Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Методические указания к курсовой работе по
дисциплине «Металлорежущие станки»
для студентов направления

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительного производства»

очной и заочной форм обучения

Энгельс 2024

**УДК 629.3**
**ББК 34-5-02**

**Стекольников М.В.** Проектирование приводов главного движения металлорежущих станков: Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Металлорежущие станки» – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2023. – 28 с.

Рецензенты**:** заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств» ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., д.т.н., проф. Целуйкин В.Н.

доцент кафедры «Оборудование и технологии обработки материалов» ЭТИ СГТУ имени Гагарина Ю.А. к.т.н., Милованова Л.Р.,

В руководстве приведены краткие сведения принципах построения систем ступенчатого и бесступенчатого регулирования скорости вращения шпинделей металлорежущих станков. Также описана последовательность выполнения кинематического и силового расчета, а также содержания пояснительной записки и графической части курсовой работы. Руководство также содержит варианты индивидуальных заданий для проектных расчетов приводов главного движения станков различных групп. Пособие предназначено для использования при выполнении курсовой работы и при самостоятельной работе студента по дисциплине «Металлорежущие станки»

**УДК 629.3**
**ББК 34-5-02**

*Одобрено редакционно-издательским советом*
*ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.*

*Брошюра издается в авторской редакции*

# ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Практическая подготовка и навыки студентов к моменту выполнения этой работы определяется объемом и характером курсовых работ по общетехническим дисциплинам: расчет зубчатых передач, проектирование редукторов и др.

Лучшие конструкторские решения при проектировании приводов могут быть найдены, если конструктор знает конструкцию всего станка, его технологическое назначение, уровень производительности и точности, степень автоматизации и имеет информацию о приводах движения в аналогичных станках.

При выполнении данного курсового проекта студент должен правильно применять стандарты на машиностроительные чертежи, допуски и посадки, нормали станкостроения и типовые конструкции, опубликованные в справочной и нормативной литературе.

При изготовлении деталей на станках снятие припуска с заготовки инструментом осуществляется резанием. Прямолинейное поступательное или вращательное движение заготовки или режущего инструмента, происходящее с наибольшей скоростью в процессе резания, называется **главным движением резания**, или просто главным движением (ГОСТ 5762 – 83). На главное движение затрачивается большая часть мощности станка. Главное движение может быть вращательным или поступательным. При вращательном движении оно характеризуется частотой вращения, при поступательном – частотой двойных ходов. Например, у станков токарной группы главным движением является вращение заготовки. У сверлильных станков, фрезерных и шлифовальных с танков главное движение совершает инструмент. У долбежных, протяжных и строгальных станков главным движением является возвратно-поступательное.

Главный привод металлорежущих станков в значительной степени определяет технико-экономические характеристики станка в целом, такие как диапазон режимов обработки для которого может быть использован станок, точность и качество обработанных деталей, производительность обработки, энергопотребление станка, соответствие требованиям техники безопасности и производственной санитарии.

Приводы главного движения металлорежущих станков студенты проектируют при выполнении курсового проекта по завершении изучения дисциплины «Металлорежущие станки». Эта работа является творческой, требующей определенных навыков в выполнении расчетов и конструирования механических приводов.

Совокупность передач от двигателей, обеспечивающих движение исполнительных органов, называют **приводом**. Различают механический, электрический, пневмо- и гидроприводы и их комбинации: электромеханический, электрогидравлический. В приводах источником движения является электродвигатель, а тип привода определяется видом передач к исполнительному ор-

гану: механическая, электрическая цепь или гидро-(пневмо) сеть. По характеру переключения частот (дискретному или непрерывному) различают ступенчатые и бесступенчатые приводы.

Ступенчатый привод (рис. 2.1) включает в себя: двигатель (М), передачу (П) ременную или зубчатую, коробку скоростей (КС) или коробку подач (КП), систему управления (СУ) частотами вращения, шпиндель (Ш) или суппорт (С). В станках с программным управлением привод включает датчик (Д) скорости и положения исполнительного органа или тахогенератор (ТГ), а также обратную связь, как правило, электрическую, систему управления

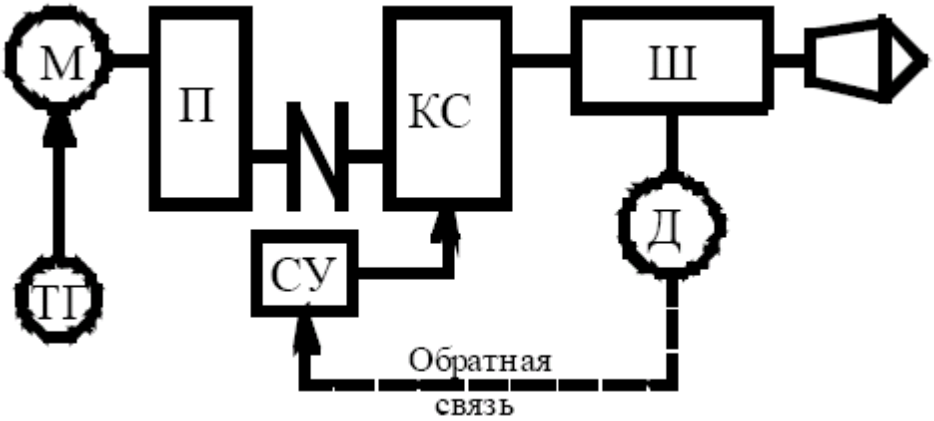



Рис. 1 Обобщенная схема привода главного движения металлорежущего станка

# КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРИВОДА

Частоту вращения шпинделя в станках с главным вращательным движением рассчитывают по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d}$$

где V – скорость [м/мин];

Соответственно максимальные и минимальные значения чисел оборотов шпинделя определяются как:

$$n_{\min} = \frac{1000 \cdot V_{\min}}{\pi \cdot d_{\max}} \quad n_{\max} = \frac{1000 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot d_{\min}}$$

Отношение максимальных и минимальных частот называют диапазоном регулирования

$$R = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{V_{\max} \cdot d_{\max}}{V_{\min} \cdot d_{\min}} = R_V \cdot R_d \ ,$$

где $R_v = v_{max} / v_{min}$ — диапазон скоростей резания;

$R_d = d_{max}/d_{min}$— диапазон обрабатываемых диаметров.

В современных универсальных станках диапазон регулирования частот вращения шпинделя колеблется в больших пределах, что объясняется необходимостью обработки деталей из различных материалов, выполнением раз-

личных по характеру операций. Наилучшие характеристики с точки зрения обеспечения оптимальных режимов обработки имеют приводы с бесступенчатым регулированием частоты вращения. Однако известные в настоящее время системы управления приводами не во всех случаях обеспечивают перекрытие всего диапазона частот вращения, а также получение на шпинделе необходимого крутящего момента. В связи с этим приводы большинства станков делают ступенчатыми. Для современного оборудования характерными тенденциями являются расширение диапазонов бесступенчатого электронного управления частотой вращения и сокращение количества механически переключаемых ступеней скорости.

При ступенчатом регулировании оптимальное число переключений соответствует условию, при котором изменение скорости на новой частоте не превышает допустимого отклонения от номинальной величины.

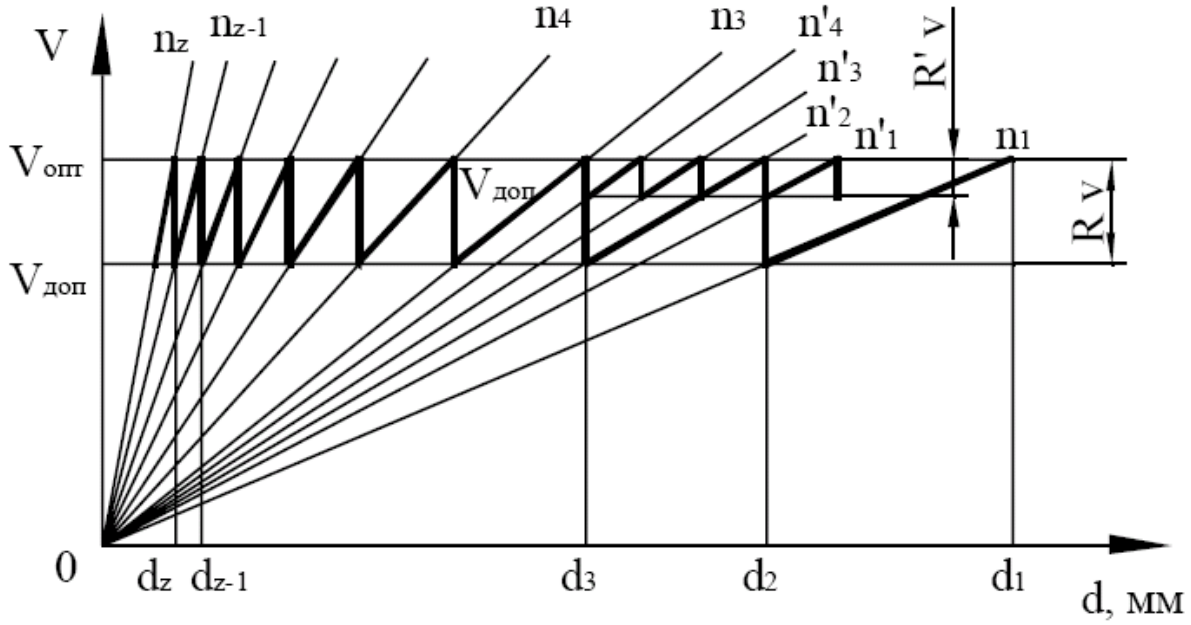



Рис. 2. Лучевая диаграмма геометрического ряда скоростей.

Зависимость скорости от диаметра заготовки (хода инструмента) для заданной частоты изображается прямой линией (лучом) (Рис. 2). Область рекомендуемых скоростей резания определяют от оптимальной $v_{опт}$ до допустимой $v_{доп}$ исходя из периода стойкости инструмента. Границы этой области и абсолютные значения скоростей зависят от обрабатываемого материала, вида инструмента и обработки. Переключение частоты производят при выходе действительной скорости за пределы области $v_{опт}$ — $v_{доп}$ вследствие изменения диаметра заготовки или инструмента.

