

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Кафедра машиноведения

## **Методические указания**

*к лабораторной работе*

**«Анализ типовых приводов главного движения с бесступенчатым регулированием и разработка привода станка с ЧПУ»**  
*по дисциплине «Конструирование и расчёт станков»*  
*для студентов специальностей: 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства»,*  
*1-36 01 01 «Технология машиностроения»*

**Брест 2016**

УДК 621.7/9 - 8 (04)  
М 54

В методических указаниях содержится руководство по выполнению лабораторной работы «Анализ типовых приводов главного движения с бесступенчатым регулированием и разработка привода станка с ЧПУ» по дисциплине «Конструирование и расчёт станков». Изложен теоретический материал по методике расчета привода. Определён порядок выполнения лабораторной работы, приведены варианты заданий, контрольные вопросы. В приложении даны необходимые справочные таблицы и примеры решений. Для студентов специальностей 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 01 «Технология машиностроения».

Составители: **В. П. Горбунов**, к.т.н., доцент  
**В. Ф. Григорьев**, к.т.н., доцент  
**Ю. А. Дакало**, ст. преподаватель

## Лабораторная работа

### Анализ типовых приводов главного движения с бесступенчатым регулированием и разработка привода станка с ЧПУ

#### Цель работы:

1. Изучить структуры типовых приводов главного движения с бесступенчатым регулированием.
2. Получить практические навыки кинематического расчёта привода главного движения с бесступенчатым регулированием.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1 Типовые структуры приводов с двигателем постоянного тока

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.

Частота вращения такого двигателя регулируется в двух областях. От минимальной частоты его вращения до номинальной  $n_{дн}$  регулирование осуществляется изменением напряжения в цепи якоря, при этом на валу двигателя поддерживается постоянный крутящий момент. Выше  $n_{дн}$  регулирование частоты вращения производится изменением тока возбуждения, и мощность двигателя остается постоянной. Диапазон регулирования  $R_p$  бесступенчатых приводов при постоянной мощности составляет 2,5–4. Если этого достаточно для станка, регулируемый электродвигатель постоянного тока с максимальной частотой вращения  $n_{дmax} = 4000 \dots 6000 \text{ мин.}^{-1}$  соединяют непосредственно со шпинделем станка. В том случае, когда требуется более широкий диапазон регулирования частоты вращения шпинделя (в станках с ЧПУ он достигает 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  $i_p = 0,5 \dots 2$ .

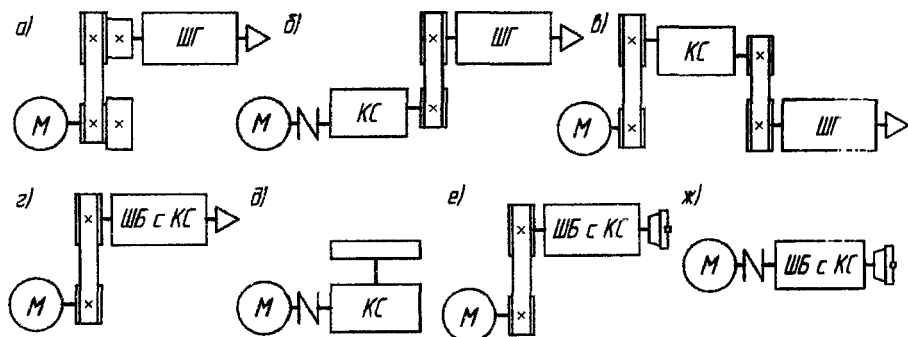
Из экономических соображений части  $R_p = 8 \dots 20$  общего широкого диапазона  $R$  регулирования частоты вращения шпинделя станков с ЧПУ должна соответствовать обработка с постоянной мощностью.

При применении коробки скоростей диапазон  $R_p$  получают сочетанием двух, трех или четырех диапазонов  $R_p'$  (поддиапазонов).

Типовые структуры главного привода токарных станков с ЧПУ приведены на рисунке 1. Привод по схеме *a* включает регулируемый электродвигатель постоянного тока  $M$ , двухступенчатую переключаемую ременную передачу и шпиндельную головку ШГ. В приводы по схемам *b* и *в* входит коробка скоростей КС с автоматическим переключением частоты вращения. Если диапазон регулирования шпинделя с постоянной мощностью  $R_p = 8 \dots 16$ , а диапазон регулирования двигателя  $R_d = 2 \dots 2,5$ , применяют трехступенчатые коробки, при

$R_D = 3 \dots 4$  – двухступенчатые. В тех случаях, когда  $R_P = 16 \dots 40$  и  $R_D = 3 \dots 4$ , в привод встраивают трехступенчатую коробку. Схема *з* включает шпиндельную бабку ШБ со встроенной коробкой скоростей. Когда  $R_P = 8 \dots 16$ ,  $R_D = 2 \dots 3,5$ , механическую часть привода рекомендуется делать трехступенчатой; при  $R_D = 3 \dots 4$  – двухступенчатой. При  $R_D = 16 \dots 40$  механическая часть должна быть соответственно четырех- и двухступенчатой. Приводы по схемам *а* – *з* с ременной передачей, способной передавать относительно небольшой крутящий момент, целесообразно применять в токарных станках небольших и средних размеров (наибольший диаметр обрабатываемого изделия 200–400 мм). Приводы по схеме *д* с двигателем постоянного тока, автоматическим переключаемым редуктором и постоянными передачами на планшайбу рекомендуются для карусельных станков (наибольший диаметр обрабатываемого изделия 1000...4000 мм).

Типовые структуры главного привода станков сверлильно-расточной и фрезерной групп, а также сверлильно-фрезерно-расточных обрабатывающих центров приведены на рисунке 1 *е, ж*.



**Рисунок 1 – Типовые структуры главного привода станков с ЧПУ:**  
**ШБ** – шпиндельная бабка; **КС** – коробка скоростей; **ШГ** – шпиндельная головка

## 2 Особенности приводов главного движения с бесступенчатым регулированием

Исходными данными для кинематического расчета привода являются: выбранная структура привода, предельные частоты вращения шпинделя  $n_{min}$  и  $n_{max}$ , предельные и номинальные частоты вращения электродвигателя  $n_{Дmin}$ ,  $n_{Дmax}$ ,  $n_{Дн}$ , знаменатель ряда передаточных отношений передач коробки скоростей  $\varphi_{мех}$ , передаточное отношение постоянной ременной передачи  $i_P$  (или двух ременных передач – в зависимости от структуры привода). Необходимо определить число ступеней коробки скоростей, передаточные отношения ее передач и числа зубьев колес.

