

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Направление подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника »  
Профиль подготовки: «Электрооборудование и электрохозяйство  
предприятий организаций и учреждений»;

Форма обучения: очная, заочная

Тула 2018

УДК

Дубальский В.Е. Электрический привод. Методические указания по выполнению курсового проекта. Тула: Изд-во Тул ГУ, 2018. 51с.

ISBN

В методических указаниях приведены задания и требования к выполнению курсового проекта, основы теории и примеры расчета отдельных этапов проектирования электроприводов механизмов продолжительного и повторно-кратковременного режимов работы.

Они предназначены для студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся по специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» с профилем подготовки «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий организаций и учреждений», изучающих дисциплину "Электрический привод".

Печатается по решению библиотечно-издательского совета  
Тульского государственного университета

## Содержание

1. Введение .....	4
2. Задачи и цели выполнения курсового проекта .....	4
3. Основные требования к содержанию и защите курсового проекта.....	4
3.1. Тематика курсового проекта .....	4
3.2. Исходные данные к курсовому проекту .....	5
3.3. Задание на курсовой проект .....	5
3.4. Содержание и объем курсового проекта.....	5
3.5. Этапы работы над курсовым проектом.....	6
3.6. Защита курсового проекта .....	6
4. Методические указания к работе над курсовым проектом.....	7
4.1. План построения и содержание разделов пояснительной записки к курсовому проекту .....	7
4.2. Методические указания по выполнению отдельных разделов курсового проекта.....	8
4.2.1. Расчет мощности и проверка двигателя по нагреву.....	8
4.2.2. Примеры выполнения отдельных разделов расчета .....	14
4.2.3. Разработка схемы управления электропривода .....	28
4.3. Оформление пояснительной записки .....	33
4.4. Оформление графической части проекта .....	33
Библиографический список.....	34
Приложение .....	35

## **1. Введение**

В методических указаниях рассмотрены вопросы проектирования электропривода механизмов продолжительного и повторно-кратковременного режимов работы. Они предназначены для студентов, обучающихся по специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» с профилем подготовки «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий организаций и учреждений» для выполнения курсового проекта по дисциплине "Электрический привод".

Методические указания определяют задачу, цели, требования к объему и содержанию курсового проекта, а так же указания по выполнению отдельных этапов проектирования электропривода.

## **2. Задачи и цели выполнения курсового проекта**

Основной задачей курсового проекта является освоение основных этапов проектирования автоматизированного электропривода механизмов, работающих в продолжительном и повторно-кратковременном режиме работы.

Целями выполнения курсового проекта являются:

1. Закрепление, расширение и углубление знаний в области принципов действия, способов построения, методов расчета и анализа систем электроприводов.

2. Развитие навыков применения теоретических знаний для решения инженерных и научных задач.

3. Развитие практических навыков по расчету систем электроприводов, умения пользоваться технической справочной литературой, ГОСТами и ЕСКД.

В работе студенты на основе технического задания, анализируют конструктивные и технологические особенности использования электропривода заданного механизма, выбирают метод проверки и проверяют двигатель по нагреву, рассчитывают статические характеристики и переходные процессы, анализируют основные способы управления двигателями, разрабатывают принципиальную электрическую схему управления двигателем, выбирают управляющие и коммутационные аппараты, составляют перечень элементов.

## **3. Основные требования к содержанию и защите курсового проекта**

### **3.1. Тематика курсового проекта**

Основной темой курсового проекта является проектирование электроприводов различных механизмов электротермических и крановых установок, кроме того тема курсового проекта может быть связана с научно-

исследовательской и экспериментальной работой студентов по освоению, разработке и внедрению в учебный процесс макетов современных систем управления электроприводами. В последнем случае перечень вопросов и объем расчетно-пояснительной записки определяется преподавателем.

### **3.2. Исходные данные к курсовому проекту**

Исходные данные для проектирования определяются в соответствии с вариантом студента и включают:

1. Кинематическую схему механизма ((таблица П1.1) и рис П1.2...П1.9, приложение 1).
2. График статической нагрузки на валу двигателя (рис П1.1. таблица П1.2...1.9, приложение 1).
3. Тип двигателя (таблица П1.2...1.9, приложение 1).

### **3.3. Задание на курсовой проект**

Для расчета электропривода каждому студенту выдается руководителем задание на курсовой проект (Приложение 3). Задание оформляется в одном экземпляре на типовом бланке, подписывается руководителем и студентом и является составной частью пояснительной записки. В задании указывается тема проекта, исходные данные к курсовому проекту и основные задачи проектирования.

### **3.4. Содержание и объем курсового проекта**

Курсовой проект включает в себя следующие разделы:

1. Введение.
2. Описание установки и её технологического процесса, определение задач и функций, решаемых её электроприводом.
3. Расчет и построение графика статической нагрузки на валу двигателя и выходном валу механизма.
4. Проверка двигателя по нагреву.
5. Расчет и построения естественной механической и электромеханической характеристик двигателя.
6. Построения диаграммы реостатного пуска двигателя в две ступени и расчета значений сопротивлений пусковых резисторов и резистора динамического торможения.
7. Расчет и построения графиков переходных процессов по скорости и моменту при пуске двигателя в две ступени.
8. Разработка схемы управления двигателем и описание ее работы,
9. Выбор аппаратуры схемы управления и составление перечня элементов.
10. Заключение. Основные результаты проекта и выводы по работе.

Курсовой проект должен содержать расчетно-пояснительную записку объемом 25-30 страниц формата А4 (297 x 210 мм) с графической частью на 2-ух

листах формата А3. На одном листе располагается график статической нагрузки на исполнительном органе рабочего механизма, пусковая диаграмма и графики переходных процессов, на втором листе располагаются электрическая принципиальная схема управления электроприводом и перечень элементов к ней. (Перечень элементов может быть выполнен на отдельном листе формата А4 и включен в приложение к пояснительной записке).

### **3.5. Этапы работы над курсовым проектом**

Курсовой проект состоит из следующих этапов:

1. Описание назначения и функционирования оборудования, в состав которого входит заданный электропривод. Определение задач, решаемых его электроприводом.
2. Расчет и построение графика статической нагрузки на валу двигателя и выходном валу механизма.
3. Расчет мощности двигателя и проверка по нагреву.
4. Расчет и построение естественных механической и электромеханической характеристик двигателя.
5. Построение диаграммы реостатного пуска двигателя в две ступени и расчет сопротивлений пусковых и тормозного резисторов.
6. Расчет и построение графиков переходных процессов  $\omega(t)$ ,  $M(t)$  при пуске двигателя в две ступени.
7. Разработка схемы управления двигателем, описание ее работы, выбор аппаратуры и составления перечня элементов.
8. Оформление курсового проекта.
9. Представление проекта на заключение руководителю и рецензию другому преподавателю кафедры.
10. Подготовка доклада и защита курсового проекта.

### **3.6. Защита курсового проекта**

Перед защитой к указанному в задании сроку студент представляет пояснительную записку курсового проекта на заключение руководителю. Записка к курсовому проекту представляется руководителю полностью оформленной, подписанной студентом с указанием даты.

Руководитель проекта дает письменное заключение с анализом выполнения задания и требований к оформлению проекта, делает вывод о возможности допуска студента к защите проекта. Заключение подписывается руководителем и возвращается студенту.

Если руководитель проекта сделает вывод о невозможности допуска студента к защите курсового проекта, последний обязан исправить проект в соответствии с замечаниями руководителя, и представляет пояснительную записку на рецензию другому преподавателю кафедры. При подготовке к защите курсового проекта студент анализирует заключение рецензента с учетом замечаний, составляет

доклад для защиты проекта, рассчитанный на 2-3 мин. В докладе должна быть сформулирована поставленная перед студентом задача, освещены пути и методы ее решения, полученные результаты; отмечены оригинальные места выполненной разработки, особенности схемных решений, практическая ценность устройства. В заключение доклада дается ответ на сделанные замечания по содержанию и оформлению проекта.

Защита проекта проводится перед комиссией в составе руководителя проекта и членов комиссии, назначенных решением кафедры.

После доклада студент отвечает на вопросы членов комиссии по содержанию проекта и общетеоретическому материалу. При выводе оценки учитываются качество выполнения проекта и доклада, уровень защиты проекта.

Студент, не сумевший защитить свой проект перед комиссией, получает неудовлетворительную оценку. При этом комиссия на листе заключения излагает мотивы своего решения и предложения по доработке курсового проекта или по выдаче нового задания. К повторной защите студент допускается лишь после доработки проекта или выполнения новой и соответствующего заключения руководителя.

## **4. Методические указания к работе над курсовым проектом**

### **4.1. План построения и содержание разделов пояснительной записки к курсовому проекту**

Расчетно-пояснительная записка должна содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) аннотацию;
- 3) задание на курсовой проект, подписанное студентом и руководителем;
- 4) содержание;
- 5) введение;
- 6) расчет статической нагрузки на выходном валу или поступательно движущемся элементе кинематической схемы механизма;
- 7) проверку двигателя по нагреву;
- 8) расчет естественной механической и электромеханической характеристик двигателя
- 9) пусковую диаграмму и расчет сопротивлений пусковых и тормозного резисторов.
- 10) расчет переходных процессов при пуске двигателя в две ступени.
- 11) разработку принципиальной схемы управления электроприводом, выбор элементов, описание работы схемы, перечень элементов;
- 12) заключение;
- 13) список использованных литературных источников;
- 14) приложения.

## 4.2. Методические указания по выполнению отдельных разделов курсового проекта

### 4.2.1. Расчет мощности и проверка двигателя по нагреву.

Расчет мощности электродвигателей производится по нагрузочным диаграммам-графикам изменения нагрузки на рабочем органе, который при известных параметрах кинематической цепи привода может быть приведен к валу двигателя и представляет собой график изменения статической нагрузки на валу двигателя. При больших моментах инерции механизма и двигателя, частых пусках и торможениях двигателя график полной нагрузки на валу двигателя включает в себя статическую и динамическую составляющие и может существенно отличаться от графика статической нагрузки. В этом случае производят предварительный выбор двигателя по мощности с последующей проверкой его по нагреву.

В данном курсовом проекте тип двигателя задан и определен заданием, поэтому задача состоит в проверке двигателя по перегрузочной способности и по нагреву. Для этого надо по исходным данным построить нагрузочную диаграмму на валу двигателя и выбрав метод проверки определить, подходит ли заданный двигатель по нагреву. При этом следует считать времена переходных процессов при пуске и торможении значительно меньше основного времени работы двигателя, т.е. нагревом двигателя во время переходных процессов можно пренебречь.

Различают три основных режима приводов: продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный.