Например, с уменьшением диаметра заготовки менее $d_2$ следует переключить частоту вращения с $n_1$ на $n_2$, а менее $d_3$ — с $n_2$ на $n_3$ и так до максимальной величины $n_г$ в рассматриваемом диапазоне частот. В точках $d_1$, $d_2$, $d_s$, ..., $d_z$, которым соответствуют два значения скорости резания $v_{опт}$ и $v_{доп}$, переключение производят на частоту оптимальной скорости. Отношение переключаемых частот постоянно равно отношению граничных значений скоростей и является знаменателем геометрического ряда:

$$\varphi = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_3}{n_2} = ... = \frac{n_z}{n_{z-1}} = \frac{V_{опт}}{V_{доп}}.$$

Соответственно:

$$n_2 = \varphi \cdot n_1;$$

$$n_3 = \varphi \cdot n_2 = \varphi^2 \cdot n_1$$

$$...$$

$$n_z = \varphi \cdot n_{z-1} = \varphi^{z-1} \cdot n_1$$

Зная диапазон регулирования частот вращения шпинделя $R_n$, и задаваясь значением φ, можно определить число ступеней вращения шпинделя:

$$z = 1 + \frac{\lg R_n}{\lg \varphi}$$

Отраслевой стандарт ОСТ2 Н11-1-72 рекомендует выбирать значения φ из ряда (выделены предпочтительные значения)

φ = 1,06; 1,12; ***1,26; 1,41; 1,58***

Для числа ступеней скоростей рекомендуется выбор z из соотношения:

$$z = 2^{E_1} \cdot 3^{E_2} = 2, \boldsymbol{3}, \boldsymbol{4}, \boldsymbol{6}, \boldsymbol{8}, 9, \boldsymbol{12}, 16, \boldsymbol{18}, \boldsymbol{24}, 27, 32, 36$$

Подробные рекомендации по назначению для привода главного движения со ступенчатым переключением скоростей значений знаменателя ряда и числа ступеней скорости приведены в литературе [1, 24]. Наиболее распространенные значения $R_n$ и z для станков с вращательным главным движением приведены в табл. 1.

При выборе промежуточных значений частот вращения следует руководствоваться рядами предпочтительных чисел [24].

Табл. 1

Значения $R_n$ и z для станков с вращательным движением

| Группа станков | $R_n$ | z |
|---|---|---|
| Токарные средней величины | 40 – 100 | 12 – 24 |
| Карусельные | 25 – 40 | 9 – 18 |
| Токарно-револьверные автоматы одношпиндельные | 20 – 60 | 12 - 18 |
| многошпиндельные | 10 – 30 | 12 – 18 |
| Фасонно-отрезные и продольно фасонные | 4 – 20 | 12 – 18 |
| Центровые полуавтоматы | 6 – 10 | 12 – 18 |
| Патронные и револьверные полуавтоматы | 8 – 12 | 12 – 18 |
| Вертикально-сверлильные средней величины | 15 – 30 | 6 – 12 |
| Радиально-сверлильные | 8 – 16 | 4 – 9 |
| Фрезерные горизонтальные и вертикальные | 20 – 100 | 12 – 36 |
| Горизонтально-расточные (многоцелевые) | 20 – 60 | 8 – 18 |
| Расточные высокоточные (прецизионные) | 15 – 30 | 12 - 18 |

Рис. 3 позволяет получить наглядное представление о последовательности проектирования кинематической структуры. На начальном этапе (рис. 3-а) по данным технического задания на проектирование устанавливаются границы диапазона частот вращения исполнительного органа (шпинделя). Затем по описанной выше методике определяется необходимое количество ступеней скорости шпинделя (рис. 3-б) и намечается тип двигателя (рис. 3-в).

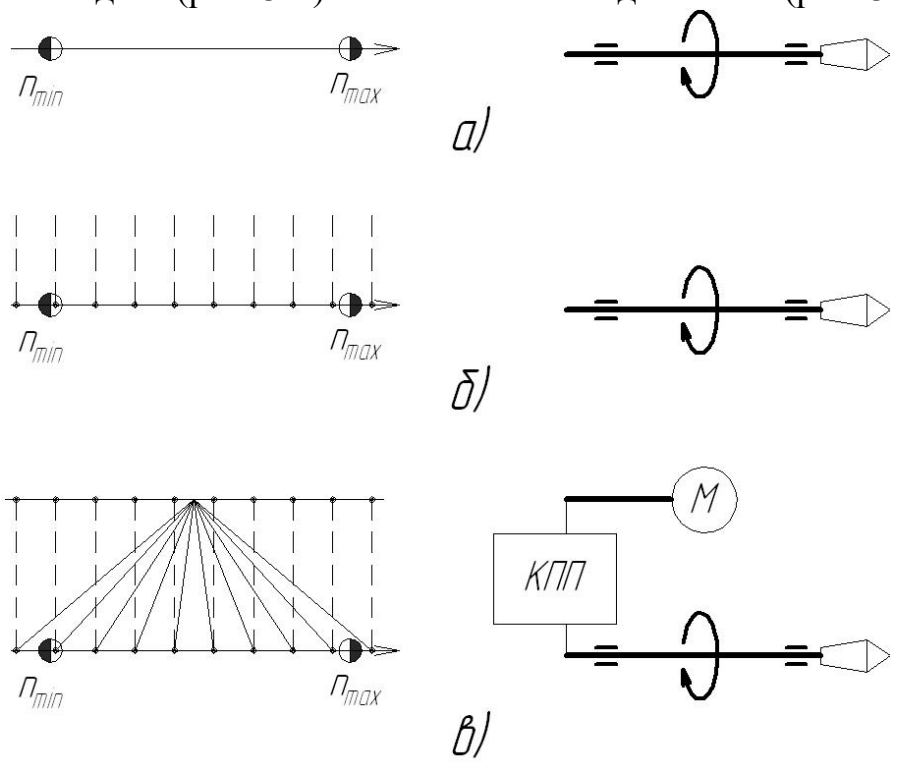



Рис. 3 Последовательность проектирования кинематической структуры привода.

После определения количества ступеней и промежуточных значений частоты вращения выполняется проектирование структуры трансмиссии, т. е. определение вида и количества промежуточных передач, позволяющих получить на выходном валу нужное количество частот вращения. Результат работы на данном этапе оформляется в виде структурной сетки (см. рис. 4)

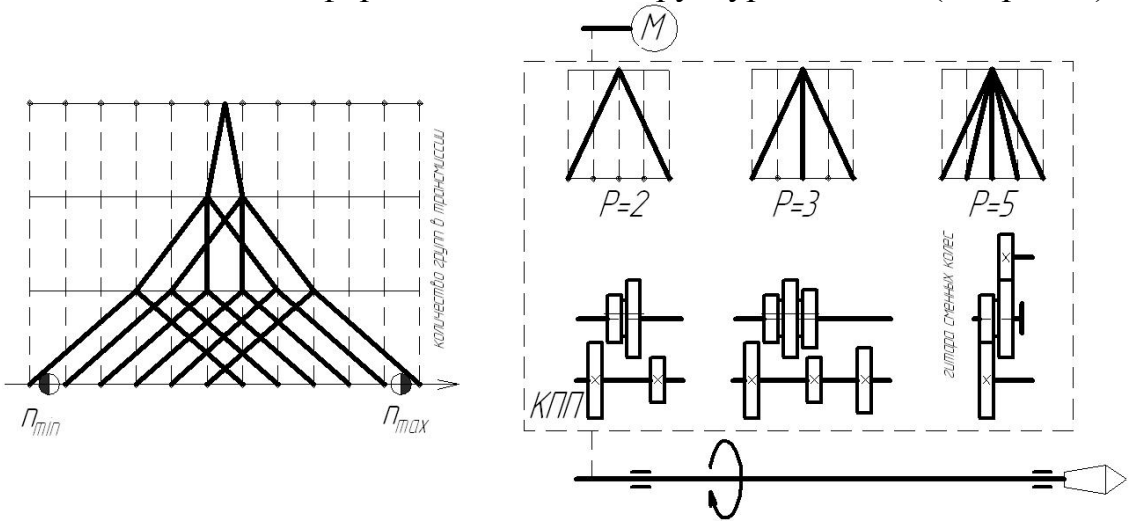



Рис. 4 Подбор количества и характеристик передач в коробке скоростей.