Если в приводе применен электродвигатель постоянного тока с двухзонным регулированием, диапазон его регулирования при постоянном моменте равен  $R_{Дт}$ , при постоянной мощности –  $R_{Др}$ , диапазон регулирования механической коробки скоростей –  $R_T$ , то общий диапазон регулирования двигателя (электрического регулирования привода):

$$R_{\text{д}} = R_{\text{дг}} \cdot R_{\text{др}}. \quad (1)$$

Диапазон регулирования привода:

$$R = R_{\text{д}} \cdot R_{\text{мех}} \quad (2)$$

или

$$R = R_{\text{дг}} \cdot R_{\text{др}} \cdot R_{\text{мех}}. \quad (3)$$

Отсюда

$$R_{\text{мех}} = R / R_{\text{д}}. \quad (4)$$

Соответственно способу регулирования электродвигателя производится регулирование частоты вращения шпинделя при постоянном моменте или при постоянной мощности.

Диапазон регулирования шпинделя при постоянной мощности:

$$R_{\text{р}} = R_{\text{др}} \cdot R_{\text{мех}}. \quad (5)$$

Диапазоны регулирования можно определить по исходным данным:

$$R = \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}}; \quad (6)$$

$$R_{\text{д}} = \frac{n_{\text{д max}}}{n_{\text{д min}}}; \quad (7)$$

$$R_{\text{др}} = \frac{n_{\text{др max}}}{n_{\text{др}}}. \quad (8)$$

Так как диапазон регулирования z-ступенчатой коробки скоростей определяется по зависимости

$$R_{\text{мех}} = \varphi_{\text{мех}}^{z-1} \quad (9)$$

и для обеспечения бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя во всем диапазоне (без «провалов») принимают  $\varphi_{\text{мех}} = R_{\text{др}}$ , из зависимостей (5) и (9) следует:

$$R_{\text{р}} = R_{\text{др}} \cdot R_{\text{мех}} = \varphi_{\text{мех}} \cdot \varphi_{\text{мех}}^{z-1} = \varphi_{\text{мех}}^z. \quad (10)$$

Отсюда требуемое число ступеней коробки скоростей:

$$Z = \frac{\lg R_{\text{р}}}{\lg \varphi_{\text{мех}}}. \quad (11)$$

Число ступеней коробки скоростей, а следовательно, и число поддиапазонов регулирования привода оптимизируют. Если  $Z_{\text{min}} \leq 2$ , необходимо использовать двухступенчатую коробку передач. При  $Z_{\text{min}} > 2$ , допуская «провал» регулирования с постоянной мощностью между двумя поддиапазонами, также можно использовать двухступенчатую коробку. В «провале» производится регулирование с постоянным крутящим моментом. При этом упрощается механическая часть станка, но снижается его производительность. Требуемый диапазон регулирования частоты вращения шпинделя можно получить и введением в двухступенчатую коробку гитары сменных колес.

В станках с числовым программным управлением часто применяют приводы с двигателем постоянного тока и ступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя. При этом используют ряд частот с малым знаменателем  $\varphi$ , обычно равным 1,12 (реже 1,06). Благодаря этому управление приводом упрощается, а экономические потери вследствие отклонения от оптимальной скорости резания незначительны. В этом случае  $\varphi = \sqrt[k]{\varphi_{\text{max}}}$ , где  $k$  – число делений интервала  $\lg \varphi_{\text{max}}$ .

### 3 Кинематический расчёт приводов главного движения с электромеханическим бесступенчатым регулированием

#### 3.1 Определение диапазонов регулирования привода и требуемого числа ступеней $Z$ коробки скоростей

Диапазон регулирования привода определяется по формуле (6), а диапазон регулирования двигателя при постоянной мощности – по формуле (8).

Для обеспечения бесступенчатого регулирования при постоянной мощности необходимо, чтобы  $\varphi_{\text{max}} = R_{\text{ДР}}$ .

Для получения геометрического ряда частот вращения, включаемых от программы системой ЧПУ, и с целью получения более мелкой сетки для оптимизации передаточных отношений соотношение между  $\varphi_{\text{max}}$  и стандартным знаменателем геометрического ряда  $\varphi$  (обычно  $\varphi = 1,12$ ) должно быть:

$$\varphi_{\text{max}} = \varphi^k, \quad (12)$$

где  $k$  – целое число.

Выразив из формулы (12)  $k$ , получим:

$$k = \frac{\lg \varphi_{\text{max}}}{\lg \varphi}. \quad (13)$$

Приводы с коробкой скоростей, выполненные в виде одной групповой передачи, имеют ограничение диапазона регулирования:

$$R_{\text{max}} = \varphi^{2-1} \leq 8. \quad (14)$$

Число ступеней  $Z$  коробки скоростей ограничивается условием:

$$Z \leq 1 + \frac{\lg 8}{\lg \varphi_{\text{max}}} \quad (15)$$

Диапазон механического регулирования  $R_{\text{мех}}$  и диапазон регулирования привода при постоянной мощности  $R_p$  определяются по формулам (14) и (10) соответственно.

Требуемый диапазон полного электрического регулирования  $R_{\text{Д}}$  из формулы (4):

$$R_{\text{Д}} = \frac{R}{R_{\text{мех}}}. \quad (16)$$

Требуемую минимальную частоту вращения электродвигателя  $n_{\text{Дmin}}$  можно определить из формулы (7):

$$n_{Д\min} = \frac{n_{Д\max}}{R_{Д}}. \quad (17)$$

Диапазон регулирования привода при постоянном моменте можно определить по формуле:

$$R_{\tau} = \frac{R}{R_p}. \quad (18)$$

### 3.2 Построение графика частот вращения и определение передаточных отношений

График частот вращения строится на основе разработанной кинематической схемы. При разработке кинематической схемы привода исходят из его конструктивной компоновки, учитывают частоту вращения электродвигателя и вводят одиночные передачи, необходимые для получения частот вращения шпинделя. График отражает частоты вращения всех валов привода, включая валы одиночных передач.

Для построения графика частот вращения шпинделя необходимо определить ряд характерных частот вращения.

Минимальные частоты вращения шпинделя каждого диапазона регулирования определяются по формулам:

$$\begin{aligned} n_{1\min} &= n_{\min}; \\ n_{2\min} &= n_{\min} \times \varphi_{\text{мех}}; \\ &\dots\dots\dots \\ n_{Z\min} &= n_{\min} \times \varphi_{\text{мех}}^{Z-1}. \end{aligned} \quad (19)$$

Минимальную частоту вращения при постоянной мощности и максимальные частоты вращения шпинделя для каждого диапазона определяются по формулам:

$$\begin{aligned} n_{Z\max} &= n_{\max}; \\ n_{Z-1\max} &= \frac{n_{Z\max}}{\varphi_{\text{мех}}}; \\ n_{Z-2\max} &= \frac{n_{Z\max}}{\varphi_{\text{мех}}^2}; \\ &\dots\dots\dots \\ n_{1\max} &= \frac{n_{Z\max}}{\varphi_{\text{мех}}^{Z-1}}; \\ n_{\text{рmin}} &= \frac{n_{1\max}}{R_{Др}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Полученные значения частот вращения округляются до стандартных значений (приложение, таблица 1П).