В **продолжительном** режиме работы двигатель за время работы под действием протекающих по его обмоткам токов успевает нагреться до установившейся температуры. При графиках нагрузки на рабочем органе вида рис. 4.1. номинальную мощность двигателя следует выбирать по соотношению

$$P_H \geq P_C$$

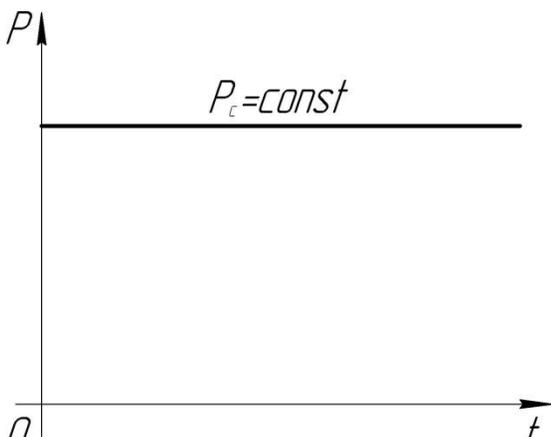


Рис. 4.1. График нагрузки привода в продолжительном режиме работы

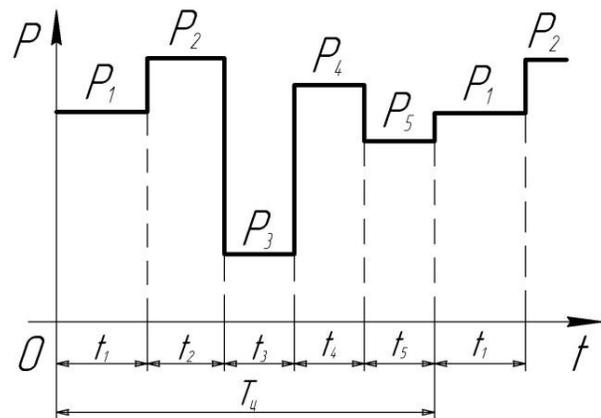


Рис. 4.2 График нагрузки привода в повторно-кратковременном режиме работы

При графиках нагрузки на рабочем органе  $P = f(t)$  вида рис. 4.2, когда может быть выделен цикл, по истечении которого характер нагрузки повторяется, используется метод эквивалентных средних потерь, согласно которому рассчитываются эквивалентные средние потери за время цикла  $T_{\text{Ц}}$  по формуле:

$$\Delta P_{\text{СР}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{T_{\text{Ц}}} \quad (4.1)$$

и сравниваются с номинальными потерями выбираемого двигателя. При этом должно быть выполнено условие:

$$\Delta P_{\text{СР}} \leq \Delta P_{\text{Н}}. \quad (4.2)$$

Здесь потери в номинальном режиме при коэффициенте полезного действия определяются как:

$$\Delta P_{\text{Н}} = P_{\text{Н}} \frac{1 - \eta_{\text{Н}}}{\eta_{\text{Н}}}.$$

Потери в машине делятся на постоянные  $k$ , не зависящие от нагрузки, и переменные  $u$ , зависящие от нагрузки. В номинальном режиме работы:

$$\Delta P_{\text{Н}} = k + u_{\text{Н}}. \quad (4.3)$$

Для двигателей постоянного тока:

$$u_{\text{Н}} = I_{\text{ЯН}}^2 R_{\text{Я}}, \quad (4.3')$$

Для вычисления эквивалентных средних потерь  $\Delta P_{\text{СР}}$  следует вычислить значение постоянных потерь:

$$k = \Delta P_{\text{Н}} - u_{\text{Н}},$$

построить графики изменения за цикл тока якоря, если выбирается двигатель постоянного тока, или графики изменения тока ротора, если выбирается асинхронный двигатель. Затем вычисляются переменные потери при каждом  $i$ -м значении мощности и тока.

Для двигателей постоянного тока:

$$u_t = I_{\text{Ят}}^2 R_{\text{Я}};$$

Тогда  $\Delta P_i = k + u_i$ ; по (4.1) рассчитывается  $\Delta P_{\text{СР}}$  и в соответствии с (4.2) выбирается электродвигатель по мощности.

В случаях, когда динамические нагрузки на валу двигателя заметно влияют на вид нагрузочной диаграммы, построенной для статических нагрузок, производится предварительный выбор двигателя по средним за рабочий цикл значениям момента  $M_{\text{СР}}$  или мощности  $P_{\text{СР}}$  статической нагрузки:

$$M_{\text{Н}} \geq k_3 M_{\text{СР}} = \frac{k_3}{T_{\text{Ц}}} \sum_{i=1}^n M_{\text{С}i} t_i, \quad (4.4)$$

$$P_H \geq k_3 P_{C CP} = \frac{k_3}{T_{Ц}} \sum_{i=1}^n P_{Ci} t_i, \quad (4.5)$$

где  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент запаса, учитывающий динамические нагрузки;  
 $M_{Ci}, P_{Ci}$  – нагрузки на валу двигателя на  $i$ -м интервале.

Возможно также использование метода эквивалентных величин с учетом коэффициента запаса  $k_3$ .

Правильность выбора двигателя по мощности устанавливается проверкой двигателя по условиям нагрева, которая проводится методом средних потерь или более простыми методами эквивалентных величин.

При неизменных в процессе работы двигателя сопротивлениях обмоток может быть применен метод эквивалентного тока для нагрузочной диаграммы двигателя с учетом динамических нагрузок.

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{T_{Ц}}}. \quad (4.6)$$

Условием правильности выбора двигателя будет:

$$I_3 \leq I_H. \quad (4.7)$$

Здесь  $I_n$  – ток якоря двигателя постоянного тока

Из формулы эквивалентного тока  $I_3$  при постоянстве потока двигателя может быть получено уравнение эквивалентного момента:

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{T_{Ц}}}. \quad (4.8)$$

Условием правильности выбранного двигателя при заданном моменте на его валу будет:

$$M_3 \leq M_H \quad (4.9)$$

При жестких характеристиках двигателя, когда его скорость под действием нагрузки изменяется незначительно, т. е. можно принять  $\omega = const$  из уравнения 4.8 для  $M_3$  следует уравнение эквивалентной мощности:

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{T_{Ц}}}. \quad (4.10)$$

В этом случае условие правильности выбранного двигателя будет:

$$P_3 \leq P_H. \quad (4.11)$$

Если выбранный двигатель не удовлетворяет условиям нагрева, следует выбрать ближайшее, большее значение мощности нового двигателя и поверочный расчет повторить.

При частых пусках и остановках двигателя, а также при длительной работе его в области низких скоростей в знаменателях выражений (4.6), (4.8), (4.10) вводят множитель  $\beta < 1$ , учитывающий ухудшение условий охлаждения двигателей.

При **кратковременном режиме** за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы успевает остыть до температуры окружающей среды. Рекомендуется выбирать двигатели из серии, предназначенной для нормированных значений продолжительности кратковременного режима  $t_k$ , составляющих 15, 30, 60, 90 мин. В каталогах приводятся значения мощности при кратковременном режиме  $P_{кр}$ , соответствующие нормированному значению времени работы  $t_k$  и КПД при кратковременном режиме  $\eta_{кр}$ . Эти двигатели могут быть использованы и в продолжительном режиме работы при снижении мощности до  $P_{пр}$  и соответствующем продолжительному режиму работы КПД  $\eta_{пр}$ . Значения  $P_{пр}$  и  $\eta_{пр}$  также приводятся в каталогах.

Последовательность выбора мощности двигателя и проверки его по нагреву при кратковременном режиме работы следующая. При заданном графике нагрузки по известным значениям нагрузки  $M_{кр}$  и времени работы  $t_p$  (рис. 4.3) выбирается двигатель, удовлетворяющий условиям перегрузки:

$$M_{кр} / M_{н пр} \leq 2 \div 2,5 ,$$

где  $M_{н пр} = P_{пр} / \omega_n$  – номинальный момент двигателя в продолжительном режиме работы.

Асинхронные, короткозамкнутые двигатели должны удовлетворять также условиям пуска  $M_{пр} > M_{кр}$ , где  $M_{пр}$  – пусковой момент двигателя.

Затем с использованием формул для выражений (4.3, 4.3') рассчитывается коэффициент потерь  $a = k / u_n$ , строятся графики статических характеристик и переходных процессов и уточненная нагрузочная диаграмма вида рис. 4.4.

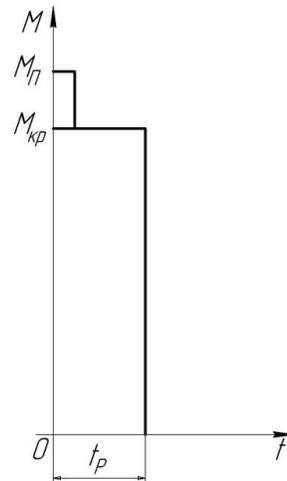
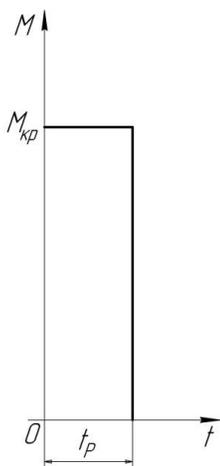


Рис. 4.3. График нагрузки привода в кратковременном режиме работы

Рис. 4.4. График нагрузки привода в кратковременном режиме работы с учетом процесса пуска

По формуле (4.8) рассчитывается значение эквивалентного за время работы момента  $M_3$ , затем определяются потери мощности для продолжительного и кратковременного режимов работы:

$$\Delta P_{\text{ПР}} = P_{\text{ПР}} \frac{1 - \eta_{\text{ПР}}}{\eta_{\text{ПР}}}; \Delta P_{\text{К}} = P_{\text{К}} \frac{1 - \eta_{\text{К}}}{\eta_{\text{К}}} \quad (4.12)$$

и постоянной времени нагрева двигателя:

$$T_{\text{Н}} = \frac{t_{\text{К}}}{\ln \frac{\Delta P_{\text{К}}}{\Delta P_{\text{К}} - \Delta P_{\text{ПР}}}}$$

Рассчитывается момент двигателя, определяющий допустимый нагрев его за время работы:

$$M_{\text{Доп } t_{\text{Р}}} = M_{\text{Н}} \sqrt{(a + 1) \frac{1 - e^{-t_{\text{К}}/T_{\text{Н}}}}{1 - e^{-t_{\text{Р}}/T_{\text{Н}}}} - a}$$

Двигатель выбран правильно, если  $M_{\text{Доп } t_{\text{Р}}} \geq M_3$ . В противном случае следует выбрать двигатель ближайшей большей мощности и повторить проверочный расчет.

В повторно кратковременном режиме работы двигатель за время работы не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы не успевает остыть до температуры окружающей среды. Нагрузочная диаграмма для повторно-кратковременного режима приведена на рис. 4.5.

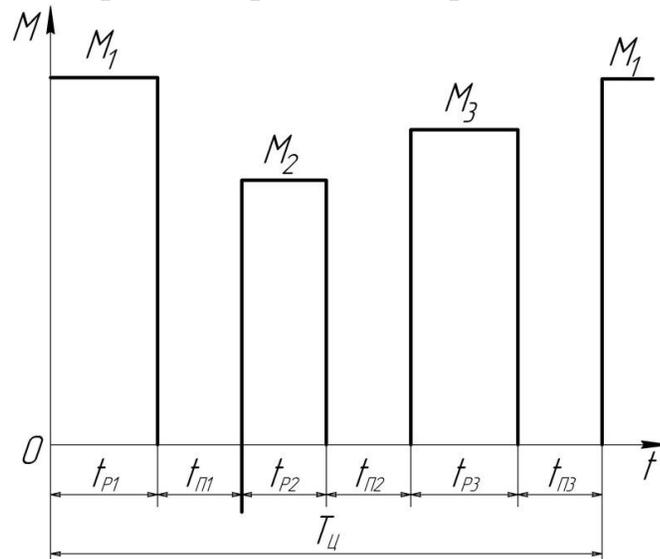


Рис. 4.5. График нагрузки привода в повторно-кратковременном режиме работы

Здесь  $t_p$  – время работы двигателя;  $t_{\Pi}$  – время пауз;  $T_{\text{ц}} = t_p + t_{\Pi}$  – время цикла, которое при повторно-кратковременном режиме не должно превышать 10 мин. Продолжительность включения двигателя, в процентах (%):

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{T_{\text{ц}}} \cdot 100\%$$

В каталогах приводятся данные двигателей, предназначенных для работы в повторно-кратковременных режимах при стандартных значениях  $\text{ПВ}_{\text{СТ}}$ , составляющих 15, 25, 40, 60 %. При  $\text{ПВ}_{\text{СТ}}=100\%$  двигатель предназначен для продолжительного режима работы.