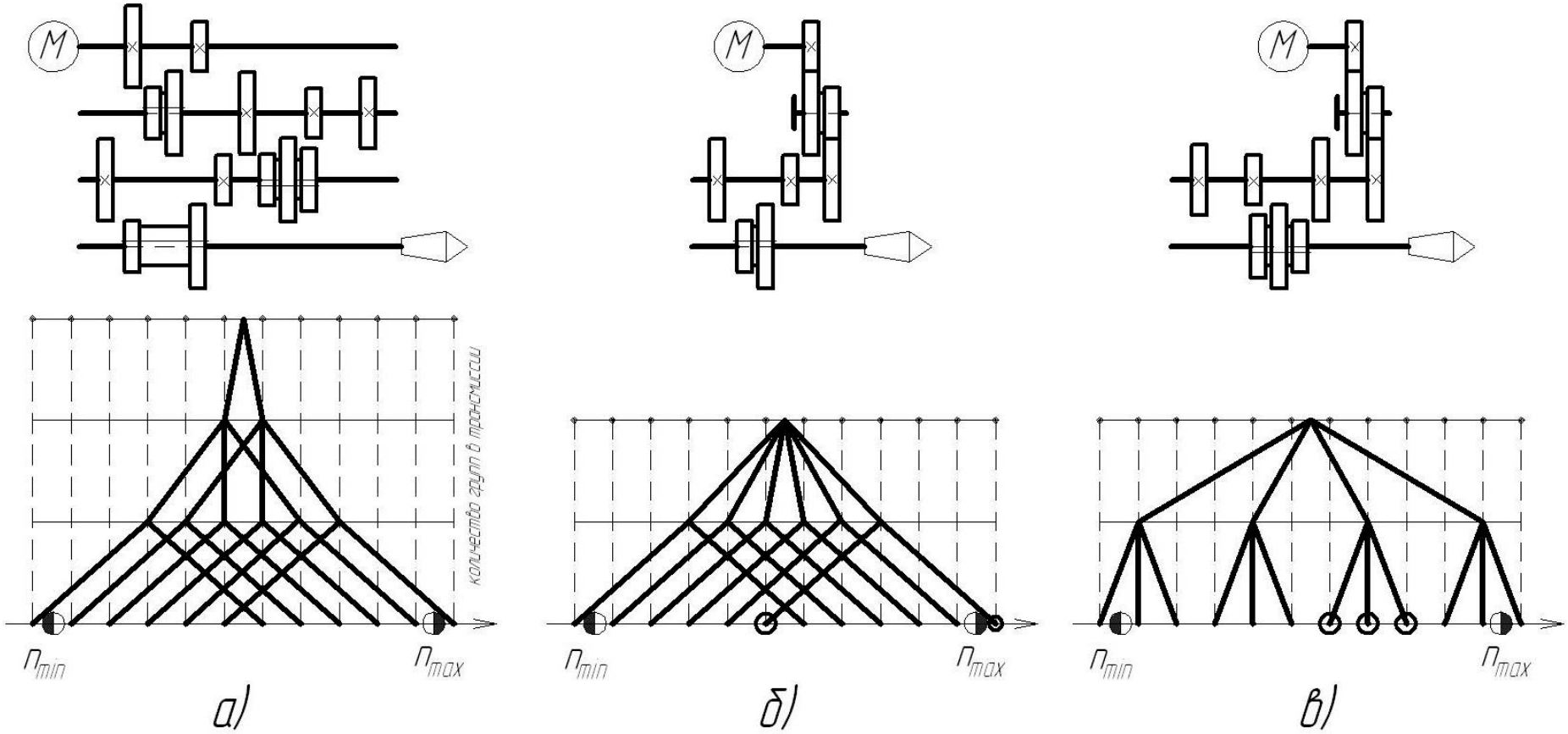



Рис. 5 Оптимизация структурной сетки коробки скоростей

Представленные на рис. 5 кинематические схемы коробок скоростей и соответствующие им структурные сетки имеют следующие особенности. Коробка на рис. 5-а позволяет быстро (на малых оборотах даже на ходу) осуществлять переключение ступеней скорости во всем диапазоне регулирования, т. е. является наиболее универсальной из трех изображенных. Недостатком является то, что в ее структуре больше передач (три вместо двух), следовательно, она имеет большие габариты.

В структуре коробок, изображенных на рис. 5-б и 5-в присутствует гитара сменных колес. Использование такой передачи позволяет сделать привод более компактным, однако степень универсальности его снижается из-за того, что для переключения скорости путем изменения настройки гитары необходимо длительное время. Представленные на рис. 5-б и 5-в коробки могут быть использованы в составе специализированных или специальных станков, переналадка которых выполняется относительно редко. Например, для варианта по рис. 5-б характерно быстрое переключение с высшей на шестую ступень скорости, что позволяет производить на налаженном станке обработку на двух существенно отличающихся режимах (например, силовую обдирочную на малой скорости и чистовую на высокой скорости). Вариант 5-в позволяет быстро переключать скорость между соседними ступенями в узком диапазоне частот, что может быть полезным например на станках для обдирочных операций при обработке ступенчатых валов или сверления отверстий близких по диаметру. Как видно из примера для окончательного выбора кинематической структуры необходимо учитывать такие факторы как степень универсальности оборудования, особенности выполняемых на нем операций.

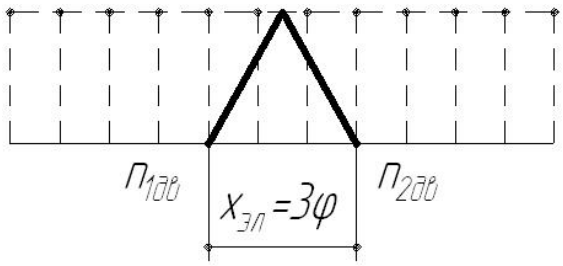


Рис. 6 Двухскоростной электродвигатель на структурной сетке

При использовании в приводе станка двухскоростного двигателя структурная сетка строится таким образом, что двигатель заменяет собой групповую передачу с характеристикой

$$x=\frac{\lg\left(\frac{n_{2дв}}{n_{1дв}}\right)}{\lg\varphi}.$$

Например, при $\varphi=\sqrt[3]{2}=1{,}26$ и двигателе с $n_1$ = 1500 об/мин и $n_2$ = 3000 об/мин, характеристика группы, заменяющей собой электродвигатель составит:

$$x=\frac{\lg 3000/1500}{\lg\sqrt[3]{2}}=\frac{\lg 2}{\lg 2^{1/3}}=3$$

Остальные построения структурной сетки аналогичны приводу с односкоростным двигателем.

На практике номинальная частота вращения двигателя часто не совпадает с серединой диапазона регулирования, в этом случае передаточные отношения некоторых передач в группах могут выйти за допустимые пределы. Для коробок скоростей передаточные отношения должны находиться в интервале от ¼ до 2. Для различных значений знаменателя ряда чисел оборотов количество интервалов между линиями, условно обозначающими передачи, не должно превышать значений, указанных в табл. 2.

Табл. 2

Допустимые числа интервалов для коробок скоростей

| Передачи | Число интервалов при φ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1,06 | 1,12 | 1,26 | 1,41 | 1,58 | 1,78 | 2 |
| Понижающие | 24 | 12 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Повышающие | 12 | 6 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |

Для приведения в соответствие нормативам передаточных отношений в состав трансмиссии включают передачи с постоянным передаточным отношением. Кроме того, намеченная компоновка привода также может потребовать введения в состав трансмиссии передач с фиксированными передаточными отношениями (зубчатых цилиндрических, конических и червячных, ременных и т.п.).

Передачи с постоянным передаточным отношением могут разполагаться в начале, конце или середине кинематической структуры. На графике частот это отражается следующим образом (рис. 7).

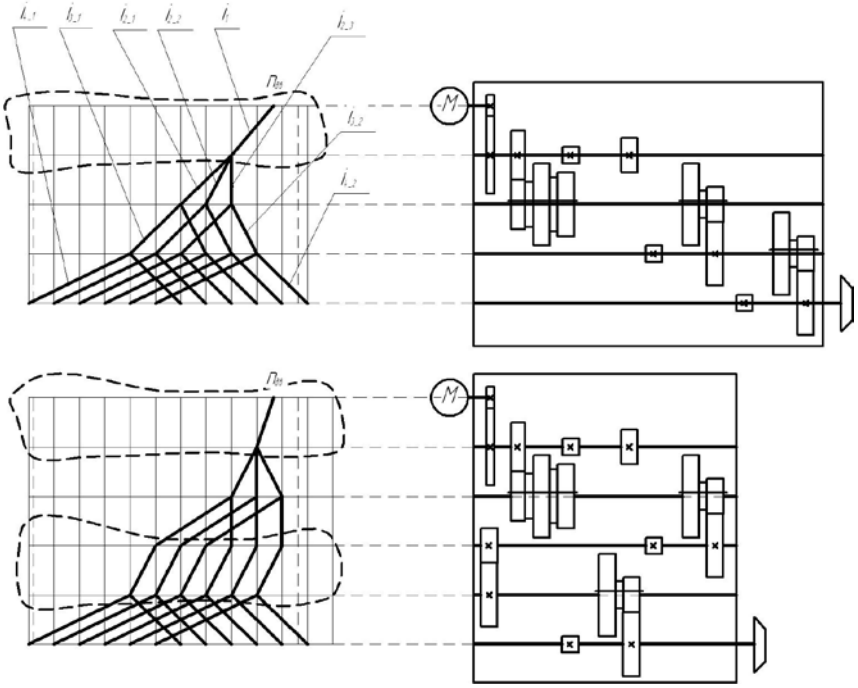


Рис. 7 Передачи с постоянным передаточным отношением в структуре привода главного движения

Подбор чисел зубьев в передачах обеспечивающих необходимые передаточные отношения с помощью таблиц из справочника [20].

После подбора чисел зубьев в передачах выполняется проверка соответствия фактических частот выбранным нормальным. Допускаемое отклонение фактической частоты вращения шпинделя от нормального значения не должно превышать величины:

$$\Delta_n = \pm 10(\varphi - 1)\%$$

В случае проектирования привода широкоуниверсальных станков с количеством скоростей 18 и более использование простых групповых структур приводит к необходимости включать в кинематику привода групповые передачи с характеристикой превышающей допускаемые значения (табл.2). В таких случаях целесообразным является проектирование так называемых сложенных кинематических структур, представляющих собой параллельно или последовательно соединенные с помощью устройств переключения кинематические цепи. Пример сложенной кинематической структуры с последовательно подключаемой дополнительной кинематической цепью приведен на рис. 8.

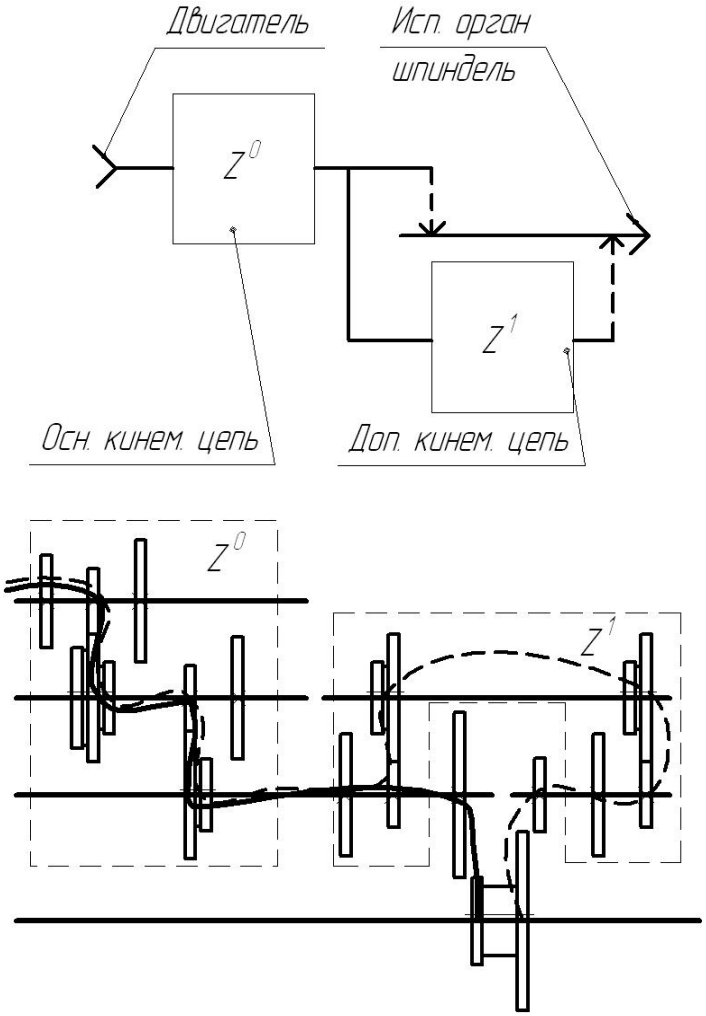



Рис. 8 Схема и пример конструктивной реализации сложенной кинематической структуры привода.