Число интервалов  $lg\varphi$ , изображающих максимальные частоты вращения шпинделя  $u_{\max}$  и электродвигателя  $u_{Д\max}$ , определяются во формулам:

$$y_{\max} = \frac{\lg \left( \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \right)}{\lg \varphi}; \quad (21)$$

$$y_{\Delta_{\max}} = \frac{\lg \left( \frac{n_{\Delta_{\max}}}{n_{\min}} \right)}{\lg \varphi}. \quad (22)$$

На графике частот вращения валы привода изображаются в виде горизонтальных линий и наносится сетка с интервалом  $\lg \varphi$ . Число интервалов принимается по ближайшему большему значению из  $y_{\max}$  и  $y_{\Delta_{\max}}$ . Выделяются интервалы  $\lg \varphi_{\text{мех}}$ . Каждый интервал  $\lg \varphi_{\text{мех}}$  равен  $k$  интервалов  $\lg \varphi$ , так как  $\lg \varphi_{\text{мех}} = k \cdot \lg \varphi$ .

На первом валу (вал электродвигателя) наносят значения частот  $n_{\Delta_{\min}}$ ,  $n_{\Delta_{\text{н}}}$  и  $n_{\Delta_{\max}}$ . На последнем валу (шпиндель) наносят частоты  $n_{1\min}$ ,  $n_{2\min}$ , ...,  $n_{z\min}$ ,  $n_{r\min}$ ,  $n_{1\max}$ ,  $n_{2\max}$ , ...,  $n_{z\max}$ . Для этого необходимо определить расчётное число  $y_i$  интервалов  $\lg \varphi$  для каждой частоты по формуле:

$$y_i = \frac{\lg \left( \frac{n_i}{n_{\min}} \right)}{\lg \varphi}, \quad (23)$$

где  $n_i$  — значение частоты, наносимой на график, мин.<sup>-1</sup>;  
 $n_{\min}$  — минимальная частота вращения шпинделя, мин.<sup>-1</sup>.

На графике частот вращения проводят лучи, изображающие соответствующие передачи, угол наклона которых лимитируется допустимыми значениями передаточных отношений. Для обеспечения приемлемых радиальных размеров коробок скоростей вводят ограничения на передаточные отношения передач:

$$i_{\min} = \varphi^{-m_3} \frac{1}{4}; \quad i_{\max} = \varphi^m \cdot 2. \quad (24)$$

Исходя из этого делаем заключение, что существуют допустимые значения показателей  $m$  (приложение, таблица ЗП) для стандартных значений  $\varphi$ , т. е. лучи, изображающие передачи, могут перекрывать число интервалов не больше допустимых значений соответственно для повышающих и понижающих передач.

Прежде всего производится построение для диапазона регулирования с постоянной мощностью. Лучи проводят из точек  $n_{\Delta_{\text{н}}}$  и  $n_{\Delta_{\max}}$  с выходом на точки  $n_{r\min}$ ,  $n_{1\max}$ ,  $n_{2\max}$ , ...,  $n_{z\max}$  (рисунок 3). Затем из точки  $n_{\Delta_{\min}}$  проводят лучи параллельно полученным ранее с выходом в точки  $n_{1\min}$ ,  $n_{2\min}$ , ...,  $n_{z\min}$ .

Из графика частот вращения передаточные отношения передач находят по формуле:

$$i = \varphi^{\pm m}, \quad (25)$$

где  $m$  — число интервалов по оси  $n$ , перекрываемое лучом (знак «+» соответствует повышающей передаче, знак «-» — понижающей);

$\varphi$  — знаменатель геометрического ряда частот вращения, включаемых от программы системой ЧПУ;



### 3.3 Определение чисел зубьев зубчатых колёс

Числа зубьев колес определяются с помощью таблицы 4П приложения исходя из принятой суммы чисел зубьев  $\sum z$  ведущего и ведомого колес каждой группы передач и в зависимости от передаточного отношения каждой передачи  $i$  (при  $i < 1$  необходимо использовать  $i' = 1/i$ ). В таблице приведены числа зубьев меньшего колеса передачи. Рекомендуется принимать минимальное число зубьев  $z_{min} = 18 \dots 20$ , а суммарное число зубьев –  $\sum z \leq 100 \dots 120$ . При использовании тройного блока для свободного его переключения необходимо, чтобы числа зубьев его колес отличались как минимум на 4 зуба.

### 3.4 Определение крутящих моментов на валах привода

Для расчёта крутящих моментов определяют расчетную частоту вращения шпинделя и строят расчетную цепь. За расчетную цепь коробки скоростей принимают цепь от номинальной частоты вращения двигателя  $n_{дн}$  до расчетной частоты вращения шпинделя (соответствует  $n_{рmin}$ ).

Крутящий момент на валу электродвигателя определяется по номинальной мощности  $P$ , кВт и номинальной частоте вращения  $n_{дн}$  по формуле:

$$T_э = 9,55 \cdot 10^3 \cdot P / n_{дн}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (26)$$

где  $P$  – мощность электродвигателя, кВт.

Крутящий момент на любом валу может быть выражен по формуле:

$$T_k = T_j \cdot \eta_i / i, \quad (27)$$

где  $T_j$  – крутящий момент на предыдущем валу;

$i$  – передаточное отношение между валами  $k$  и  $j$ ;

$\eta_i$  – КПД цепи между этими валами; КПД ременной передачи 0,97...0,99; цилиндрической прямозубой передачи 0,99...0,995, косозубой – 0,98...0,99.

Крутящий момент на шпинделе, соответствующий  $n_p$ , принимается в качестве наибольшего расчетного и равен:

$$T_p = 9,55 \cdot 10^3 \cdot P \cdot \eta_v / n_p, \quad (28)$$

где  $\eta_v$  – общий КПД привода;

$$\eta_c = \prod_{i=1}^v \eta_i, \quad (29)$$

где  $\eta_i$  – КПД  $i$ -го звена цепи;

$v$  – количество звеньев цепи.

Мощность привода  $P_{min}$ , кВт при минимальной частоте вращения шпинделя  $n_{pmin}$  определяется исходя из расчётного крутящего момента на шпинделе  $T_p$  по формуле:

$$P_{min} = T_p \cdot n_{pmin} / (9,55 \cdot 10^3), \text{ кВт}. \quad (30)$$

#### 4 Пример кинематического расчёта привода

Произведём кинематический расчёт привода главного движения с двигателем постоянного тока, при этом регулирование частоты вращения во всём диапазоне должно быть бесступенчатым.