Затем определяется по формулам (4.6, 4.8, 4.10) за время работы, исключая время пауз, эквивалентные величин вида  $I_{\text{Э}}$  или  $M_{\text{Э}}$  или  $P_{\text{Э}}$ . При этом график рис. 4.5 приводится к виду рис. 4.6.

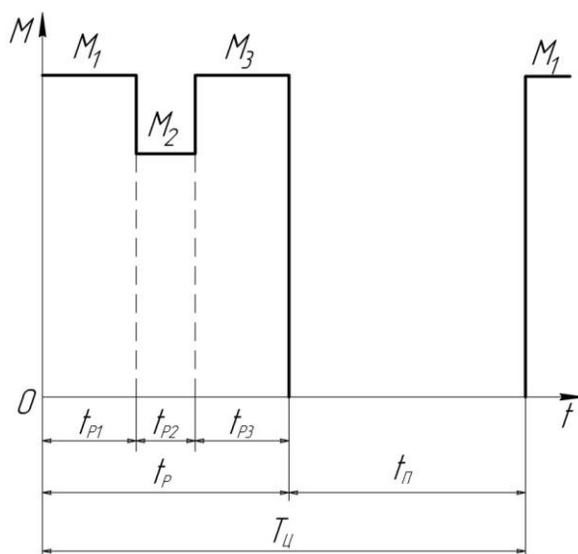


Рис. 4.6. Эквивалентный график нагрузки привода в повторно-кратковременном режиме работы

Определяется расчетная продолжительность включения, % :

$$\text{ПВ}_{\text{РАСЧ}} = \frac{t_p}{t_p + t_{\Pi}} \cdot 100\%$$

Расчетные эквивалентные величины приводятся к стандартному значению  $\text{ПВ}_{\text{СТ}}$  по формулам:

$$P_{\text{СТ Р}} = P_{\text{Э}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{РАСЧ}}}{\text{ПВ}_{\text{СТ}}}},$$

$$M_{\text{СТ Р}} = M_{\text{Э}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{РАСЧ}}}{\text{ПВ}_{\text{СТ}}}},$$

$$I_{\text{СТР}} = I_{\text{Э}} \sqrt{\frac{P_{\text{РАСЧ}}}{P_{\text{СТ}}}}$$

Проверяем двигатель по нагреву, для  $P_{\text{СТ}} = 100\%$ , по одному из условий:

$$P_{\text{Н}} \geq P_{\text{СТР}}, \quad M_{\text{Н}} \geq M_{\text{СТР}}, \quad I_{\text{Н}} \geq I_{\text{СТР}},$$

При необходимости (при учете переходных процессов) строятся графики нагрузки привода с учетом переходных процессов. Затем методами средних потерь или эквивалентных величин проводится проверка двигателя по условиям нагрева. В нашем случае проверка является окончательной.

Более подробно методы выбора двигателей по мощности и проверки по нагреву изложены, например в [1].

#### 4.2.2 Примеры выполнения отдельных разделов расчета

##### Проверка двигателя по нагреву.

Данная проверка осуществляется с учетом исходных данных:

Исходные данные

Таблица 4.1.

Вариант	Тип двигателя	$P_{\text{Н}}$ , кВт	$n_{\text{Н}}$ , об/мин	$\underline{M}_1$	$\underline{M}_2$	$\underline{M}_3$	$\underline{M}_4$	$\underline{M}_5$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
				$M_{\text{Н}}$	$M_{\text{Н}}$	$M_{\text{Н}}$	$M_{\text{Н}}$	$M_{\text{Н}}$	с	с	с	с	с	с
16	2ПН160L	6,3	1000	1,0	0	0,6	1,2	0,3	80	40	100	40	0	340

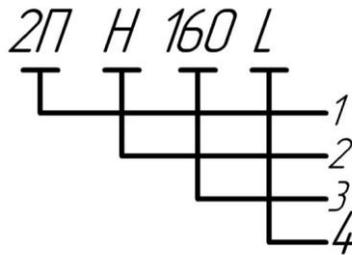


Рисунок 4.7. Расшифровка обозначения двигателя 2ПН160L

- 1 – название серии, вторая серия машин постоянного тока;
- 2 – исполнение по способу защиты, Н – защищенное с самовентиляцией;
- 3 – высота оси вращения;
- 4 – условное обозначение длины сердечника якоря, L – большая длина.

. Справочные данные двигателя 2ПН160L

Таблица 4.2

$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	$U_{\text{НОМ}}$ , В	$n$ , об/мин		$\eta$ , %	$R_{\text{ОБМ}}$ , при 15°C, Ом			$J$ , кг·м <sup>2</sup>
		НОМ.	макс.		якоря	добав. полюс.	возбужд.	
6,3	220	1000	3000	81,5	0,278	0,196	87,6	0,1

##### Построение нагрузочной диаграммы.

Для этого рассчитывается номинальный момент на валу двигателя:

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H} = 9550 \cdot \frac{6,3}{1000} = 60,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

По номинальному моменту определяются значения моментов в различные интервалы нагрузочной диаграммы:

$$M_1 = 1,0 \cdot M_H = 1,0 \cdot 60,2 = 60,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_2 = 0 \cdot M_H = 0$$

$$M_3 = 0,6 \cdot M_H = 0,6 \cdot 60,2 = 36,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_4 = 1,2 \cdot M_H = 1,2 \cdot 60,2 = 72,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_5 = 0,3 \cdot M_H = 0,3 \cdot 60,2 = 18,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

По полученным значениям моментов и соответствующих им времен из табл.4.1. строится нагрузочная диаграмма:

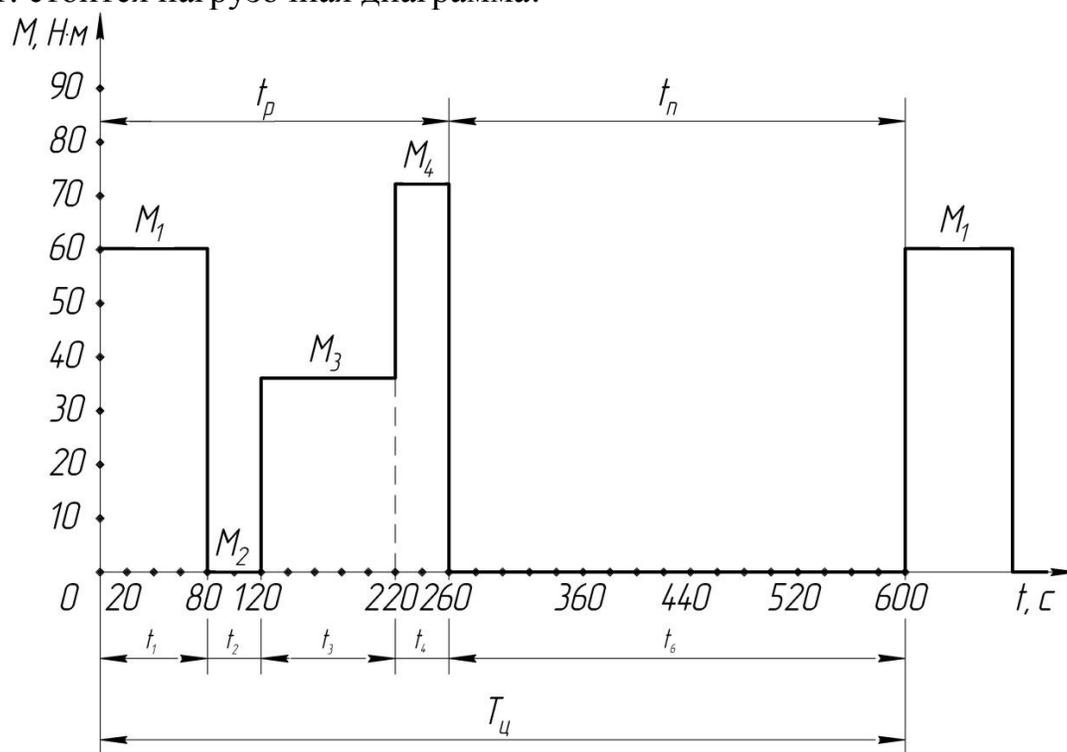


Рисунок 4.8. Нагрузочная диаграмма двигателя

В данном курсовом проекте двигатель уже задан, поэтому по нагрузочной диаграмме определяется эквивалентный момент и сравнивается его значение с известным номинальным моментом.

Осуществим проверку двигателя по нагреву, используя формулы эквивалентных величин.

Для этого строится эквивалентная нагрузочная диаграмма привода:

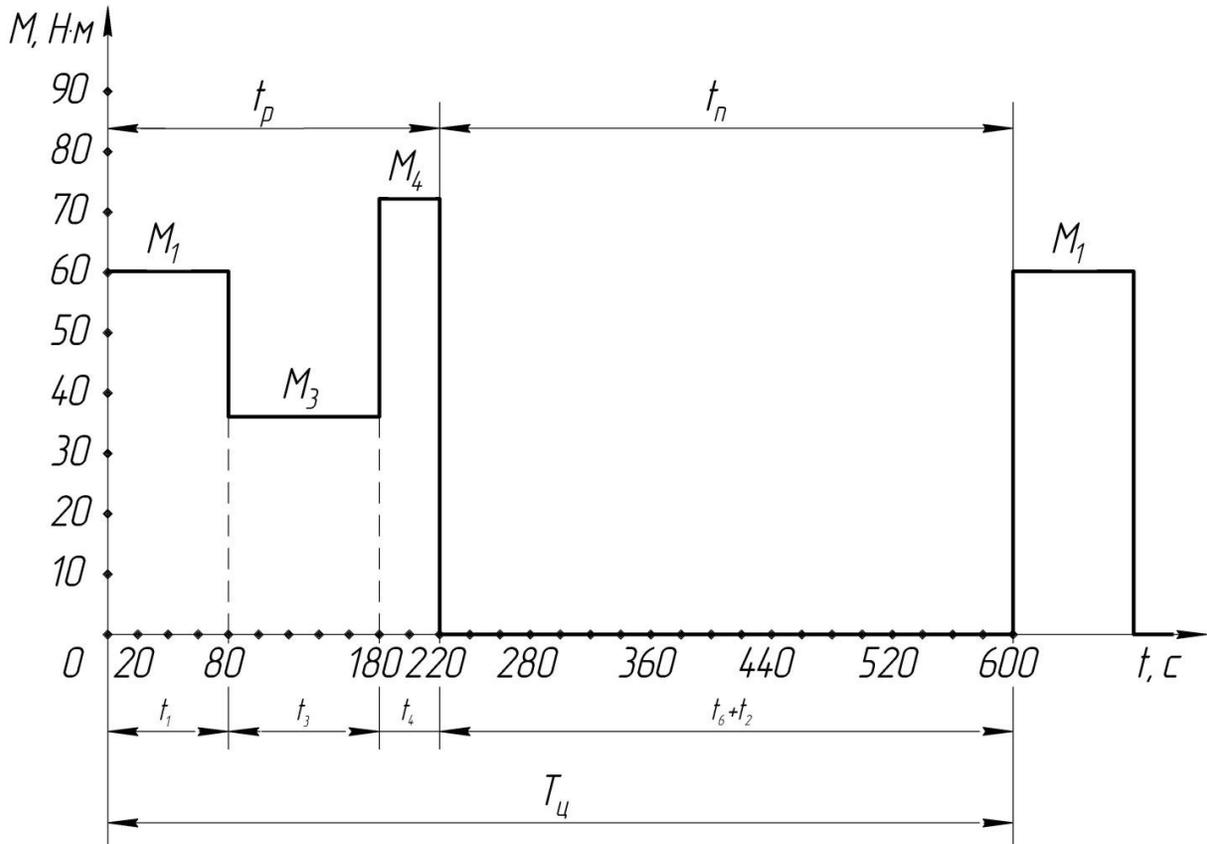


Рисунок 4.9. Эквивалентная нагрузочная диаграмма двигателя

По эквивалентной нагрузочной диаграмме рассчитывается эквивалентный момент на валу двигателя для времени работы двигателя  $t_p$  по формуле:

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4}{t_p}}$$

где  $t_p = t_1 + t_3 + t_4 = 80 + 100 + 40 = 220$  с

$$M_3 = \sqrt{\frac{60,2^2 \cdot 80 + 36,1^2 \cdot 100 + 72,2^2 \cdot 40}{220}} = 53,46 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определяется расчетная продолжительность включения, % :

$$ПВ_{РАСЧ} = \frac{t_p}{t_p + t_{\Pi}} \cdot 100\%$$

где  $t_p = t_1 + t_3 + t_4 = 80 + 100 + 40 = 220$  с

$t_{\Pi} = t_2 + t_6 = 40 + 340 = 380$  с

$$ПВ_{РАСЧ} = \frac{220}{220 + 380} \cdot 100\% = 36,67\%$$

Далее необходимо привести расчетные эквивалентные величины к стандартному значению ПВ (стандартное значение продолжительности включения  $ПВ_{СТ}$  принимается равным 100%):

$$M_{\text{СТР}} = M_{\text{Э}} \sqrt{\frac{P_{\text{РАСЧ}}}{P_{\text{СТ}}}} = 53,46 \cdot \sqrt{\frac{36,67}{100}} = 32,37$$

Проверяется условие правильности выбора двигателя по нагреву:

$$M_{\text{Н}} > M_{\text{СТР}}$$

$$60,2 \text{ Нм} > 32,37 \text{ Нм}$$

Условие по нагреву выполняется. Поэтому выбранный двигатель подходит для работы с данным механизмом.

### **Расчет и построение механической и электромеханической характеристик**

Механические характеристики  $\omega = f(M)$  могут быть построены по уравнению:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{яц}}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M,$$

где  $R_{\text{яц}} = R_{\text{я}} + R_{\text{доб.п}}$  – сопротивление якорной цепи.

Электромеханические  $\omega = f(I_{\text{я}})$  характеристики могут быть построены по уравнению:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{яц}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{я}}$$

Для построения естественной механической характеристики используются справочные данные электрической машины (табл.4.2.). Построение можно осуществить по двум точкам: скорости холостого хода  $\omega_0$  и точки, соответствующей номинальному режиму работы (номинальный момент  $M_{\text{НОМ}}$  и номинальная частота вращения  $n_{\text{НОМ}}$ ).

Определим скорость холостого хода  $\omega_0$

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \cdot \Phi}$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение цепи якоря, В;

$$k \cdot \Phi = \frac{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{яц}} \cdot I_{\text{я.НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}$$

Рассчитаем необходимые параметры:

1. Потребляемая мощность из сети:

$$P_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta} = \frac{6,3}{0,815} = 7,73 \text{ кВт}$$

2. Ток возбуждения:

$$I_{\text{В}} = \frac{U_{\text{В}}}{R_{\text{В}}} = \frac{220}{87,6} = 2,51 \text{ А}$$

3. Мощность цепи возбуждения:

$$P_{\text{В}} = I_{\text{В}} \cdot U_{\text{В}} = 2,51 \cdot 220 = 552,2 \text{ Вт}$$

4. Мощность цепи якоря:

$$P_{\text{я}} = P_{1\text{НОМ}} - P_{\text{в}} = 7730 - 552,2 = 7177,8 \text{ Вт}$$

5. Ток якоря при номинальной нагрузке:

$$I_{\text{я.НОМ}} = \frac{P_{\text{я}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{7177,8}{220} = 32,63 \text{ А}$$

6. Номинальная скорость вращения:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ рад/с}$$

7. Сопротивление якорной цепи:

$$R_{\text{яц}} = R_{\text{я}} + R_{\text{доб.п}} = 0,278 + 0,196 = 0,474 \text{ Ом}$$

8. Произведение  $k \cdot \Phi$

$$k \cdot \Phi = \frac{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{яц}} \cdot I_{\text{я.НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{220 - 0,474 \cdot 32,63}{104,72} = 1,953 \text{ В} \cdot \text{с}$$

9. Скорость холостого хода  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \cdot \Phi} = \frac{220}{1,953} = 112,64 \text{ рад/с}$$

10. Номинальный момент на валу двигателя  $M_{\text{НОМ}}$ :

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9550 \cdot \frac{6,3}{1000} = 60,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Построим естественную механическую характеристику по полученным точкам:  $(M=0; \omega_0)$  и  $(M_{\text{НОМ}}; \omega_{\text{НОМ}})$ . Механическая характеристика представлена на (рис. 4.10). Электромеханическая характеристика имеет такой же вид, но вместо моментов по горизонтальной оси наносятся значения токов якоря.

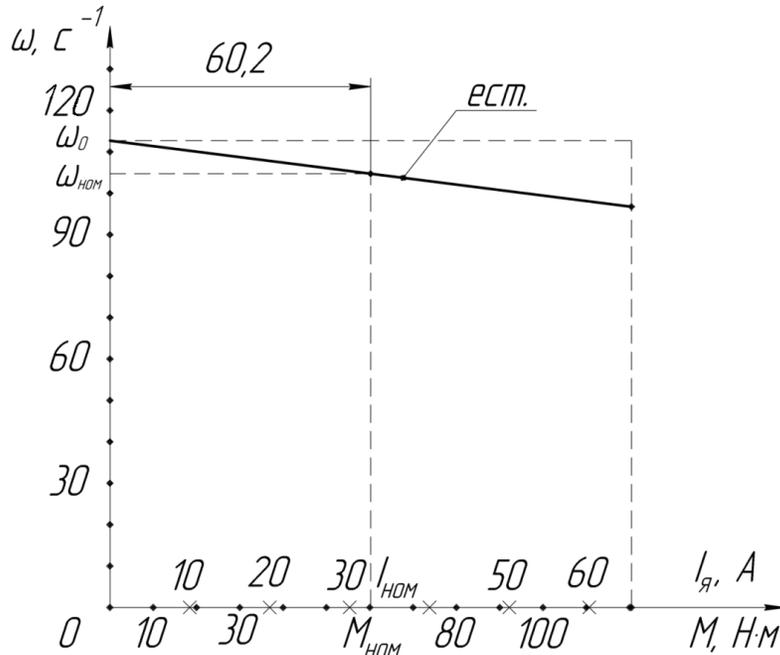


Рисунок 4.10. Естественные механическая  $\omega = f(M)$  и электромеханическая  $\omega = f(I_{\text{я}})$  характеристики

**Графический метод построения пусковых реостатных характеристик (пусковой диаграммы) при пуске в 2 ступени и определение сопротивлений пусковых резисторов:**

Схема якорной цепи при пуске в две ступени имеет вид:

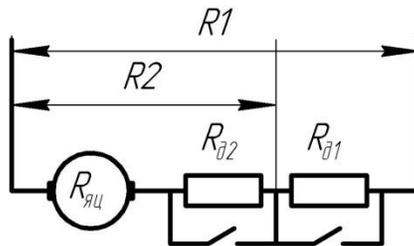


Рисунок 4.11. Схема подключения пусковых реостатов

где  $R_1 = R_{яц} + R_{д1} + R_{д2}$ ,  $R_2 = R_{яц} + R_{д2}$

На рис. 4.12. приведена пусковая диаграмма, в соответствии с которой пуск двигателя производится в две степени. Пусковые реостатные характеристики построены при условиях, что пусковой момент  $M_{п}=M_1=2 \cdot M_{ном}$ , соответственно для тока якоря  $I_{п}=I_1=2 \cdot I_{ном}$ . Пуск двигателя осуществляется при моменте сопротивления  $M_C=0,5 \cdot M_{ном}$ . Переключение с первой реостатной характеристики на вторую происходит при скорости  $\omega_1$ , а переключение со второй реостатной характеристики на естественную характеристику при скорости  $\omega_2$ .

1. Первая пусковая реостатная характеристика строится по 2-ум точкам: точка s с координатами  $(M=0; \omega_0)$  и точка n с координатами  $(M_1; \omega=0)$ ,  $M_1=2 \cdot M_{ном}=2 \cdot 60,2=120,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$

2. Для построения второй пусковой реостатной характеристики необходимо:

1) восстановить перпендикуляр к оси моментов в точке n с координатами  $(M_1; \omega=0)$ ;

2) через точку пересечения перпендикуляра и естественной характеристики (точку g) провести прямую, параллельную оси моментов.

3) найти такое положение вертикальной прямой, проведенной из точки  $M_2 > M_C$  на оси моментов, при которой точки s, h, k расположились бы на одной прямой (вторая реостатная характеристика):

а) координаты точек m и h по оси моментов соответствуют моменту  $M_2$  переключения с 1-ой реостатной характеристики на 2-ю реостатную характеристику;

б) координаты точек k и g по оси моментов соответствуют моменту  $M_1$ , который в процессе пуска, при переключении с 1-ой реостатной характеристики на 2-ю реостатную характеристику и затем на естественную, не должен превышать

$$M_1=2 \cdot M_{ном}$$

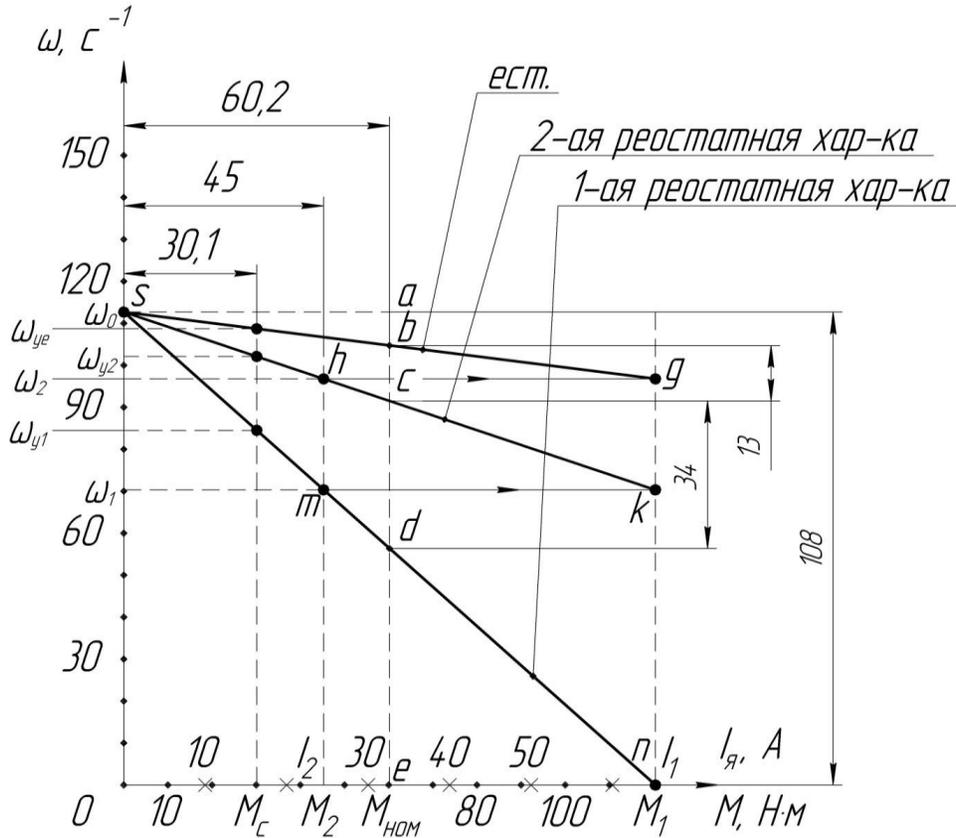


Рисунок 4.12. Пусковая диаграмма двигателя.