Базовая кинематическая структура (рис. 9-а) для последней групповой передачи имеет характеристику x=12φ, что больше допустимого значения (для φ>1,12). При переходе к сложенной структуре для последней групповой передачи уменьшают характеристику до x=6φ. При этом общий диапазон ре-

гулирования сокращается. Коробка не обеспечивает частот вращения в верхней и нижней частях диапазона, а в середине несколько ступеней совмещаются (Рис. 9-б). Кинематическую структуру разделяют на две части и выполняют смещение структурных сеток к краям диапазона (Рис. 9-в). В кинематическую схему добавляют групповую передачу, осуществляющую соединение исполнительного органа (шпинделя) с основной или дополнительной кинематической цепью (Рис. 9-г). Для окончательного оформления кинематической структуры осуществляется коррекция передаточных отношений групп дополнительной кинематической цепи для обеспечения характеристики переключающей группы в допустимых пределах.

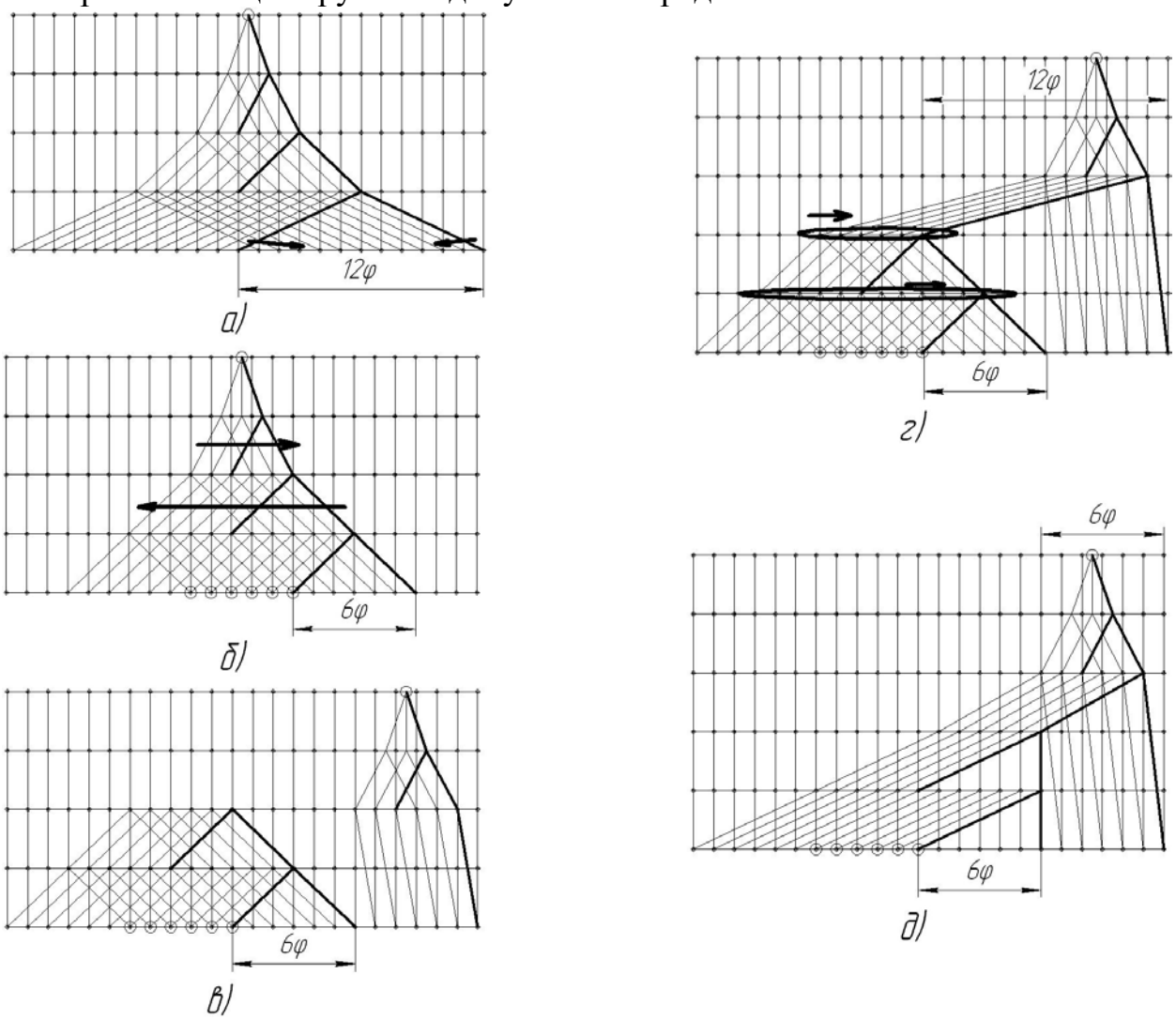



Рис. 9 Последовательность проектирования графика частот привода со сложенной кинематической структурой.

# ПРИВОДЫ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ С БЕССТУПЕНЧАТЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Применение приводов с бесступенчатым регулированием позволяет повысить производительность станков благодаря точной настройке оптимальной скорости резания и ее регулированию в процессе выполнения цикла обработки. Для бесступенчатого регулирования скорости в основном применяют приводы с двигателем постоянного тока и тиристорным управлением в последнее время активно развивается направление, связанное с использованием двигателей переменного тока с частотным управлением.

## ПРИВОДЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Частота вращения двигателя постоянного тока регулируется в двух областях. От минимальной частоты вращения до номинальной $n_{ном}$ регулирование осуществляется изменением напряжения в цепи якоря, при этом на валу двигателя поддерживается постоянный крутящий момент. Выше $n_{ном}$ регулирование частоты вращения производится изменением поля возбуждения, и мощность двигателя остается постоянной. Диапазон регулирования при постоянной мощности $R_p$ бесступенчатых приводов постоянного тока составляет 2,5 – 4. Если этого достаточно для станка, регулируемый электродвигатель постоянного тока с максимальной частотой вращения 4000…6000 об/мин соединяют непосредственно со шпинделем станка. Для обеспечения более широкого диапазона регулирования (для современных станков 50…250), между электродвигателем и шпинделем устанавливают двух-, трех- или четырехступенчатую коробку скоростей, а между приводом и коробкой или между коробкой и шпинделем помещают ременную передачу с передаточным отношением i = 0,5…2.

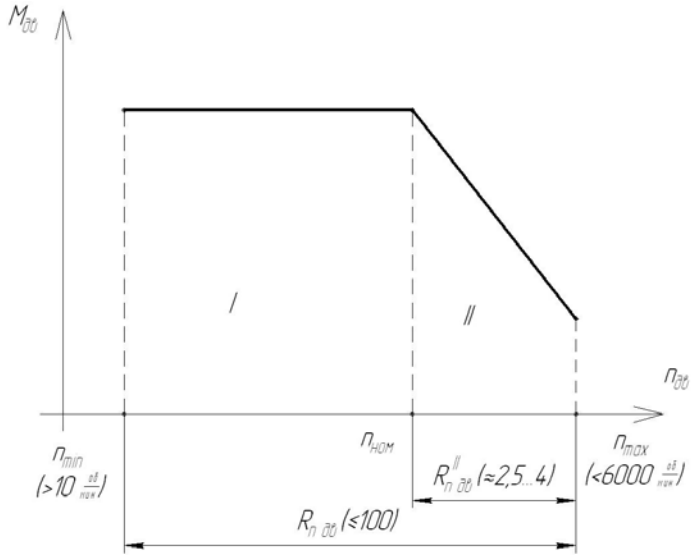



Рис. 10 Механическая характеристика регулируемого привода с двигателем постоянного тока.

Общий вид механической характеристики двигателя постоянного тока при использовании двухдиапазонного регулирования приведен на рис. 10. Для серийно выпускаемых двигателей постоянного тока, применяемых в

приводах металлорежущих станков на рис. 10 приведены значения предельных частот вращения $n_{дв}$ (максимальной и минимальной), ширина диапазона регулирования (общая $R_{п\,дв}$ и второй зоны регулирования $R^{II}_{п\,дв}$).

Ограничение по максимальной частоте вращения двигателя связано с возрастанием на высоких скоростях механических потерь в двигателе. Потери увеличиваются из-за трения, дисбаланса вращающихся частей. Также на высоких скоростях имеются трудности с коммутированием якорного тока в коллектроном узле двигателя.

Ограничение по минимальной частоте вращения связано с особенностями датчика обратной связи (тахогенератора), применяемого в автоматически регулируемых приводах: при малых частотах вращения э.д.с. генератора оказывается ниже пределов чувствительности приборов в системе автоматического регулирования скорости (либо имеет значения сравнимые с уровнем помех).