Исходные данные: компоновка привода – схема А (рисунок 1П); коробка скоростей выполнена в виде одной групповой передачи; передаточное отношение ременной передачи  $i_p=0,5\dots2$ ; электродвигатель серии 4ПФ с номинальной частотой вращения  $n_{ДП}=1000$  мин.<sup>-1</sup> и максимальной частотой вращения  $n_{Дmax}=4500$  мин.<sup>-1</sup>, мощность электродвигателя  $P=11$  кВт; предельные частоты вращения шпинделя  $n_{min}=40$  мин.<sup>-1</sup>,  $n_{max}=4000$  мин.<sup>-1</sup>.

1. По формуле (6) определяем диапазон регулирования привода:

$$R = \frac{4000}{40} = 100.$$

2. По формуле (7) определяем диапазон регулирования двигателя при постоянной мощности:

$$R_{ДР} = \frac{4500}{1000} = 4,5.$$

3. Определяем знаменатель ряда  $\varphi_{мех}$  частот вращения коробки скоростей. Принимаем предварительно  $\varphi_{мех}=R_{ДР}=4,5$ .

Число делений  $k$  интервала  $lg\varphi_{мех}$  по формуле (13):

$$k = \frac{lg4,5}{lg1,12} = 13,5$$

Принимаем целое значение  $k=14$  и корректируем  $\varphi_{мех}$  по формуле (12):

$$\varphi_{мех} = 1,12^{14} = 4,9$$

Так как  $\varphi_{мех} > R_{ДР}$ , то в части диапазона  $R_p$  регулирования частоты вращения шпинделя при постоянной мощности будет происходить падение мощности и регулирование частоты вращения при постоянном моменте.

4. Определяем число ступеней  $Z$  коробки скоростей по формуле (15):

$$Z \approx 1 + \frac{lg8}{lg4,9} = 2,3.$$

Принимаем  $Z = 2$ .

5. Определяем диапазон механического регулирования  $R_{мех}$  и диапазон регулирования привода при постоянной мощности  $R_p$  по формулам (14) и (10) соответственно:

$$R_{мех} = 4,9^{2-1} = 4,9;$$
$$R_p = 4,5 \times 4,9 = 22,05.$$

6. Требуемый диапазон полного электрического регулирования  $R_D$  по формуле (16):

$$R_D = \frac{100}{4,9} = 20,4.$$

7. Требуемую минимальную частоту вращения электродвигателя  $n_{Dmin}$  определим по формуле (17):

$$n_{Dmin} = \frac{4500}{20,4} = 220 \text{ мин.}^{-1}$$

Принимаем стандартную частоту  $n_{Dmin} = 224 \text{ мин.}^{-1}$  (приложение, таблица 1П).

8. Диапазон регулирования при постоянном моменте определим по формуле (18):

$$R_T = \frac{100}{22,05} = 4,54.$$

9. Учитывая компоновку привода, разрабатываем кинематическую схему (рисунок 2).

10. Определяем минимальные частоты вращения шпинделя каждого диапазона регулирования по формулам (19):

$$n_{1min} = 40 \text{ мин.}^{-1};$$

$$n_{2min} = 40 \times 4,9 = 196 \text{ мин.}^{-1},$$

принимаем стандартное значение  $n_{2min} = 200 \text{ мин.}^{-1}$  (таблица 1П).

11. Определяем минимальную частоту вращения при постоянной мощности и максимальные частоты вращения шпинделя для каждого диапазона по формулам (20):

$$n_{2max} = 4000 \text{ мин.}^{-1};$$

$$n_{1max} = \frac{4000}{4,9} = 816,3 \text{ мин.}^{-1},$$

принимаем стандартное значение  $n_{1max} = 800 \text{ мин.}^{-1}$  (таблица 1П).

$$n_{pmin} = \frac{800}{4,5} = 177,8 \text{ мин.}^{-1},$$

принимаем стандартное значение  $n_{pmin} = 180 \text{ мин.}^{-1}$  (таблица 1П).

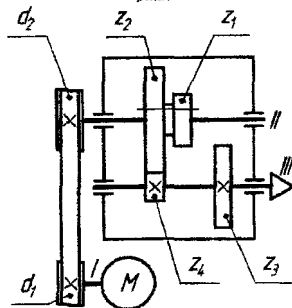


Рисунок 2 – Кинематическая схема привода главного движения

12. Число интервалов  $I_{g\varphi}$ , изображающих максимальные частоты вращения шпинделя  $y_{max}$  и электродвигателя  $y_{Дmax}$ , определяются по формулам (21) и (22) соответственно:

$$y_{max} = \frac{\lg\left(\frac{4000}{40}\right)}{\lg 1,12} = 40,6;$$

$$y_{Дmax} = \frac{\lg\left(\frac{4500}{40}\right)}{\lg 1,12} = 41,7.$$

13. Строим график частот вращения (рисунок 3).

Определим расчётное число  $y$ , интервалов  $I_{g\varphi}$  для частот  $n_{Дmin}$ ,  $n_{ДH}$ ,  $n_{2min}$ ,  $n_{pmin}$ ,  $n_{1max}$  по формуле (23):

$$y_{Дmin} = \frac{\lg\left(\frac{n_{Дmin}}{n_{min}}\right)}{\lg\varphi} = \frac{\lg\left(\frac{224}{40}\right)}{\lg 1,12} \gg 15;$$

$$y_{ДH} = \frac{\lg\left(\frac{n_{ДH}}{n_{min}}\right)}{\lg\varphi} = \frac{\lg\left(\frac{1000}{40}\right)}{\lg 1,12} \gg 28;$$

$$y_{2min} = \frac{\lg\left(\frac{n_{2min}}{n_{min}}\right)}{\lg\varphi} = \frac{\lg\left(\frac{200}{40}\right)}{\lg 1,12} \gg 14;$$

$$y_{pmin} = \frac{\lg\left(\frac{n_{pmin}}{n_{min}}\right)}{\lg\varphi} = \frac{\lg\left(\frac{180}{40}\right)}{\lg 1,12} \gg 13;$$

$$y_{1max} = \frac{\lg\left(\frac{n_{1max}}{n_{min}}\right)}{\lg\varphi} = \frac{\lg\left(\frac{800}{40}\right)}{\lg 1,12} \gg 26.$$

Для  $\varphi=1,12$  число интервалов, пересекаемых лучом, должно быть не более: для повышающих – 6, для понижающих – 12 (приложение, таблица 3П).

Прежде всего производится построение для диапазона регулирования с постоянной мощностью. Лучи проводят из точек  $n_{ДH}$  и  $n_{Дmax}$  с выходом на точки  $n_{pmin}$ ,  $n_{1max}$ ,  $n_{2max}$ , ...,  $n_{zmax}$  (рисунок 3). Затем из точки  $n_{Дmin}$  проводят лучи параллельно полученным ранее с выходом в точки  $n_{1min}$ ,  $n_{2min}$ , ...,  $n_{zmin}$ .