**Определение сопротивлений пусковых резисторов  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$  методом отрезков:**

1. Номинальное сопротивление:

$$R_{н} = \frac{U_{ном}}{I_{я.ном}} = \frac{220}{32,63} = 6,74 \text{ Ом}$$

2. Используя графическое изображение пусковой диаграммы на рис. 4.12

$$R_{д1} = R_{н} \cdot \frac{cd}{ae} = 6,74 \cdot \frac{34}{108} = 2,12 \text{ Ом}$$

$$R_{д2} = R_{н} \cdot \frac{bc}{ae} = 6,74 \cdot \frac{13}{108} = 0,81 \text{ Ом}$$

где  $cd$ ,  $bc$ ,  $ae$  – длины отрезков на рис. 4.12.

На рис. 4.13. определены и указаны значения моментов и скоростей, которые могут быть использованы для расчета переходных процессов по скорости  $\omega(t)$  и момента  $M(t)$ . Значения  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_{y1}$ ,  $\omega_{y2}$ ,  $\omega_{ye}$  и моментов  $M_C$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  следует округлять до целых значений.

**Примечание** к изложенному графическому методу:

Точность определения сопротивлений резисторов и значений скоростей переключения  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и установившихся скоростей  $\omega_{y1}$ ,  $\omega_{y2}$ ,  $\omega_{ye}$  зависит от размеров графика пусковой диаграммы. Более точный расчет дает аналитический метод расчета.

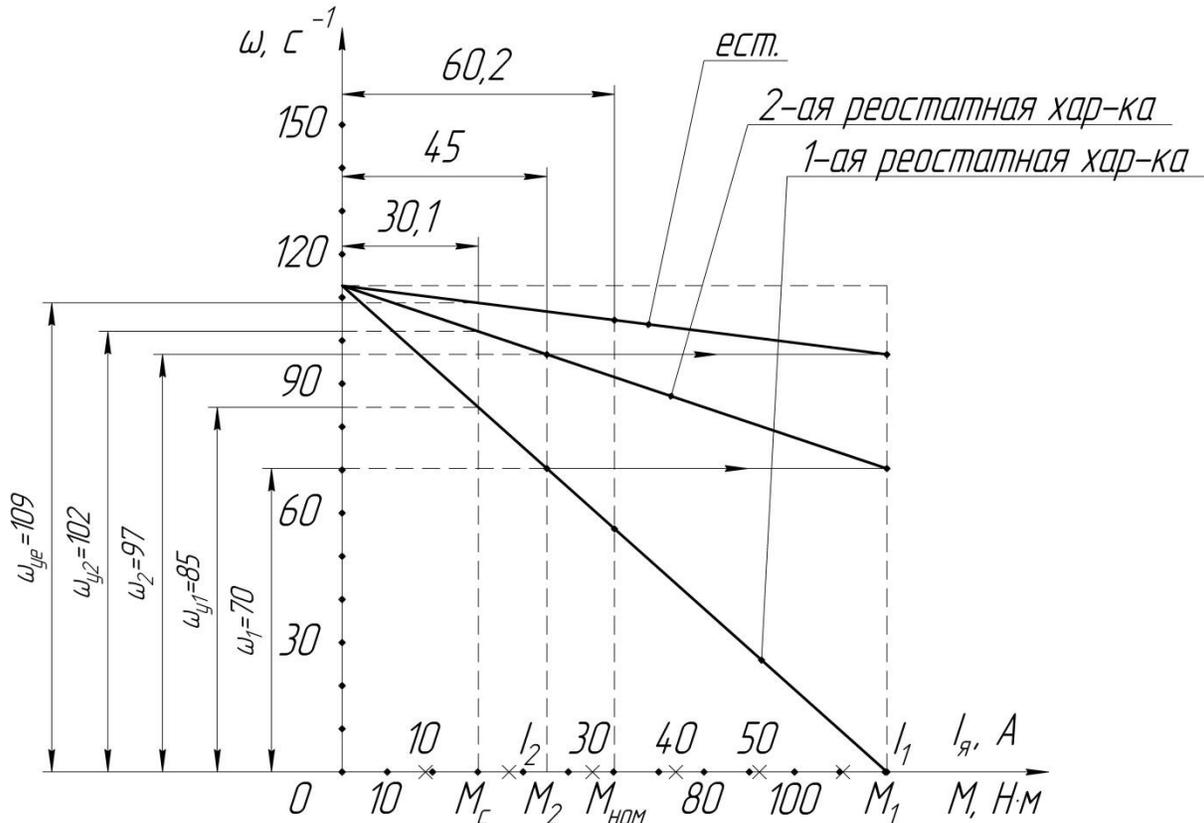


Рисунок 4.13. Пусковая диаграмма двигателя с числовыми значениями скоростей.

**Аналитический метод определения сопротивлений пусковых резисторов и параметров для расчета переходных процессов пуска двигателя в 2 ступени:**

$I_1$  – максимальный пусковой ток, определяется из условия:  $I_1 \leq (2 \div 2,5) I_{я.ном}$

Примем ток  $I_1$  равным:

$$I_1 = 2 \cdot I_{я.ном} = 2 \cdot 32,63 = 65,26 \text{ А}$$

Определим ток переключения  $I_2$  ( $Z=2$  – число ступеней пускового реостата):

$$I_2 = I_1 \cdot z \sqrt{\frac{R_{яц} \cdot I_1}{U_{ном}}} = 65,26 \cdot \sqrt{\frac{0,474 \cdot 65,26}{220}} = 24,47 \text{ А}$$

При моменте сопротивления  $M_c = 0,5 \cdot M_{ном}$ , момент переключения  $M_2$  должен быть более  $M_c$ , т.е.  $I_2$  должен быть больше  $0,5 \cdot I_{я.ном} = 0,5 \cdot 32,63 = 16,32 \text{ А}$ . Это условие выполняется.

Определим момент  $M_2$ :

Ток  $I_{я.ном}$  соответствует номинальному моменту  $M_{ном} = 60,2 \text{ Н·м}$

Ток  $I_1$  соответствует моменту  $M_1 = 120,4 \text{ Н·м}$

Так как электромагнитный момент двигателя  $M_{эм}$  пропорционален  $I_{я}$ , то току  $I_2$  будет соответствовать момент  $M_2$ , который определится из пропорции:

$$\frac{M_{\text{НОМ}}}{M_2} = \frac{I_{\text{я.НОМ}}}{I_2}$$

$$M_2 = \frac{M_{\text{НОМ}} \cdot I_2}{I_{\text{я.НОМ}}} = \frac{60,2 \cdot 24,47}{32,63} = 45,15 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определим коэффициент переключения по току  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{65,26}{24,47} = 2,67$$

Определим  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_1} = \frac{220}{65,26} = 3,371 \text{ Ом}$$

Определим  $R_2$ :

$$R_2 = R_{\text{яц}} \cdot \lambda = 0,474 \cdot 2,67 = 1,266 \text{ Ом}$$

Определим  $R_{\text{д1}}$  для первой реостатной характеристики:

$$R_{\text{д1}} = R_1 - R_2 = 3,371 - 1,266 = 2,105 \text{ Ом}$$

Определим  $R_{\text{д2}}$  для второй реостатной характеристики:

$$R_{\text{д2}} = R_2 - R_{\text{яц}} = 1,266 - 0,474 = 0,792 \text{ Ом}$$

Рассчитаем скорости переключения:

1. при разгоне по первой пусковой характеристике:

$$\omega_1 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_1 \cdot I_2}{k \cdot \Phi} = \frac{220}{1,953} - \frac{3,371 \cdot 24,47}{1,953} = 70,41 \text{ с}^{-1}$$

2. при разгоне по второй пусковой характеристике

$$\omega_2 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_2 \cdot I_2}{k \cdot \Phi} = \frac{220}{1,953} - \frac{1,266 \cdot 24,47}{1,953} = 96,78 \text{ с}^{-1}$$

Рассчитаем установившиеся скорости вращения при разгоне по соответствующим характеристикам:

1. установившаяся скорость вращения при разгоне по первой пусковой характеристике:

$$\omega_{y1} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_1 \cdot 0,5 \cdot I_{\text{я.НОМ}}}{k \cdot \Phi} = \frac{220}{1,953} - \frac{3,371 \cdot 0,5 \cdot 32,63}{1,953} = 84,49 \text{ с}^{-1}$$

2. установившаяся скорость вращения при разгоне по второй пусковой характеристике:

$$\omega_{y2} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_2 \cdot 0,5 \cdot I_{\text{я.НОМ}}}{k \cdot \Phi} = \frac{220}{1,953} - \frac{1,266 \cdot 0,5 \cdot 32,63}{1,953} = 102,07 \text{ с}^{-1}$$

3. установившаяся скорость вращения при разгоне по естественной характеристике:

$$\omega_{ye} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{c \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{яц}} \cdot 0,5 \cdot I_{\text{я.НОМ}}}{c \cdot \Phi} = \frac{220}{1,953} - \frac{0,474 \cdot 0,5 \cdot 32,63}{1,953} = 108,69 \text{ с}^{-1}$$

### ***Тормозные режимы электроприводов и расчет сопротивления резистора динамического торможения***

В электроприводах с релейно-контакторными схемами управления применяются три вида электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

***Рекуперативное торможение*** обычно применяется для реверсивных электроприводов с активной нагрузкой, при работе электропривода в четвертом квадранте – с угловой скоростью, большей скорости идеального холостого хода (синхронной скоростью для электроприводов переменного тока). Электромеханическая и механическая характеристики режима рекуперативного торможения являются продолжением характеристик двигательного режима работы электрических машин для двигателя постоянного тока независимого возбуждения. На практике, при питании обмоток двигателя постоянного тока от нерегулируемого выпрямителя, для возникновения режима рекуперативного торможения необходимо наличие параллельно с двигателем нагрузки.

***Торможение противовключением*** применяется для реверсивных электроприводов, в которых замедление электропривода переходит в режим пуска в противоположном направлении или только для быстрой неавтоматической остановки. Режим торможения противовключением используется также для работы с установившейся скоростью электроприводов с активной нагрузкой в четвертом квадранте.

***Динамическое торможение***, как правило, применяется для нереверсивных электроприводов. Оно применяется и для реверсивных электроприводов с реактивной нагрузкой, требующих автоматической остановки. Для электроприводов с активной нагрузкой режим динамического торможения используется для работы с малой установившейся скоростью в четвертом квадранте.