При выборе двигателя следует ориентироваться на такие паспортные данные как номинальная частота вращения (или максимальная частота вращения). Тогда другая граница диапазона регулирования частоты вращения определится по формулам:

- при известной номинальной частоте вращения:

$$\begin{cases} n_{\max} = n_{ном} \cdot R^{II}_{п\,дв} \\ n_{\min} = n_{ном} \cdot \dfrac{R^{II}_{п\,дв}}{R_{п\,дв}} \geq 10\ об/мин \end{cases}$$

- при известной максимальной частоте вращения:

$$n_{\min} = \frac{n_{\max}}{R_{п\,дв}} \geq 10\ об/мин$$

При разработке привода, в составе которого предусмотрена механическая коробка скоростей диапазон регулирования $R_{мех}$ определяется по формуле:

$$R_{мех} = \frac{R_п}{R_{эл}} = \left(R^{\max}_{гр}\right)^z$$

где $R_п$ – общий диапазон регулирования частоты вращения;

$R_{эл}$ – диапазон регулирования электродвигателя;

$R^{\max}_{гр}$ - максимальный диапазон регулирования групповой передачи коробки скоростей (не более 8 [24]);

z – количество групп в коробке скоростей:

$$z = \frac{\lg R_п / R_{эл}}{\lg R^{\max}_{гр}}$$

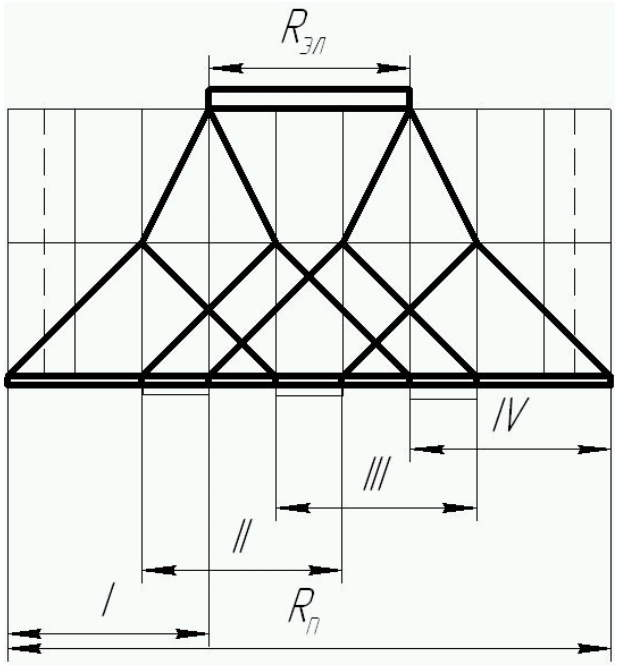
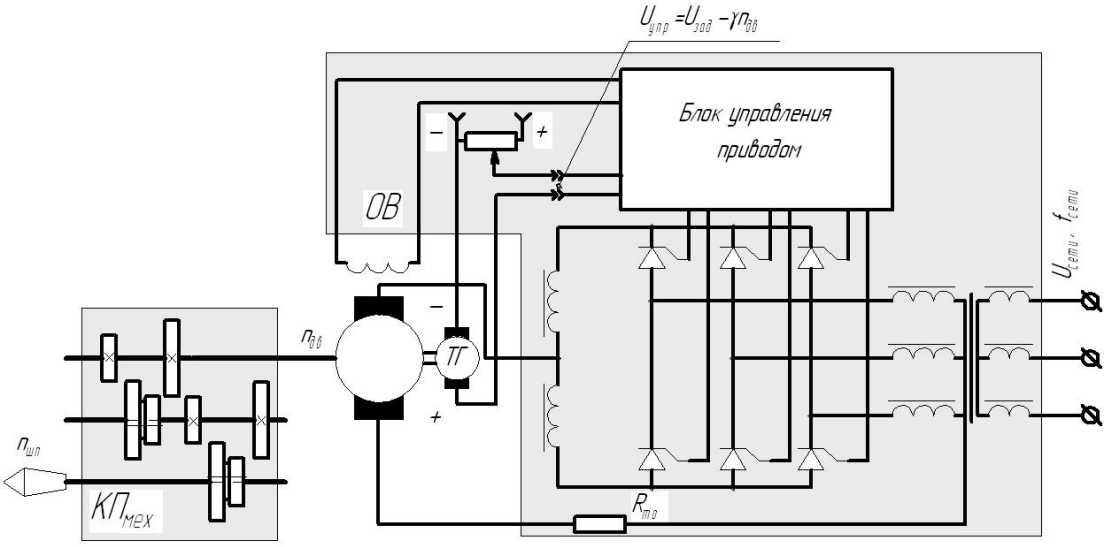



Рис. 11. Структурная сетка привода с 4-х ступенчатой коробкой и регулируемым двигателем постоянного тока.

Выбор количества передач в группах следует осуществлять таким образом, чтобы в пределах всего диапазона регулирования достигалась непрерывность задания скорости, допускается незначительные (5 – 7%) перекрытия диапазонов.

Наиболее распространены в качестве блоков управления тиристорные преобразователи, реализующие различные законы управления, такие как фазовое или импульсное (широтно-импульсное, частотно импульсное) управление [23].




$$R_{эл} = \frac{n_{дв}^{max}}{n_{дв}^{min}} = (<100) : 1 \; n_{min}^{пред} = 10 \text{ об/мин}$$

Рис. 12. Пример реализации бесступенчатого привода с управляемым двигателем постоянного тока и 4-х ступенчатой коробкой скоростей.

## ПРИВОДЫ С АСИНХРОННЫМИ РЕГУЛИРУЕМЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Использование асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в приводах металлорежущих станков со ступенчатой механической трансмиссией требует проектирования коробок передач с большим числом ступеней, имеющих значительные габаритные размеры и стоимость. В то же время,

простота конструкции, удобство эксплуатации асинхронных двигателей делают весьма привлекательными перспективы использования их в составе приводов. В настоящее время активно развивается направление связанное с внедрением в практику бесступенчато регулируемых асинхронных двигателей. Кратко рассмотрим основные способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей (более подробная информация в источниках [11, 12, 21, 22]).

Практическое применение имеют следующие способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей: реостатное, комбинированное и частотное.

При **реостатном регулировании** изменение частоты вращения достигается введением дополнительных активных сопротивлений в цепи обмоток двигателя (статорных и роторных).

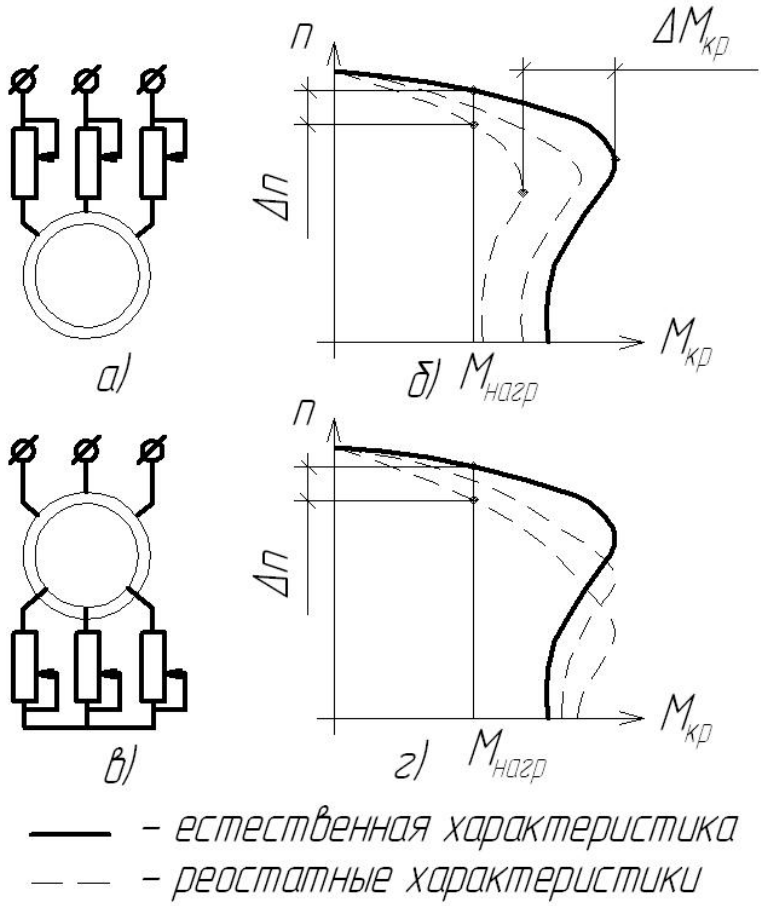



Рис. 13 Механические характеристики асинхронных двигателей при реостатном регулировании

Как видно из рис. 13-б при регулировании сопротивлений установленных последовательно с обмотками статора наблюдается одновременное снижение частоты вращения $\Delta n$ и предельного крутящего момента $\Delta M_{кр}$, причем снижение критического значения момента происходит значительно быстрее, чем снижение частоты вращения, что отрицательно сказывается на перегрузочной способности двигателя.

Кроме того, при пониженном напряжении на статоре и постоянном моменте нагрузки на двигателе возрастает его скольжение, повышаются ротор-

ный и статорный токи, что ведет к нагреву двигателя. Указанные недостатки ограничивают область использования данного способа регулирования, и в станках он применяется для предотвращения ударов при запуске электропривода.