14. По графику частот вращения (рисунок 3) определяем передаточные отношения из выражения (25):

$$i_1 = \varphi^{-4} = 1,12^{-4} = 0,63;$$

$$i_2 = \varphi^{-11} = 1,12^{-11} = 0,287;$$

$$i_3 = \varphi^3 = 1,12^3 = 1,41.$$

15. Определим диаметры шкивов, числа зубьев колес и фактические передаточные отношения.

Принимаем конструктивно диаметр ведущего шкива ременной передачи  $d_1=140$  мм (приложение, таблица 1П, ряд  $\phi=1,12$ ). Тогда диаметр ведомого шкива:

$$d_2=d_1/i_1=140/0,63=222 \text{ мм.}$$

Принимаем стандартное значение  $d_2=224$  мм (приложение, таблица 1П, ряд  $\phi=1,12$ ). Тогда фактическое передаточное отношение ременной передачи:

$$i_{1\phi}=140/224=0,625.$$

Для передаточных отношений  $i < 1$  определяем значение  $i'=1/i$ , так как в таблице приведены числа зубьев для  $i > 1$ :

$$i_2'=1/i_2=3,484.$$

Выбираем суммарное число зубьев (приложение, таблица 4П)  $ZZ=90$ , так как для данного числа зубьев в таблице можно обеспечить все требуемые передаточные отношения группы: 1,41; 3,484.

Принимаем:

$$z_1=20; z_3=70;$$

$$z_2=53; z_4=37.$$

Тогда фактические передаточные отношения зубчатых передач:

$$i_{2\phi}=z_1 / z_3=20/70=0,286,$$

$$i_{3\phi}=z_2 / z_4=53/37=1,432.$$

16. На графике частот вращения указываем диапазоны регулирования привода и двигателя с постоянной мощностью и моментом (рисунок 3).

17. Рассчитаем крутящие моменты на валах привода.

Крутящий момент на валу электродвигателя рассчитаем по формуле (26):

$$T_3=T_1=9,55 \times 10^3 \times \frac{11}{1000}=105,1 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Крутящий момент на валу II определим по формуле (27):

$$T_{II}=T_I \cdot \eta_{р.п.} / i_1=105,1 \cdot 0,97 / 0,625=163,1 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

В качестве расчетной частоты, по которой будем рассчитывать крутящие моменты, принимаем по графику частот  $n_p=n_{pmin}=180 \text{ мин.}^{-1}$  (смотри п. 11).

КПД привода определим по формуле (29) как произведение КПД всех звеньев цепи:

$$\eta_v=\eta_{р.п.} \cdot \eta_{а.п.}=0,97 \cdot 0,99=0,96.$$

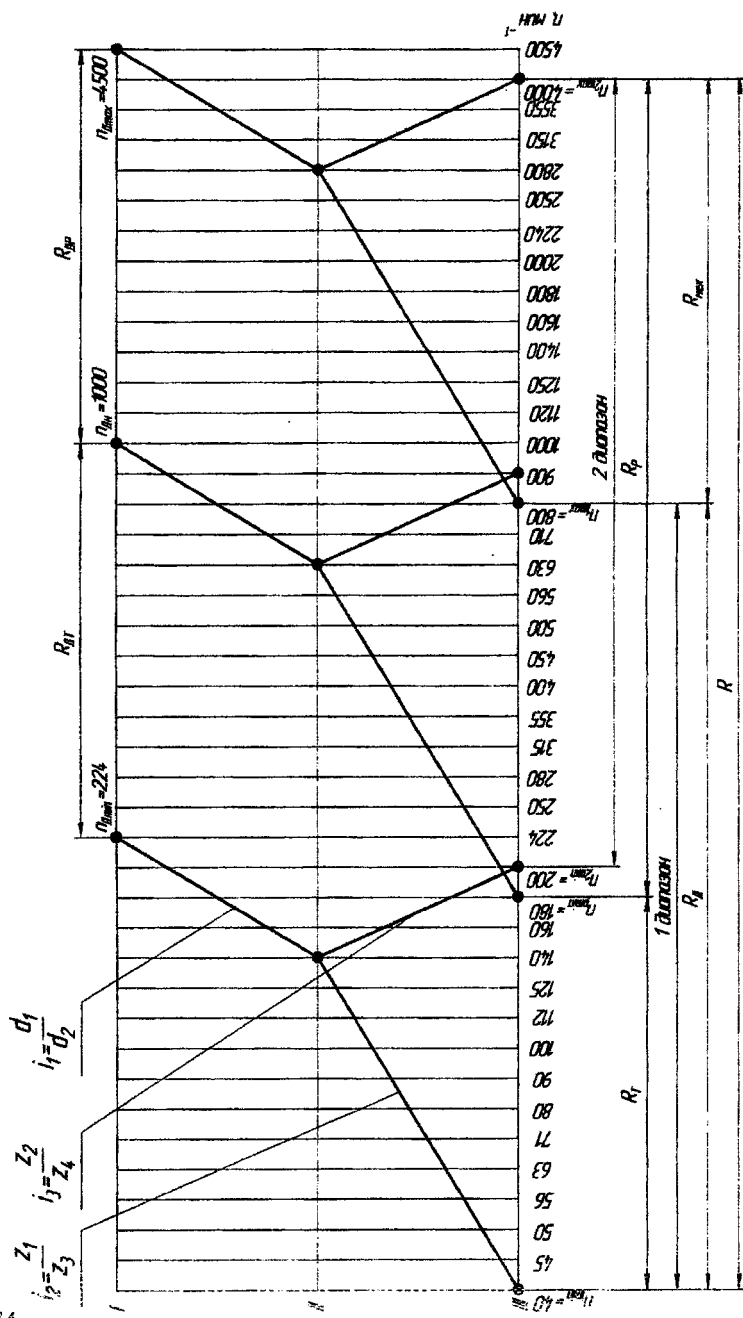


Рисунок 3 — График частот вращения цилиндра:  $R_{ДТ}$  — диапазон регулирования электродвигателя с постоянным моментом  $T$ ;  $R_{ДР}$  — диапазон регулирования электродвигателя с постоянной мощностью  $P$ ;  $R_T$  — диапазон регулирования привода с постоянным моментом  $T$ ;  $R_P$  — диапазон регулирования привода с постоянной мощностью  $P$

Рассчитаем крутящий момент на шпинделе по формуле (28):

$$T_{III} = T_p = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 11 \cdot 0,96 / 180 = 560,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

18. Строим диаграмму мощности привода (рисунок 4).