#### ***Динамическое торможение электрических машин постоянного тока***

В электроприводах постоянного тока перевод двигателя в режим динамического торможения осуществляется отключением обмотки якоря от источника постоянного напряжения и замыканием ее через добавочное сопротивление накоротко. Схема включения электрической машины в режиме динамического торможения приведена на рис. 4.14. Уравнение электромеханической характеристики образуется из выражения:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{я}$$

при подстановке в него напряжения якоря  $U=0$ :

$$\omega = -I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi},$$

где  $R_{яц} = R_{яд} + R_{дт}$  – сопротивление якорной цепи двигателя в режиме динамического торможения;  $R_{дт}$  – сопротивление динамического торможения.

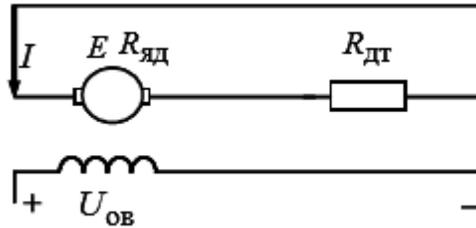


Рис. 4.14. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режиме динамического торможения  
Ток в якоре электрической машины протекает за счет ЭДС  $E = k\Phi \cdot \omega$ :

$$I = \frac{E}{R_{яц}}$$

Электромеханические характеристики электропривода постоянного тока, работающего в режиме динамического торможения, приведены на рис. 4.15. Режим работы возникает при преобразовании потенциальной энергии в электрическую (активная нагрузка на валу двигателя, работа электропривода с установившейся скоростью  $\omega_{y2}$ ) или при преобразовании кинетической энергии в электрическую (торможение двигателя при уменьшении ЭДС на обмотке якоря до нуля, начиная с установившейся скорости  $\omega_{y1}$ ). Электрическая энергия от протекающего по якору тока рассеивается на активных сопротивлениях якорной цепи двигателя  $R_{яц}$ , преобразуясь в тепловую энергию.

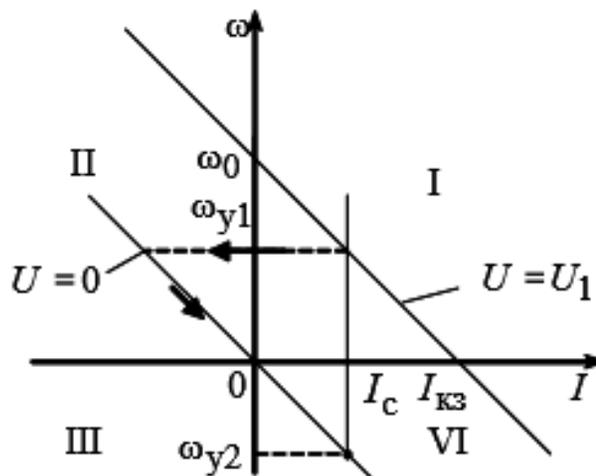


Рис. 4.15. Электромеханические характеристики режима динамического торможения двигателя постоянного тока

**Методические указания для расчета сопротивления  $R_{дт}$ .**

Принять ток торможение в момент перехода с характеристики I на характеристику II динамического торможения равным  $2 \cdot I_{НОМ}$ . В нашем случае

$I=65,26$  А. Е должна быть определена для скорости  $\omega_{y1}$ , с которой начинается динамическое торможение.

Для практических расчетов, при торможении с любой скорости при заданном моменте нагрузки, сопротивление  $R_{дт}$  рассчитывается по формуле:

$$R_{дт} = \frac{U_{ном} - R_{яц} \cdot 0,5 \cdot I_{я.ном}}{I} - R_{яц}$$

Для двигателя 2ПН160L из приведенного ранее примера:

$$R_{дт} = \frac{220 - 0,474 \cdot 0,5 \cdot 32,63}{65,26} - 0,474 = 2,779 \text{ Ом}$$

### **Расчет переходных процессов по скорости и моменту при пуске двигателя в две ступени**

Определим жесткости реостатных  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и естественной  $\beta_e$  характеристик:

$$\beta_1 = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1} = \frac{120,4 - 45,15}{70,41} = 1,07 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

$$\beta_2 = \frac{M_1 - M_2}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{120,4 - 45,15}{96,78 - 70,41} = 2,85 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

$$\beta_e = \frac{M_1}{\omega_0 - \omega_2} = \frac{120,4}{112,64 - 96,78} = 7,59 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

Определим постоянные времени переходных процессов при разгоне по соответствующей реостатной первой и второй  $T_{M1}$ ,  $T_{M2}$  и естественной  $T_{Me}$  характеристикам:

$$T_{M1} = \frac{J}{\beta_1} = \frac{0,1}{1,07} = 0,09346 \text{ с} = 93,46 \text{ мс}$$

$$T_{M2} = \frac{J}{\beta_2} = \frac{0,1}{2,85} = 0,03509 \text{ с} = 35,09 \text{ мс}$$

$$T_{Me} = \frac{J}{\beta_e} = \frac{0,1}{7,59} = 0,01318 \text{ с} = 13,18 \text{ мс}$$

где  $J$  – момент инерции двигателя или сумма моментов, состоящая из момента инерции двигателя и приведенного к валу двигателя момента инерции механизма.

**Примечание.** При расчете переходных процессов принять момент инерции механизма равным 0,2 от момента инерции двигателя и учитывать его при расчете постоянных времени  $T_{M1}$ ,  $T_{M2}$ ,  $T_{Me}$ .

Уравнения изменения скорости двигателя и момента во времени:

Для разгона по первой пусковой характеристике от скорости  $\omega = 0$  до  $\omega = \omega_1$ :

$$\omega_1(t) = \omega_{y1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M1}}}\right)$$

Время, за которое скорость вращения при разгоне по первой характеристике достигает значения  $\omega_1$ :

$$t_1 = T_{M1} \cdot \ln\left(\frac{\omega_{y1}}{\omega_{y1} - \omega_1}\right) = 93,46 \cdot \ln\left(\frac{84,49}{84,49 - 70,41}\right) = 167 \text{ мс}$$

Для разгона по второй пусковой характеристике от скорости  $\omega = \omega_1$  до  $\omega = \omega_2$ :

$$\omega_2(t) = \omega_{y2} + (\omega_1 - \omega_{y2}) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_{M2}}}$$

Время, за которое скорость вращения изменяется от 0 до  $\omega_2$  при пуске по двум реостатным характеристикам:

$$t_2 = t_1 + T_{M2} \cdot \ln\left(\frac{\omega_1 - \omega_{y2}}{\omega_2 - \omega_{y2}}\right) = 167 + 35,09 \cdot \ln\left(\frac{70,41 - 102,07}{96,78 - 102,07}\right) = 230 \text{ мс}$$

Время разгона от скорости  $\omega = \omega_1$  до  $\omega = \omega_2$  определяется по формуле:

$$t_3 = T_{M2} \cdot \ln\left(\frac{\omega_1 - \omega_{y2}}{\omega_2 - \omega_{y2}}\right) = 35,09 \cdot \ln\left(\frac{70,41 - 102,07}{96,78 - 102,07}\right) = 63 \text{ мс}$$

Для разгона по естественной характеристике от скорости  $\omega = \omega_2$  до  $\omega = \omega_{ye}$ :

$$\omega_3(t) = \omega_{ye} + (\omega_2 - \omega_{ye}) \cdot e^{-\frac{t-t_2}{T_{Me}}}$$

Изменение момента при разгоне по первой пусковой характеристике от скорости  $\omega = 0$  до  $\omega = \omega_1$ :

$$M_1(t) = M_c + (M_1 - M_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M1}}}$$

Изменение момента при разгоне по второй пусковой характеристике от скорости  $\omega = \omega_1$  до  $\omega = \omega_2$ :

$$M_2(t) = M_c + (M_1 - M_c) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_{M2}}}$$

Изменение момента при разгоне по естественной характеристике от скорости  $\omega = \omega_2$  до  $\omega = \omega_{ye}$ :

$$M_e(t) = M_c + (M_1 - M_c) \cdot e^{-\frac{t-t_2}{T_{Me}}}$$

Построение графиков  $\omega(t)$  и  $M(t)$  можно выполнять как по точкам  $\omega$  и  $M$ , рассчитанным по приведенным формулам, как с помощью калькулятора, так и с применением вычислительной техники. Результаты расчета переходных процессов на компьютере представлены на рисунках 4.16, 4.17. Совмещенное изображение графиков  $\omega(t)$  и  $M(t)$  представлено на рис. 4.18. и в приложении 6. На графиках переходных процессов в приложении 6 показаны моменты переключения  $t_1$  и  $t_2$  в схеме управления приводом. Программа решения этих уравнений в программе Mahtcad приведена в приложении 7.