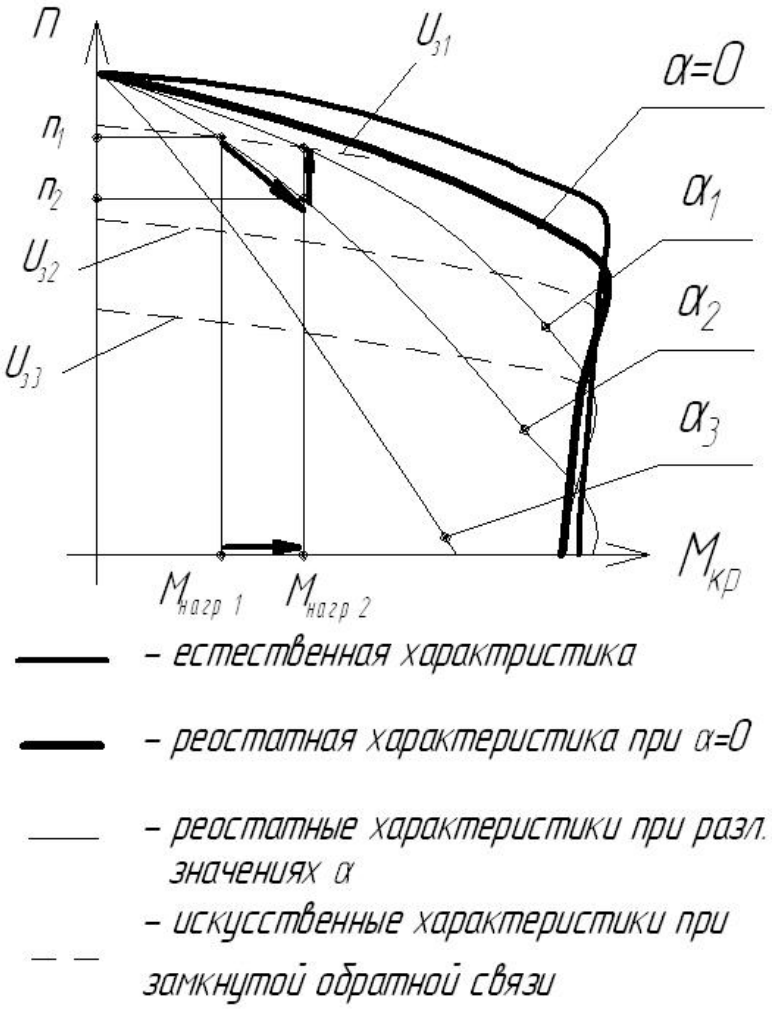
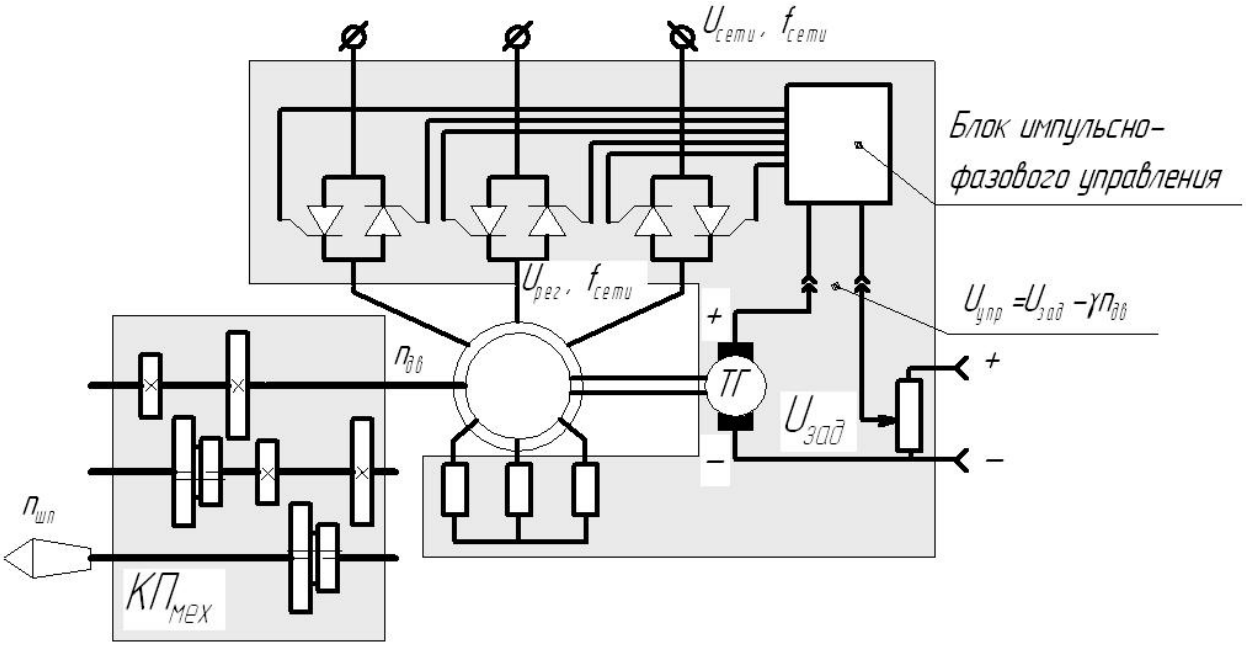



Рис. 14 Характеристики асинхронного двигателя при комбинированном управлении.

При введении реостатов в цепь ротора (рис. 13-г) диапазон регулирования частоты получается более широким, а критический момент остается постоянным. Недостатком данного способа регулирования является пониженная жесткость механической характеристики. То есть при колебаниях момента нагрузки, особенно в области малых частот вращения колебания частоты $\Delta n_2$ будут значительно больше чем при более высоких частотах $\Delta n_1$. Диапазон регулирования частоты вращения $R_{n\ дв}$ = 2…2,5 : 1. Схемы со ступенчатым регулированием сопротивления за счет магазинов сопротивлений, переключаемых с помощью контакторов или жидкостные сопротивления, осуществляющие плавное регулирование. Реостатное управление применяется в кранах, подъемниках и т.д.

**Комбинированное регулирование** осуществляется изменением напряжения статора и при введении в цепь ротора добавочных сопротивлений. Данный способ реализуется с помощью специальных блоков – управляемых тиристорных преобразователей. Использование таких устройств позволяет организовать систему автоматического управления с обратной связью по напряжению. В зависимости от периода закрытия тиристорных ключей $t_{закр}$; который характеризуется величиной угла закрытия $\alpha=\frac{t_{закр}}{T}\cdot 360^{\circ}$ (рис. 16) получается семейство механических характеристик ($\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$). Характеристики, соответствующие различным значениям угла α не всегда соответствуют заданным требованиям к точности регулирования частоты.




$$R_{эл} = \frac{n_{дв}^{ном}}{n_{дв}^{min}} = (5...10):1$$

Рис. 15 Схема привода станка с использованием комбинированного управления двигателем с обратной связью.

Например при изменении момента нагрузки с величины $M_{нагр1}$ до $M_{нагр2}$ при фиксированном значении угла закрытия αчастота вращения падает до значения $n_2$. При этом э.д.с., вырабатываемая генератором уменьшается на величину $\gamma(n_2 - n_1)$ при этом значение управляющего напряжения $U_у = U_з - \gamma \cdot n$ увеличивается, изменяя настройку блока импульсно-фазового управления. В результате значение угла закрытия α уменьшается, частота вращения увеличивается (до точки расположенной на искусственной механической характеристике). Таким образом, за счет настройки закона управления углом закрытия может быть получена искусственная механическая характеристика, имеющая необходимую жесткость. Изменяя значения задающего напряжения $U_з$ с помощью блока импульсно-фазового управления можно получить семейство искусственных механических характеристик.

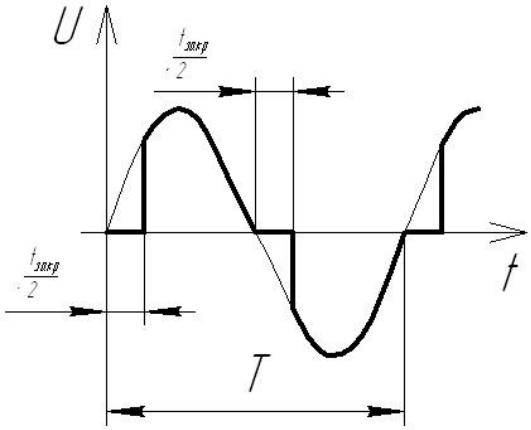



Рис.16

Использование импульсно-фазового управления с системой обратной связи по скорости достигается диапазон регулирования 10:1, регулирование ча-

стоты вращения плавное. Регулирование осуществляется от номинальной частоты «вниз» от естественной характеристики. Существенным ограничением является необходимость использования добавочных сопротивлений в цепи ротора, что возможно только у специальных асинхронных двигателей (имеющих ротор с контактными кольцами).

**Частотное регулирование** является одним из наиболее перспективных и широко используемых в настоящее время. Принцип его состоит в том, что изменяя частоту питающего двигатель напряжения можно изменять частоту вращения холостого хода, получая различные искусственные характеристики. Этот способ обеспечивает широкий диапазон регулирования частоты, плавность регулирования и высокую жесткость характеристик.

Приближенным условием обеспечения стабильности регулирования частоты вращения при постоянном моменте нагрузки является выражение

U/f = const.

На практике требуется изменять напряжение на статоре несколько меньше чем частоту для компенсации снижения перегрузочного момента двигателя в области малых частот. При этом удается достичь семейства механических характеристик (II, III, IV), приведенных на рис. 17.

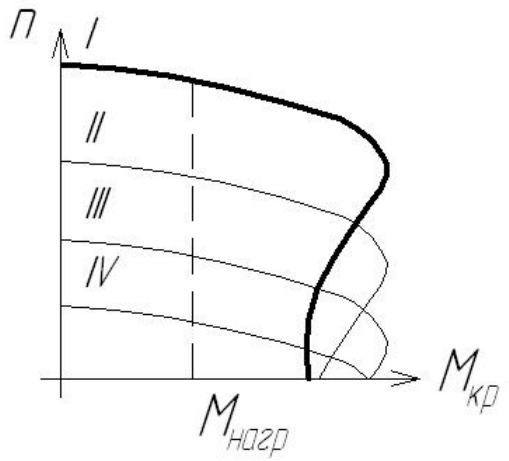
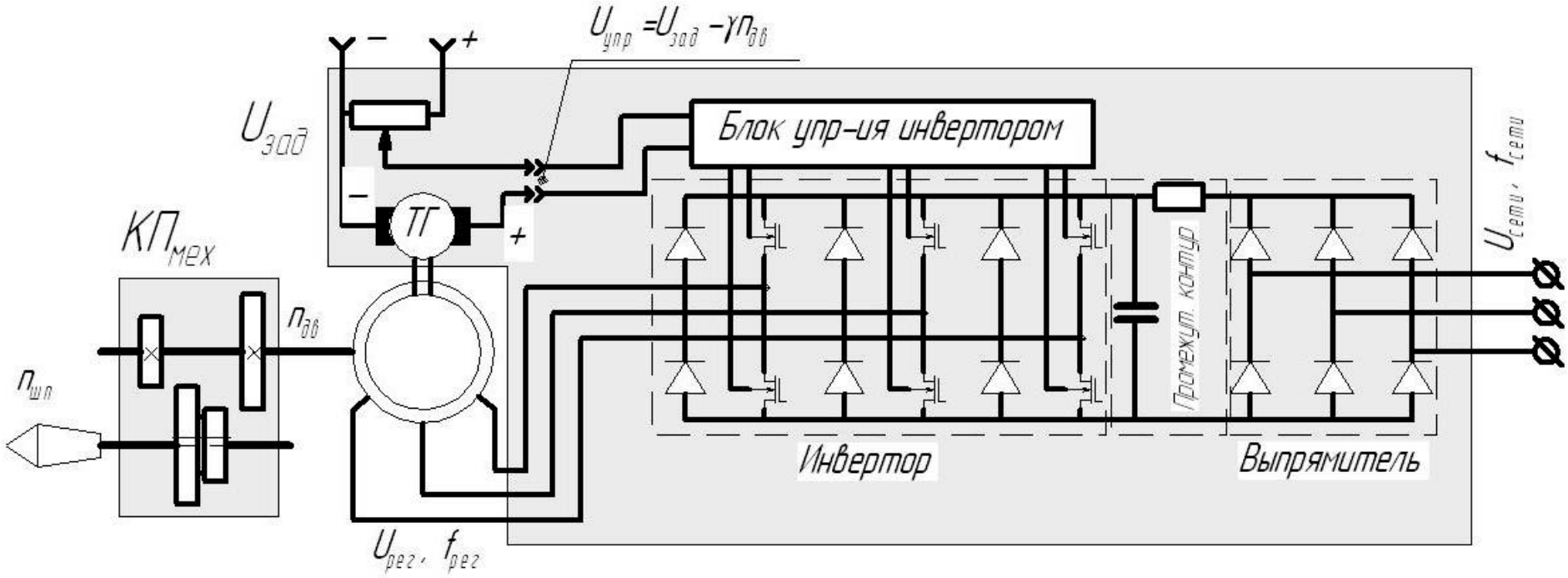