Определим мощность привода  $P_{\min}$  при минимальной частоте вращения шпинделя  $n_{\min}$  по формуле (30):

$$P_{\min} = 560,3 \cdot 40 / (9,55 \cdot 10^3) = 2,3 \text{ кВт}.$$

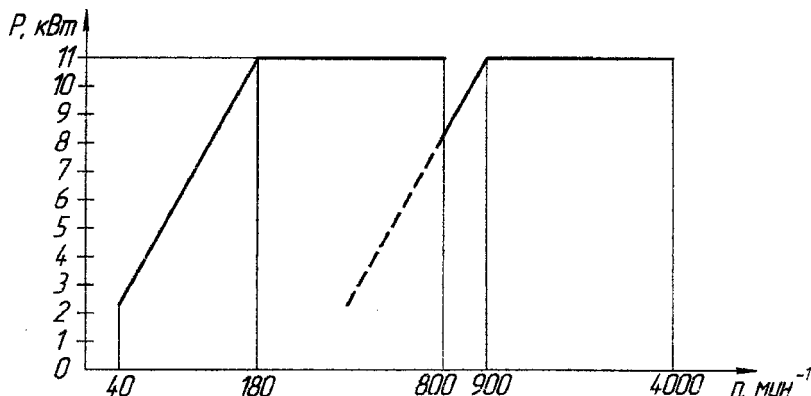


Рисунок 4 – Диаграмма мощности привода главного движения с регулируемым двигателем

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить особенности главных приводов станков с бесступенчатым регулированием.
2. Изучить особенности кинематического расчёта главных приводов с бесступенчатым регулированием.
3. Записать исходные данные в соответствии с вариантом индивидуального задания (таблица).
4. Выполнить кинематический расчёт главного привода с бесступенчатым регулированием в соответствии с заданием в следующем порядке:
  - 4.1. Используя зависимость (6), определить диапазон регулирования привода R.
  - 4.2. По формуле (8) определить диапазон регулирования двигателя при постоянной мощности РДР.
  - 4.3. Определить по формуле (13) число интервалов  $k$ , округлить полученное значение до целого числа. По формуле (12) уточнить значение  $\phi_{\text{мех}}$ .
  - 4.4. Определить число ступеней  $Z$  коробки скоростей по формуле (15).
  - 4.5. Определить диапазон механического регулирования  $R_{\text{мех}}$  и диапазон регулирования привода при постоянной мощности  $R_p$  по формулам (14) и (10) соответственно.

- 4.6. Рассчитать требуемый диапазон полного электрического регулирования РД по формуле (16).
- 4.7. Определить требуемую минимальную частоту вращения электродвигателя  $n_{Дmin}$  по формуле (17), округлить полученное значение до стандартной величины (приложение, таблица 1П).
- 4.8. Рассчитать диапазон регулирования при постоянном моменте по формуле (18).
- 4.9. Учитывая компоновку привода, используя приведённые примеры (приложение, рисунки 2П, 3П), разработать кинематическую схему привода.
- 4.10. Определить минимальные частоты вращения шпинделя каждого диапазона регулирования по формулам (19), округлить полученные значения до стандартных (таблица 1П).
- 4.11. Определить минимальную частоту вращения при постоянной мощности и максимальные частоты вращения шпинделя для каждого диапазона по формулам (20), округлить полученные значения до стандартных (таблица 1П).
- 4.12. Рассчитать число интервалов  $I_{g\varphi}$ , изображающих максимальные частоты вращения шпинделя  $u_{max}$  и электродвигателя  $u_{Дmax}$ , по формулам (21) и (22) соответственно.
- 4.13. Определить расчётное число  $u_i$  интервалов  $I_{g\varphi}$  для частот  $n_{Дmin}$ ,  $n_{ДН}$ ,  $n_{2min}$ ,  $n_{рmin}$ ,  $n_{1max}$  по формуле (23). Построить график частот вращения шпинделя.
- 4.14. По графику частот вращения и зависимости (25) для каждой передачи определить передаточные отношения.
- 4.15. Определить диаметры шкивов и числа зубьев колес, используя таблицу 4П приложения. Определить фактические передаточные отношения  $i_{i\varphi}$  каждой передачи.
- 4.16. На графике частот вращения указать диапазоны регулирования привода и двигателя с постоянной мощностью и моментом.
- 4.17. Определить расчётную частоту вращения шпинделя, построить расчётную цепь и рассчитать крутящие моменты на валах по формулам (26)–(28).
- 4.18. По формуле (30) определить минимальную мощность привода и построить диаграмму мощности.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Тема и цель выполняемой работы.
2. Исходные данные в соответствии с вариантом индивидуального задания.
3. Кинематический расчёт привода.
4. Вывод.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Особенности главных приводов с бесступенчатым электромеханическим регулированием частот вращения.
2. Режимы работы шпинделя при электромеханическом регулировании.
3. Понятие расчётной частоты вращения.



4. Диапазоны регулирования частот вращения шпинделя при электро-механическом регулировании.
5. Варианты непрерывного бесступенчатого регулирования с перекрытием или выпадением частот при постоянной мощности.
6. Кинематический расчет приводов главного движения с бесступенчатым электро-механическим регулированием.
7. Графики частот вращения главного привода с бесступенчатым электро-механическим регулированием и возможности оптимизации.
8. Методика расчета передаточных отношений передач главного привода по графику частот.
9. Порядок расчета и подбора чисел зубьев зубчатых передач.

Таблица – Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Частота вращения шпинделя, мин. <sup>-1</sup>		Электродвигатель <sup>1</sup>			Компоновка привода <sup>2</sup>
	$n_{min}$	$n_{max}$	Частоты вращения, мин. <sup>-1</sup>		Мощность $P$ , кВт	
			$n_{дл}$	$n_{дmax}$		
1	20	3150	1000	4000	22	А
2	22,4	2800		4000	18,5	Б
3	25	2500		4500	7,5	В
4	28	2500		5000	4	А
5	31,5	3550		4500	15	Б
6	12,5	1800		4000	22	В
7	14	2240		4500	11	А
8	16	2800		5000	5,5	Б
9	20	2500		5000	4	В
10	25	2000		4000	30	А
11	40	3150		4500	15	Б
12	45	3150		5000	7,5	В
13	35,5	4000		4000	22	А
14	50	4000		4000	18,5	Б
15	56	4000		4500	7,5	В
16	16	2500		5000	4	А
17	18	3150		4500	15	Б
18	20	1800		4000	22	В
19	22,4	2000		4500	11	А
20	25	3550		5000	5,5	Б
21	16	2500		5000	4	В
22	14	2000		4000	30	А
23	12,5	2000		4500	15	Б
24	63	4500		5000	7,5	В
25	50	3150		4000	22	А
26	10	1600		4000	18	Б
27	18	3550		4500	7,5	В
28	56	4500		5000	11	А
29	10	2000		4500	45	Б
30	71	4500		4000	22	В

Примечания: 1. Электродвигатели постоянного тока серии 4ПФ.  
2. Вариант схемы на рисунке III приложения.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочергин, А. И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: учеб. пособие для вузов – Минск: Выш. шк., 1991. – 382 с.: ил.
2. Металлорежущие станки: учебник для машиностроительных вузов / Под ред. В. Э. Пуша. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с., ил.
3. Глубокий, В. И. Конструирование и расчёт станков. Проектирование главных приводов: методическое пособие для практических занятий студентов машиностроительных специальностей / В. И. Глубокий, В. И. Туромша. – Минск: БНТУ, 2013. – 120 с.