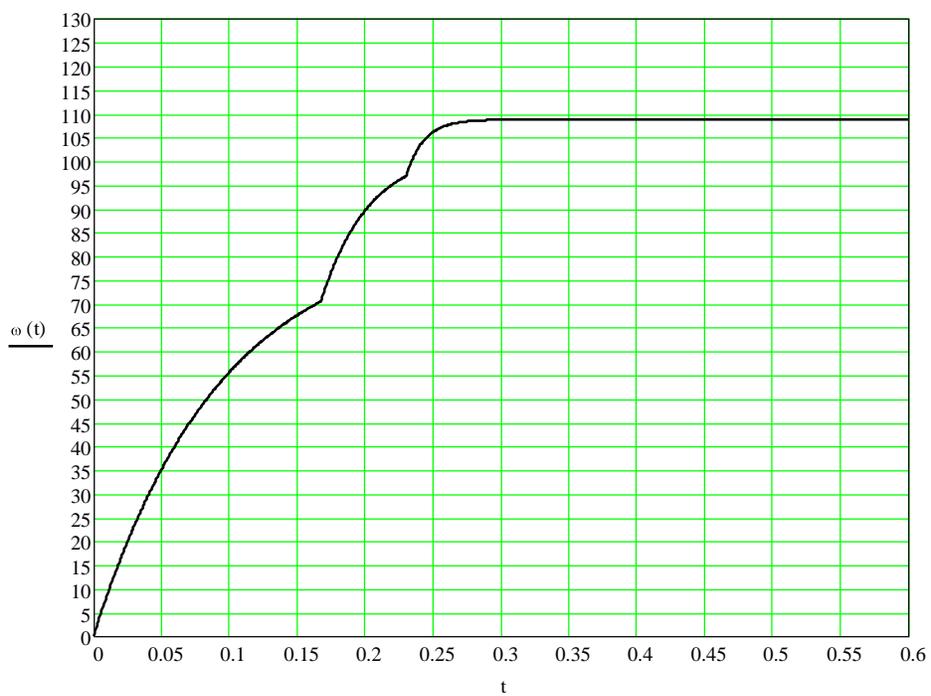


Рисунок 4.16. График переходного процесса по скорости

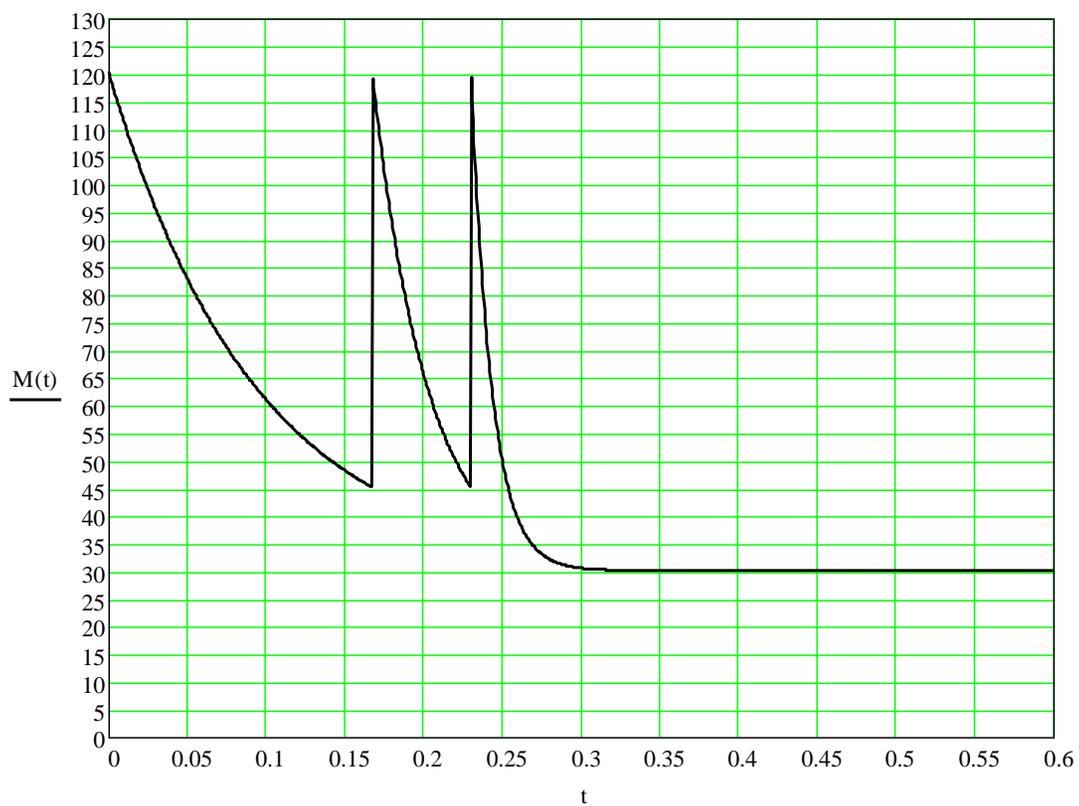


Рисунок 4.17. График переходного процесса по моменту

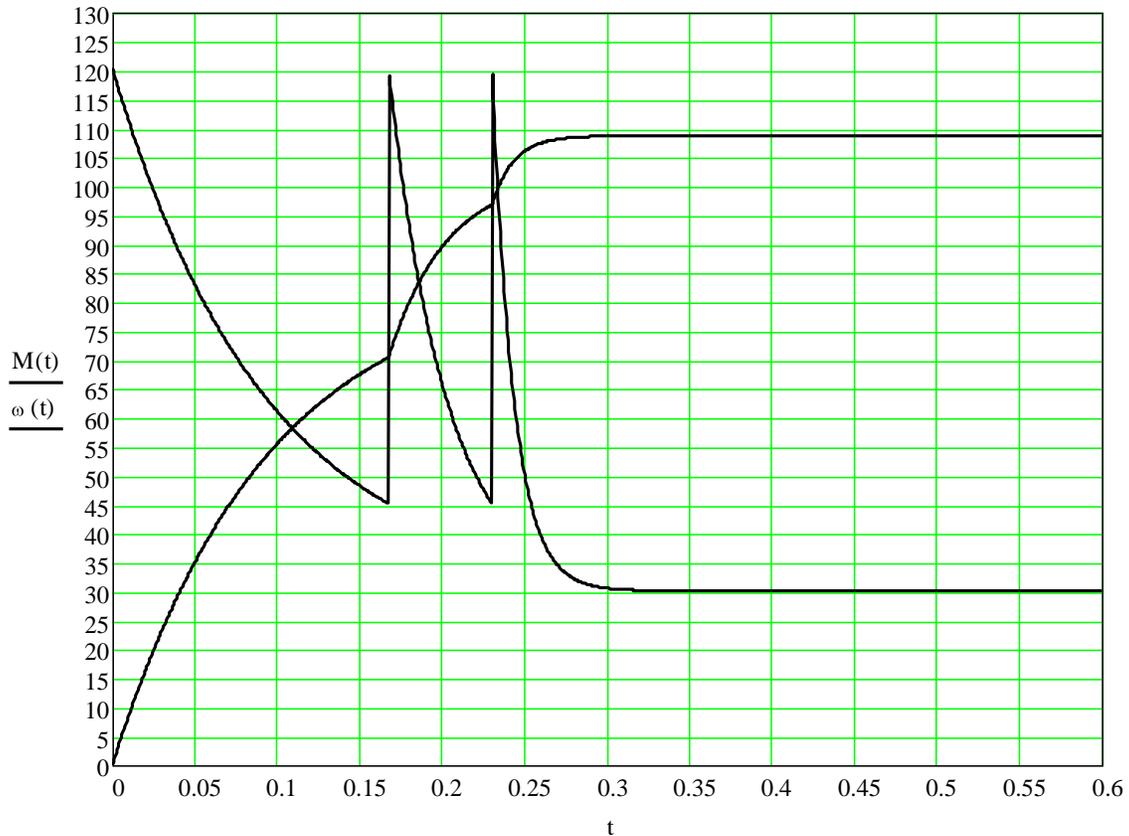


Рисунок 4.18. График переходного процесса по скорости и моменту

### 4.2.3. Разработка схемы управления электропривода

Автоматизация процесса пуска двигателя значительно облегчает управление электроприводами, предотвращает возможные ошибки при пуске двигателя и ведет к повышению производительности механизмов.

На рис. 4.19. приведены графики переходных процессов скорости и тока при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени пусковых сопротивлений.

Анализ этих графиков показывает, что автоматическое выключение пусковых сопротивлений должно производиться в определенные моменты времени ( $t_1$  и  $t_2$ ), при определенных скоростях ( $\omega_{п1}$  и  $\omega_{п2}$ ) и определенном токе  $I_{пер}$ . Очевидно, что управление пуском двигателя может осуществляться по принципам времени, скорости и тока.

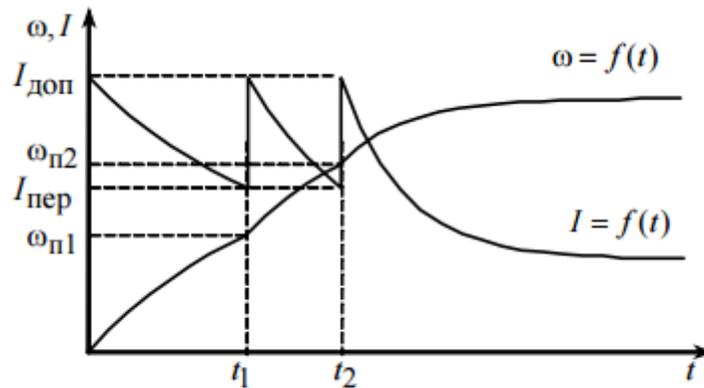


Рис. 4.19. Графики переходных процессов скорости и тока при пуске двигателя постоянного тока в две ступени

*Принцип времени* предполагает, что в электрической схеме имеются контролирующие время аппараты, которые в заданные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  формируют сигналы на закорачивание пусковых сопротивлений  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  (см. рис. 4.11.).

*Принципы скорости и тока* предполагают, что электрическая схема электропривода автоматически контролирует соответственно скорость двигателя и его ток и при заданных значениях переменных формирует сигналы на закорачивание пусковых сопротивлений.

Кроме этих трех принципов управления, на практике получило распространение управление по принципу пути, мощности, счета операций и т. д.

В релейно-контакторных электроприводах наиболее распространенными датчиками времени, скорости и тока являются соответствующие реле или контакторы. Так, наиболее распространенным датчиком времени является реле времени, в качестве датчика тока чаще всего используют реле тока, обмотка которого непосредственно включается в якорную цепь двигателя. Датчиком скорости в релейно-контакторных схемах управления электроприводами служит непосредственно сама обмотка якоря двигателя, ЭДС которой при постоянном потоке двигателя пропорциональна скорости вращения  $E = c \cdot \omega$ . Контролирующими же ЭДС двигателя аппаратами являются силовые контакторы.

#### **Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу скорости**

Типовая схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения по принципу скорости приведена на рис. 4.20.

Схема работает следующим образом. После подачи напряжения на схему силовых цепей двигателя запитывается обмотка возбуждения LM. Пуск происходит при полном потоке двигателя Фн.

При нажатии кнопки SB1 получает питание обмотка контактора КМ, он срабатывает и самоблокируется, т.е. параллельно кнопке SB1 замыкается вспомогательный контакт КМ. Кроме того, замыкается силовой контакт КМ в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгоняться по первой пусковой характеристике (см. рис. 4.20) с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

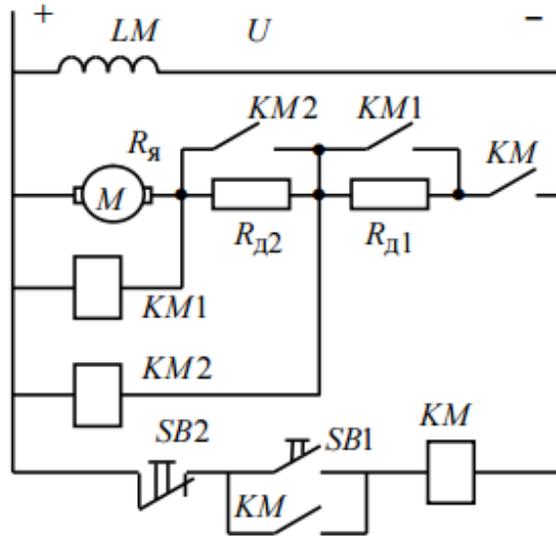


Рис. 4.20. Схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с управлением по принципу скорости

По мере разгона двигателя растет ЭДС обмотки якоря и соответственно увеличивается напряжение на контакторах КМ1 и КМ2. При достижении двигателем скорости  $\omega_{п1}$  значение ЭДС на контакторе КМ1 становится достаточным для его срабатывания  $U_{ср.КМ1} = c\omega_{п1} + I_{пер}R_{я}$  и контактор КМ1 притягивает свой якорь. Замыкается контакт КМ1, шунтирующий резистор  $R_{д1}$ , и двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 2 (рис. 4.12). При скорости  $\omega_{п2}$  напряжение на контакторе КМ2, равное  $U_{ср.КМ2} = c\omega_{п2} + I_{пер}(R_{я} + R_{д2})$  становится достаточным для его срабатывания. Контакт КМ2 притягивает свой якорь, замыкается контакт КМ2, шунтирующий резистор  $R_{д2}$ , двигатель переходит на естественную характеристику и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{уе}$ , определяемой нагрузкой с  $I_c (M_c)$ .

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку SB2 «Стоп». Контакт КМ потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя в данном случае происходит выбегом, т. е. за счет потерь в подшипниках двигателя, в кинематике производственного механизма, на вентиляцию в двигателе.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  при пуске двигателя приведены на рис. 4.19.

Недостатки данной схемы заключаются в возможном перегорании пусковых резисторов при застревании двигателя на пусковой характеристике при увеличении нагрузки более  $I_{\text{ПЕР}}$ , в неточном срабатывании контакторов при холодном и нагретом состояниях катушек, а также в том, что случайное увеличение напряжения сети во время пуска вызывает увеличение тока якоря.