Рис. 17 Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании

В современных блоках управления асинхронным приводом распространены преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока (U-инверторы). Схема силовой части регулируемого асинхронного привода на базе такого инвертора с обратной связью приведена на рис. 18.

Отличительной особенностью частотного управления приводами является возможность регулирования частоты вращения двигателя как «вниз», так и «вверх» от номинала. Значения диапазонов регулирования, реализуемые в современных приводах приведены на рис. 18.

При определении количества диапазонов механической составляющей привода с управляемым асинхронным двигателем следует руководствоваться расчетными зависимостями, применяемыми для бесступенчатых приводов с двигателями постоянного тока. Диапазоны регулирования частоты вращения, достигаемые при использовании различных схем управления, приведены на рис.15 и 18, а также в тексте.




$$R_{1\,эл} = \frac{n_{дв}^{max}}{n_{дв}^{ном}} = (1{,}1 \ldots 1{,}25):1 \qquad R_{2\,эл} = \frac{n_{дв}^{ном}}{n_{дв}^{min}} = (<100):1$$

Рис. 18 Структура регулируемого асинхронного привода с частотным управлением

Следует иметь в виду, что при использовании различных типов устройств для управления двигателем могут быть получены приводы шпинделя станка существенно отличающиеся по структуре механической части (имеющие разное количество групп передач и количество ступеней в каждой группе).

Например, при использовании в приводе двигателя с реостатным регулированием частоты вращения для обеспечения заданного диапазона регулирования потребуется дополнить его 9-ти ступенчатой коробкой скоростей (см. рис. 19).

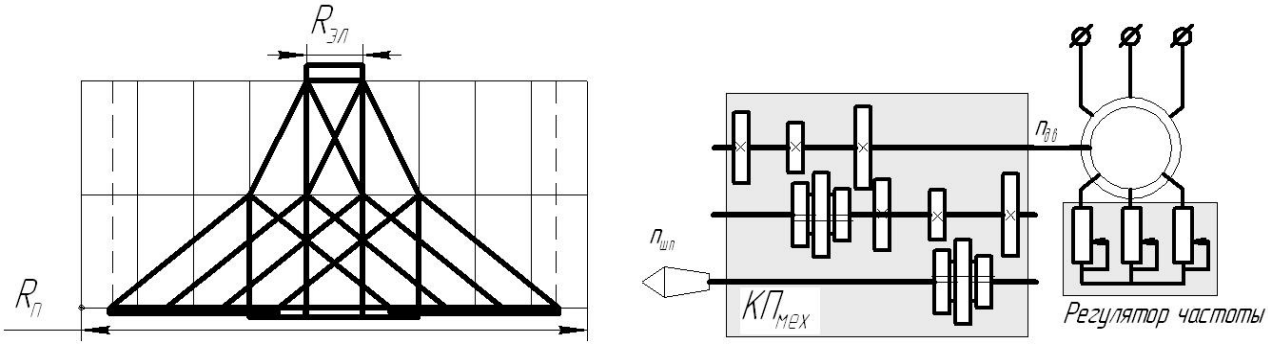
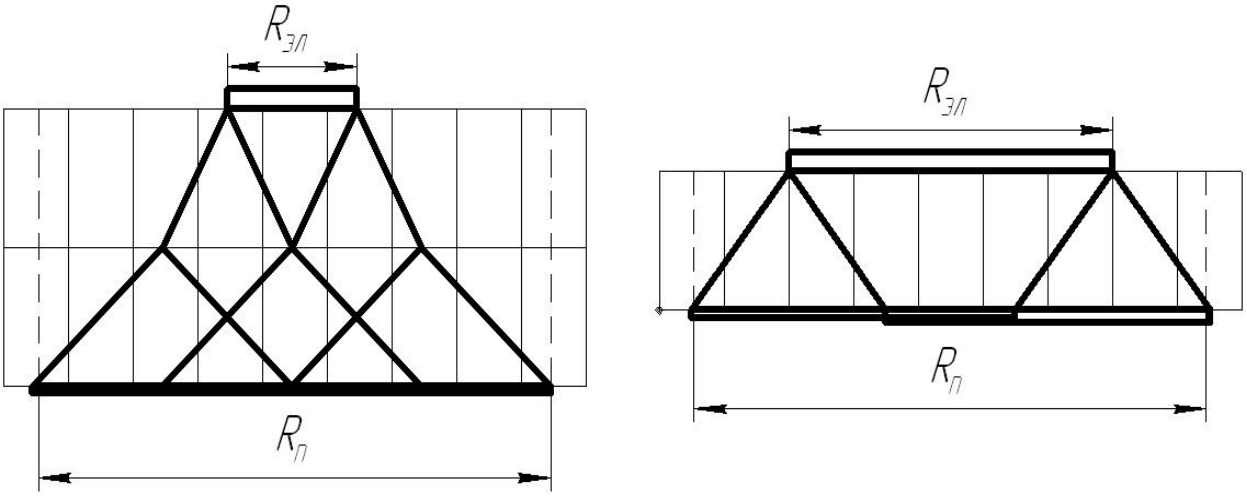



Рис. 19 Привод станка с реостатным регулированием частоты вращения.

При использовании системы комбинированного регулирования (рис.15) для привода шпинделя понадобится 4-х ступенчатая коробка скоростей (структурная сетка – см. рис. 20-а), а при использовании частотного управления (рис. 18) – 2-х ступенчатая коробка (структурная сетка – рис. 20-б).




а б

Рис. 20 Структурные сетки привода шпинделя для управляемых асинхронных двигателей

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

После определения кинематической структуры привода производят определение мощности электродвигателя. Мощность электродвигателя главного движения определяется по формуле:

$$N_{дв} = \frac{N_{шп}}{\eta_{пр}}.$$

При эксплуатации приводов металлорежущих станков допускается перегрузка двигателя до 25%, поэтому допускается определять мощность электродвигателя по формуле:

$$N_{дв} = \frac{N_{шп}}{1{,}25 \cdot \eta_{пр}},$$

где $N_{шп}$ - мощность резания (на шпинделе станка);

$\eta_{пр}$ - к.п.д. привода (зависит от количества передач в структуре привода, к.п.д. передач определяется по таблице 3);

Мощность на шпинделе станка определяется по формуле:

$$N_{шп} = \frac{M_{кр\max} \cdot n_{расч} \cdot \pi}{30},$$

максимальный крутящий момент на шпинделе:

$$M_{кр\max} = P_{z\max} \cdot \frac{d_{\max}}{2}$$

расчетное значение частоты вращения, для которого определяется максимальное значение мощности привода составляет:

$$n_{расч} = (0{,}6...0{,}75) \cdot n_{\max}$$

Табл. 3

| № п/п | Тип передачи | к.п.д. ($\eta$) |
|---|---|---|
| 1. | Ременная передача (плоским ремнем) | 0,98 |
| 2. | Клиноременная передача | 0,96 |
| 3. | Зубчатая передача:<br>- цилиндрическая со шлифованными зубьями | 0,99 |
| 4. | - цилиндрическая с нешлифованными зубьями | 0,98 |
| 5. | - коническая | 0,97 |
| 6. | Червячная передача | 0,7 – 0,9 |
| 7. | Цепная передача | 0,96 – 0,97 |
| 8. | Подшипники качения | 0,995 |
| 9. | Подшипники скольжения<br>- при принудительной смазке | 0,985 |
| 10. | - при обычной смазке | 0,98 |
| 11. | Кулиса и ползун в поперечно-строгальных станках | 0,9 |

# КУРСОВАЯ РАБОТА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ»

1. Кинематический расчет привода.
   1.1. По исходным данным (см. таблицу) определяются границы диапазонов регулирования по частоте вращения и крутящему моменту на выходном валу (шпинделе).
   1.2. Выбираются по рекомендациям методической литературы параметры ступенчатой трансмиссии (знаменатель ряда φ, число ступеней частот z). Для приводов с бесступенчатым регулированием определяются количество диапазонов механической подсистемы привода с учетом границ регулирования частоты и крутящего момента электродвигателей.
   1.3. Составляются несколько вариантов структурных сеток, выбрать оптимальную и доказать ее оптимальность. На основе структурной сетки составить картины частот (2 – 3 варианта), выбрать оптимальную картину частот (с обоснованием).
   1.4. Определяются передаточные отношения и числа зубьев передач механической части трансмиссии.