Схема А

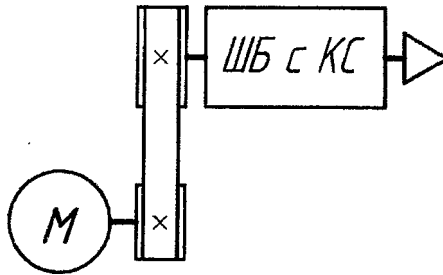


Схема Б

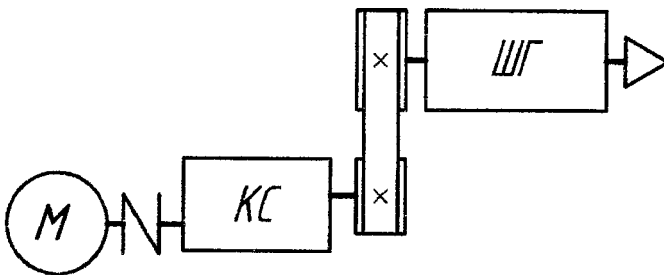


Схема В



Рисунок 1П – Компоновка привода:  
ШБ – шпиндельная бабка  
КС – коробка скоростей  
ШГ – шпиндельная головка

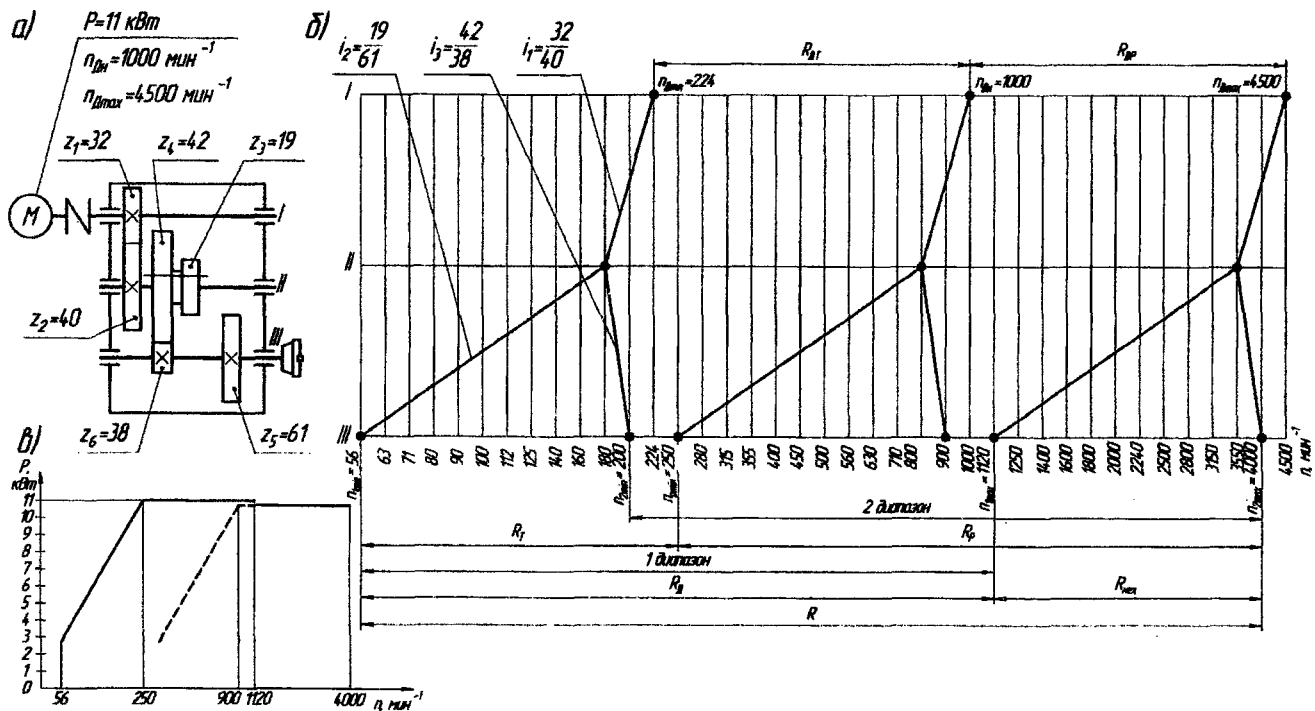


Рисунок 2П – Привод главного движения фрезерного станка с ЧПУ (схема В): а – кинематическая схема; б – график частот вращения; в – диаграмма мощности

