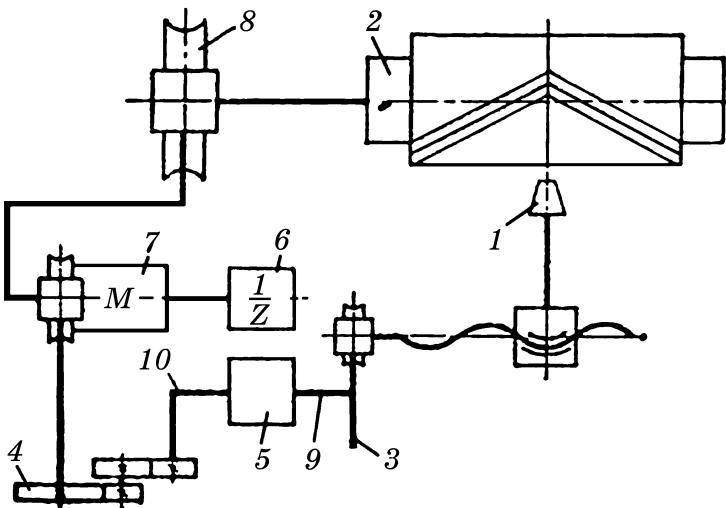


Рис. 1.6

Участок кинематической схемы станка, обеспечивающий обработку шевронных колес:

1 — пальцевая фреза; 2 — заготовка; 3 — вал привода цепи дифференциала; 4 — гитара дифференциала; 5 — механизм реверса; 6 — механизм деления; 7 — дифференциал; 8 — делительное колесо; 9, 10 — входной и выходной валы механизма реверса.

Уравнение баланса цепи дифференциала при обработке шевронных колес отличается от обычных формул при обработке косозубых колес коэффициентом  $i_{pi}$ , который представляет собой передаточное отношение механизма реверса. При  $i_p = 1$  эти уравнения становятся одинаковыми.

#### *Механизмы реверсирования кинематической цепи*

По принципу работы можно выделить механизмы с разрывом кинематической цепи в момент реверсирования, когда кинематическая цепь разделена на две части, и без разрыва цепи, а также механизмы с мгновенным или плавным изменением скорости вращения выходного вала механизма реверса. При мгновенном реверсировании динамические нагрузки вызывают значительные упругие деформации элементов кинематической цепи, что отражается на точности, надежности и долговечности станка [6]. Механизмы с плавным снижением скорости вращения и постепенным повышением ее до номинального значения лишены этого недостатка и поэтому более предпочтительны.

Механизмы с разрывом кинематической цепи обычно имеют однозубую муфту и устройство для управления ее переключением при определенном угловом положении входного вала механизма. На станках фирмы Schiess (рис. 1.7) муфта  $M_2$  переключается с помощью гидроцилиндра 3 по команде от путевых выключателей при подходе суппорта к заданному положению. Вал 2 изменяет направление вращения при постоянном направлении вращения ведущего ва-

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)