В пояснительной записке по результатам расчета оформляется кинематическая схема привода шпинделя и график частот вращения с указанием параметров передач (числа зубьев шестерен, диаметры шкивов, номинальные частоты вращения электродвигателя)

2. Силовой расчет привода.
   2.1. Определяются значения крутящих моментов, действующих на валах на каждой из ступеней частот вращения.
   2.2. Выбирается мощность электродвигателя (с учетом потерь в подшипниках и передачах).
   2.3. Определяется модуль зубчатых передач из условия контактной прочности и прочности на изгиб, а также диаметры промежуточных валов из условия усталостной прочности.
   2.4. Выбираются типоразмеры подшипников промежуточных валов из условия долговечности и шпиндельных подшипников с учетом долговечности и класса точности.

По результатам силовых расчетов выполняется чертеж развертки по валам коробки скоростей станка, прорабатывается конструктивное оформление шпиндельного узла и промежуточных валов, намечается конструкция системы управления переключением скоростей.

Для вариантов задания, предусматривающих управление коробкой в автоматическом цикле, выполняется обоснование типоразмеров электромагнитных муфт, гидроцилиндров. Для вариантов с ручным управлением выполняются проверочные расчеты усилий на рукоятках управления. В графической части выполняется чертеж системы управления одной из передач (разрез по органам управления).

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФРМЛЕНИЮ ЧЕРТЕЖЕЙ И ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ.

1. При оформлении чертежей следует руководствоваться требованиями ЕСКД к оформлению чертежей общего вида, сборочных чертежей и рабочих чертежей детали.
2. Требования к выполнению кинематических, электрических и гидравлической схем в соответствии с ЕСКД.
3. Пояснительная записка оформляется по ГОСТ 7.32-81 и содержит:
   - Титульный лист установленной формы;
   - задание на курсовое проектирование (подписанное исполнителем и руководителем проекта);
   - содержание;
   - введение (с краткой характеристикой объекта разработки);
   - кинематический расчет привода;
   - силовой расчет привода;
   - описание и расчеты механизмов управления переключением;
   - заключение (с краткой характеристикой достигнутых результатов, степени использования современных технических достижений);
   - список использованных источников.
4. Рисунки таблицы и формулы в пояснительной записке нумеруются сквозной нумерацией, формулы и иные сведения из нормативной, справочной и учебной литературы снабжаются ссылками.

Темы контрольной и курсовой работы по дисциплине «Металлорежущие станки».

| № п/п | Наименование темы | Параметры привода | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ∅ детали, инструмента | Скорость резания | Материал детали | Материал инструмента | Максимальн/припуск (s x t), мм |
| 1. | Проектирование привода токарно-винторезного станка с неразделенным приводом | 40 – 200 | 25 - 400 | Сталь, $\sigma_B$<650 | Тв. сплав | 0.5*3 |
| 2. | Проектирование привода токарно-винторезного станка с неразделенным приводом и двухскоростным двигателем. | 50 – 300 | 30 – 500 | Сталь, $\sigma_B$<650 | Тв. сплав | 0.5*3 |
| 3. | Проектирование привода токарно-револьверного станка с неразделенным приводом | 50 – 400 | 40 – 600 | Сталь, $\sigma_B$<650 | Тв. сплав и быстр. сталь | 0.5*5 |
| 4. | Проектирование привода токарного станка-автомата с неразделенным приводом | 25 – 200 | 15 – 300 | Сталь, $\sigma_B$<900 | Тв. сплав и быстр. сталь | 0.5*3 |
| 5. | Проектирование привода токарно-револьверного станка с неразделенным приводом и двухскоростным двигателем. | 35 – 300 | 20 – 400 | Сталь, $\sigma_B$<900 | Тв. сплав | 0.5*3 |
| 6. | Проектирование привода токарного станка-автомата с неразделенным приводом и двухскоростным двигателем. | 40 – 400 | 40 – 500 | Сталь, $\sigma_B$<900 | Тв. сплав | 0.5*5 |
| 7. | Проектирование привода токарно-винторезного станка с разделенным приводом. | 15 – 200 | 10 – 200 | Чугун, НВ<220 | Тв. сплав | 0.5 * 3 |
| 8. | Проектирование привода токарно-револьверного станка с разделенным приводом. | 40 – 350 | 10 – 240 | Чугун, НВ<220 | Тв. сплав | 0.5 * 3 |
| 9. | Проектирование привода токарно-винторезного станка с разделенным приводом и двухскоростным двигателем. | 60-500 | 15 – 200 | Чугун, НВ<220 | Тв. сплав и быстр. сталь | 0.5 * 5 |
| 10. | Проектирование привода токарно-револьверного станка с разделенным приводом и двухскоростным двигателем. | 20 – 200 | 20 – 150 | Чугун, НВ<170 | Тв. сплав и быстр. сталь | 0.5 * 3 |

| № п/п | Наименование темы | Параметры привода | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ∅ детали, инструмента | Скорость резания | Материал детали | Материал инструмента | Максимальн/припуск (s x t), мм |
| 11. | Проектирование привода токарного станка-автомата с разделенным приводом. | 15 – 200 | 30 – 150 | Сталь, $\sigma_B$<650 | Тв. сплав | 0.3 * 2.5 |
| 12. | Проектирование привода токарного станка-автомата с разделенным приводом и двухскоростным двигателем. | 50 – 380 | 20 – 400 | Сталь, $\sigma_B$<650 | Тв. сплав | 0.3 * 5 |
| 13. | Проектирование привода токарно-винторезного станка с неразделенным приводом и двигателем постоянного тока | 25 – 400 | 15 – 300 | Сталь, $\sigma_B$<900 | Тв. сплав | 0.7 * 5 |
| 14. | Проектирование привода токарно-винторезного станка с разделенным приводом и двигателем постоянного тока | 30 – 200 | 20 – 350 | Чугун, НВ<170 | Тв. сплав | 0.7 * 5 |
| 15. | Проектирование привода вертикально-сверлильного станка. | 10 – 30 | 5 – 90 | Сталь, $\sigma_B$<650 | Быстр. сталь | 0,5 * 15 |
| 16. | Проектирование привода вертикально-сверлильного с двухскоростным двигателем. | 10 – 40 | 5 – 80 | Сталь, $\sigma_B$<900 | Тв. сплав и быстр. сталь | 0,75 * 20 |
| 17. | Проектирование привода вертикально-сверлильного станка с двигателем постоянного тока. | 15 – 50 | 5 – 90 | Сталь, $\sigma_B$<900 | Тв. сплав | 1 * 25 |
| 18. | Проектирование привода горизонтально-фрезерного станка. | 20 – 300 | 30 – 240 | Сталь, $\sigma_B$<650 | Тв. сплав | 0,25 * 5 |
| 19. | Проектирование привода горизонтально-фрезерного с двухскоростным двигателем. | 5 - 40 | 10 – 60 | Сталь, $\sigma_B$<900 | Тв. сплав | 0,15 * 3 |
| 20. | Проектирование привода горизонтально-фрезерного станка с двигателем постоянного тока. | 10 – 100 | 10 – 80 | Чугун, НВ<170 | Тв. сплав и быстр. сталь | 0,2 * 3 |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Проектирование** приводов главного движения металлорежущих станков: метод. указания для студентов спец. 151001 / сост. Г. И. Киреев.– Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 46 с.
2. **Проектирование технологического** металлообрабатывающего оборудования: Методические указания для курсового и дипломного проектов /Сост. Н. А. Кутний. Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. 78 с.
3. **Поляков А.Н., Парфенов И.В.**Расчет коробок передач металлорежущих станков с применением ЭВМ: - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 43 с.
4. **Гонтарь И.Н., Денисова Н.Е.,**ОФОРМЛЕНИЕ УЧЕБНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ : Методические для курсового и дипломного проектирования - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 86 с.
5. **Электроприводы** с системами числового программного управления: учебное пособие / сост. В.М. Иванов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 152 с.
6. **Кирилин Ю.В., Шестернинов А.В.** Расчет и проектирование шпиндельных узлов металлорежущих станков с опорами качения: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 1998, - 72 с
7. **Шестернинов А.В., Кириллин Ю.В.** Проектирование механизмов ручного управления коробками скоростей и подач металлорежущих станков: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 88 с.
8. **Электроприводы** с системами числового программного управления : методические указания к лабораторным работам / сост. В. М. Иванов.Ульяновск: УлГТУ, 2007. - 33 с.
9. **Автоматизированный** электропривод типовых производственных механизмов: Методические указания и задания к курсовой работе для студентов специальности 14060465 всех форм обучения/ сост. А.В. Коробко.- Ульяновск: УлГТУ, 2008.- 87 с.
10. **Машиностроительный гидропривод**./ Л. А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев и др. Под ред. В. Н. Прокофьева. М., Машиностроение, 1978 — 495 с.
11. **Подшипники качения:** Справочник-каталог /Под ред. В.Н. Нарышкина и Р.В. Коросташевского. – М.:Машиностроение, 1984. – 280 с.
12. **Свешников В.К.**Станочные гидроприводы: Справочник. – М.Машиностроение, 1995. – 448 с.
13. **Металлорежущие станки:** Учебник для машиностроительных втузов/Под ред. В.Э. Пуша. – М.:Машиностроение, 1985. – 256 с.
14. **Черпаков Б.И.** Металлорежущие станки: Учебник для нач. проф. образования / Б.И. Черпаков, Т.А. Альперович. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 368 с.
15. **Орлов П.И.** Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн.Кн. 1/ Под ред. П.Н. Учаева. – Изд. 3-е, испр. – М.:Машиностроение, 1988. – 560 с.
16. **Орлов П.И.** Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн.Кн. 2/ Под ред. П.Н. Учаева. – Изд. 3-е, испр. – М.:Машиностроение, 1988. – 544 с.
17. **Кочергин А.И.** Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1991. – 382 с.
18. **Москаленко В.В.** Электрический привод: Учеб. пособие для сред. проф. образование – М.: ИЦ «Академия», 2004. – 368 с.
19. **Головенков С.Н., Сироткин С.В.** Основы автоматики и автоматического регулирования станков с программным управлением: Уч.. – М.:Машиностроение, 1988. – 288 с.
20. **Тарзиманов Г.А.** Проектирование металлорежущих станков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.Машиностроение, 1980. – 288 с.

Стекольников Максим Владимирович

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Методические указания к курсовой работе

Ответственный за выпуск Стекольников М.В.
Оригинал-макет Стекольников М.В.

Подписано в печать _____
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать RISO.
Объем _____ Тираж _____ Заказ № _____

413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.