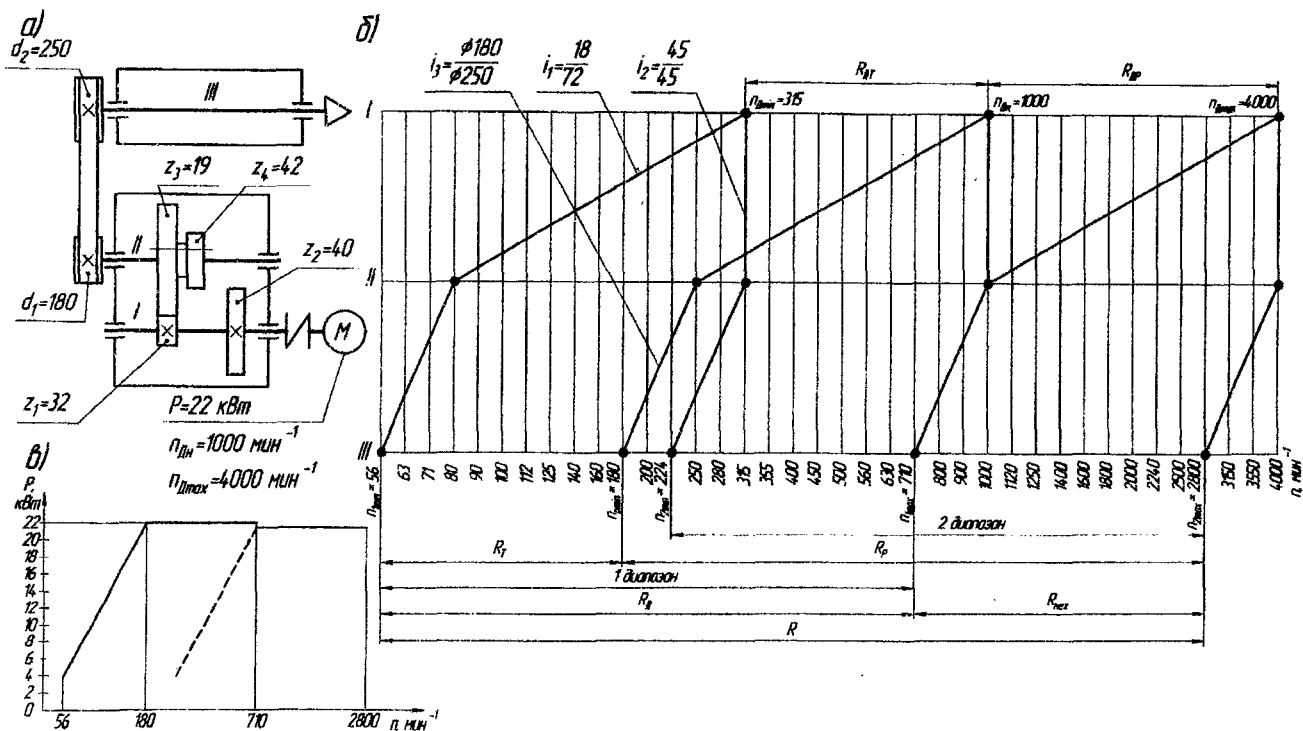


Рисунок 3П – Привод главного движения токарного станка с ЧПУ (схема Б): а – кинематическая схема; б – график частот вращения; в – диаграмма мощности

Таблица 1П – Нормальные ряды чисел

Значения знаменателя ряда $\phi$																	
1,12	1,26	1,41	1,58	1,78	2,0	1,12	1,26	1,41	1,58	1,78	2,0	1,12	1,26	1,41	1,58	1,78	2,0
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,0	10,0		10,0	10,0		100	100		100	100	
1,12						11,2		11,2				112					
1,25	1,25					12,5	12,5					125	125	125			125
1,40		1,40				14,0						140					
1,60	1,60		1,60			16,0	16,0	16,0	16,0		16,0	160	160		160		
1,80				1,80		18,0				18,0		180		180		180	
2,00	2,00	2,00			2,00	20,0	20,0					200	200				
2,24						22,4		22,4				224					
2,50	2,50		2,50			25,0	25,0		25,0			250	250	250	250		250
2,80		2,80				28,0						280					
3,15	3,15			3,15		31,5	31,5	31,5		31,5	31,5	315	315			315	
3,55						35,5						355		355			
4,00	4,00	4,00	4,00		4,00	40,0	40,0		40,0			400	400		400		
4,50						45,0		45,0				450					
5,00	5,00					50,0	50,0					500	500	500			500
5,60		5,60		5,60		56,0				56,0		560				560	
6,30	6,30		6,30			63,0	63,0	63,0	63,0		63,0	630	6,30		630		
7,10						71,0						710		710			
8,00	8,00	8,00			8,00	80,0	80,0					800	800				
9,00						90,0		90,0				900					

Примечание: Ряды чисел менее 1 и более 900 получаются соответственно делением или умножением табличных данных на 1000.

Таблица 2П – Максимально допустимые значения  $K_{max}$

Коробка передач	$K_{max}$ при $\phi$						
	1,06	1,12	1,26	1,41	1,58	1,78	2
Скоростей	36	18	9	6	4	3	3
Подач	45	23	11	7	5	4	3

Таблица 3П – Максимально допустимые значения  $t_{max}$

Коробка передач	Вид передачи	$t_{max}$ при $\phi$						
		1,06	1,12	1,26	1,41	1,58	1,78	2
Скоростей	Повышающие	12	6	3	2	1	1	1
	Понижающие	24	12	6	4	3	2	2
Подач	Повышающие	18	9	4	3	2	1	1
	Понижающие	27	14	7	4	3	3	2

Таблица 4П – Числа зубьев зубчатых колес передач

$\Gamma \Sigma$	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
1,00	25		26		27		28		29		30		31		32		33		34	
1,12		24		25		26		27		28			29		30		31		32	
1,26	22		23		24		25		26		27		28		29	29			30	
1,41		21		22		23		24		25			26		27			28	28	
1,58			20		21			22		23		23		24			25		26	
1,78	18			19			20		21			22			23			24		25
2,00					18			19			20			21			22			23
2,24									18			19	19			20			21	
$\Gamma \Sigma$	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
1,00	35		36		37		38		39		40		41		42		43		44	
1,12	33		34		35		36	36	37	37	38	38		39		40		41		42
1,26	31		32		33	33		34		35		36	36	37	37		38		39	
1,41	29		30	30		31		32		33	33		34		35	35		36		37
1,58	27		28	28		29		30	30		31		32	32		33	33		34	
1,78	25		26			27		28		29	29		30	30		31			32	
2,00			24			25		26		27			28		29	29		30		31
2,24		22	22		23	23		24	24		25			26	26		27	27		28
2,51	20	20		21	21			22	22		23	23			24	24		25	25	
2,82			19	19			20	20			21	21			22			23	23	
3,16						18				19	19			20	20			21	21	
$\Gamma \Sigma$	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
1,00	45		46		47		48	49	49	50	50	51	51	52	52	53	54	54	54	55
1,12		43	43	44	44	45	45	46	46	47	47		48		49		50		51	51
1,26	40	40	41	41		42		43		44	44		45	45		46		47	47	48
1,41	37	38	38		39		40	40		41		42	42	43	43		44	44	45	45
1,58	35	35		36		37	37		38	38	39	39		40	40	41	41	41	41	42
1,78		33	33		34	34		35	35		36	36	37	37		38	38		39	39
2,00	30		31	31		32	32		33	33		34	34		35	35		36	36	
2,24	28	28		29	29			30	30		31	31		32	32		33	33	33	34
2,51		26	26		27	27			28	28		29	29			30	30		31	31
2,82		24	24			25	25			26	26		27	27	27		28	28	28	
3,16		22	22			23	23			24	24	24		25	25	25		26	26	26
3,55	20	20	20			21	21			22	22	22			23	23	23		24	24
3,98	18	18			19	19	19			20	20	20			21	21	21	21		22

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

*Составители:*

**Виктор Петрович Горбунов  
Владимир Федорович Григорьев  
Юрий Александрович Дакало**

## **Методические указания**

*к лабораторной работе*

**«Анализ типовых приводов главного движения с бесступенчатым регулированием и разработка привода станка с ЧПУ»**  
*по дисциплине «Конструирование и расчёт станков»*  
*для студентов специальностей: 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства»,*  
*1-36 01 01 «Технология машиностроения»*

Ответственный за выпуск: *Дакало Ю.А.*  
Редактор: *Боровикова Е.А.*  
Компьютерная вёрстка: *Митлошук М.А.*  
Корректор: *Никитчик Е.В.*

---

Подписано в печать 3.10.2016 г. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Бумага писчая.  
Усл. п.л. 1,4. Уч. изд. л. 1,5. Заказ № 963. Тираж 50 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.