#### ***Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу времени***

Схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения по принципу времени приведена на рис. 4.21.

После подачи напряжения на схему силовых цепей запитывается обмотка возбуждения двигателя LM. Пуск происходит при полном потоке двигателя  $\Phi_H$ . Через размыкающий контакт контактора KM получает питание обмотка реле времени KT1. Реле KT1, включившись, разрывает своим размыкающим контактом KT1 цепи питания контакторов KM1 и KM 2. Схема подготовлена к пуску двигателя.

При нажатии кнопки SB1 получает питание обмотка контактора KM, он срабатывает, самоблокируется и замыкает свой вспомогательный контакт KM в цепи питания контакторов KM1 и KM2, однако они не включаются, т.к. разорвана цепь их питания размыкающим контактом реле времени KT1. Замыкается силовой контакт KM в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгон по первой пусковой (реостатной) характеристике – 1 (см. рис. 4.12.) с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

От падения напряжения на резисторе  $R_{д1}$  включается реле времени KT2 и размыкает свой размыкающий контакт KT2 в цепи питания контактора KM2. Кроме того, размыкающий контакт KM разрывает цепь питания реле времени KT1 и оно начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по первой пусковой характеристике (см. рис. 4.12 и рис. 4.19).

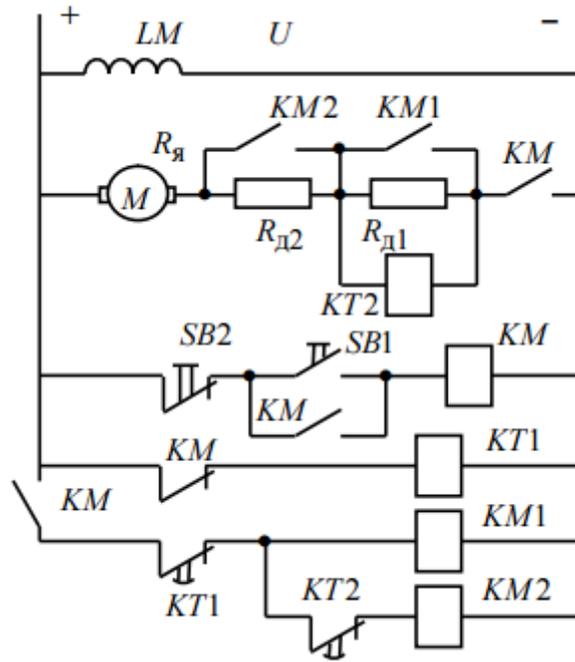


Рис. 4.21. Схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с управлением по принципу времени

По истечении времени  $t_1$  размыкающий контакт реле времени  $KT1$  замыкается. Получает питание катушка контактора  $KM1$ , он, включившись, своим замыкающим контактом  $KM1$  шунтирует первое пусковое сопротивление  $R_{д1}$ . Двигатель переходит на вторую пусковую (реостатную) характеристику– 2 (см. рис. 4.12.), теряет питание реле времени  $KT2$  и своим размыкающим контактом  $KT2$  начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по второй пусковой характеристике. По истечении этой выдержки времени, в момент времени  $t_2$  (см. рис. 4.12.), размыкающий контакт  $KT2$  замыкается. Получает питание обмотка контактора  $KM2$ , замыкается контакт  $KM2$ , шунтирующий резистор  $R_{д2}$ , двигатель переходит на естественную характеристику (см. рис. 4.12.) и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{ye}$  определяемой нагрузкой  $I_c$  ( $M_c$ ).

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку  $SB2$  «Стоп». Контактор  $KM$  потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя происходит выбегом.

Достоинством схемы управления, осуществляющей пуск двигателя в функции времени, является отсутствие опасности застревания двигателя на пусковых характеристиках. Простота и надежность в работе, также как и возможность применения одноступенчатых реле времени, привели к широкому применению электроприводов, управляемых в функции времени.

Выбор принципа автоматизации управления процессами пуска, торможения и регулирования скорости в релейно-контакторных системах управления электроприводами определяется особенностями их работы и условиями эксплуатации. Приведенные на рис. 4.20. и рис. 4.21. принципиальные схемы управления процессами пуска электроприводов постоянного тока разработаны для идеального электропривода. В реальном электроприводе изменяется нагрузка на валу электродвигателя, температура окружающей среды и элементов электропривода, моменты инерции механизма, напряжение питания и другие параметры (давление, влажность и т. д.). Изменение этих параметров необходимо учитывать при разработке системы управления электроприводом и ее защиты.

При разработке схемы управления двигателем принять во внимание необходимость осуществления пуска в две ступени и динамического торможения. Схема должна обеспечить реверс и защиту от перегрузки (если она необходима), нулевую защиту, защиту от коротких замыканий и сигнализацию, необходимую для безопасной эксплуатации электропривода. При разработке схемы и выборе аппаратов управления, коммутации и сигнализации учитывать условия эксплуатации электропривода и рекомендации в [12]. Принципиальная схема управления должна иметь обозначения в соответствии с ГОСТами [10] и перечень элементов. В качестве приложения к пояснительной записке привести технические данные для выбранных управляющих, сигнальных и коммутационных аппаратов.

### **4.3. Оформление пояснительной записки**

Пояснительная записка выполняется с применением текстового редактора WORD и печатается на принтере или рукописно синими или черными чернилами (пастой), грамотно, аккуратно, без исправлений на листах белой бумаги формата А4. В записке в соответствии с содержанием приводятся расчеты и графики, таблицы, кинематические и принципиальные схемы, перечень элементов. Оформление записки производится в соответствии с действующими ГОСТами [10.] На титульном листе записки (см. приложение П4) указываются: кафедра, вариант задания, фамилия инициалы студента, группа, фамилия инициалы преподавателя. Вторым листом пояснительной записки является лист задания на курсовой проект (приложение П3). В задании указывается полное название темы курсового проекта, например: «Электропривод механизма подъема заслонки печи». В пункте исходных данных приводятся таблица данных из приложения 1 и кинематическая схема в соответствии с вариантом личного задания студента. Задание оформляется на двух листах формата А4.

### **4.4. Оформление графической части проекта**

Графическая часть проекта – 2 чертежа - выполняются карандашом или с использованием принтера на листах формата А3. На одном листе должны быть представлена принципиальная электрическая схема электропривода и перечень элементов. Перечень элементов допускается выполнить на листе формата А4 и

вставить в пояснительную записку. На втором листе: нагрузочная диаграмма электропривода, пусковая диаграмма и графики переходных процессов. Чертежи должны строго соответствовать действующим ГОСТам [10], при их выполнении следует пользоваться методическими указаниями по применению ГОСТов ЕСКД в курсовом и дипломном проектировании. Пример оформления перечня элементов приведен в приложении П5.

### **Библиографический список**

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов,- М.: Академия; 2007.- 368с.
2. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов. – М.: Академия. 2006. -288с.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода.: Учебник для вузов.- М.: Энергоиздат, 1981.-576с.
4. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т.1 Под. ред. Орлова И.И. Изд-во МЭИ, 1998.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. — М.: Энергоиздат, 1982. — 504 с.
6. Яуре А.Г. Крановый электропривод. Справочник.- 1988, 344 с.
7. Справочник по электрическим машинам. Под ред. Копылова И.П. 1988.
8. Усатенко С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД. Справочник. 1989.
9. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 288 с.
10. Правила выполнения схем. ЕСКД. ГОСТ 2.701-84, ГОСТ 2.702-75, ГОСТ 2.703-68, ГОСТ 2.709-72, ГОСТ 2.710-81.
11. Безопасность машин. Электрооборудование машин и механизмов. Ч.1 Общие требования. ГОСТ Р МЭК 60204-1-99.
12. Правила устройства электроустановок. Раздел 1. Общие правила. Главы 1.1, 1.2, 1.7, 1.9. Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. Издание седьмое. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002,-184с.
13. Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи. ГОСТ Р МЭК 61140-2000. М.: - Госстандарт России.

## Исходные данные

Таблица П1.1

Вариант	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-25
Рисунки	рис. П1.2	рис. П1.3	рис. П1.4	рис. П1.5	рис. П1.6	рис. П1.7	рис. П1.8	рис. П1.9
Таблицы данных	табл. П1.2	табл. П1.3	табл. П1.4	табл. П1.5	табл. П1.6	табл. П1.7	табл. П1.8	табл. П1.9

Номера рисунков кинематических схем и таблиц с данными для расчетов приведены в табл. П1.2...П1.9 в соответствии с номерами вариантов.

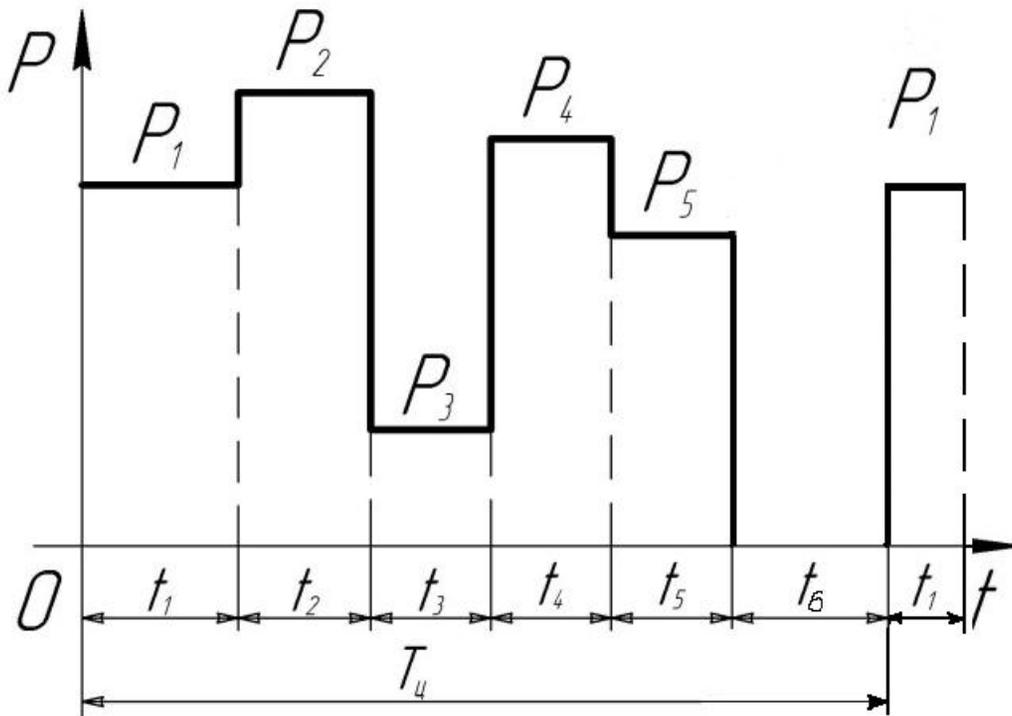


Рис. П1.1. График нагрузки привода

## Исходные данные

Таблица П1.2

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
1	2ПН180М	5,6	750	0,6	0,2	0	1,1	0	100	0	100	0	120	280
2	2ПН160L	4,0	750	1,1	0	1,2	0,4	0,4	480	30	10	30	0	50
3	2ПН200М	8,5	750	0,8	0	0	0	0	600	0	0	0	0	0

Таблица П1.3

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
4	2ПН112М	1,6	750	1,2	0	1,2	0,6	0,2	200	40	60	30	20	250
5	2ПН132L	1,9	750	0,9	0,6	0,8	1,2	0,6	100	20	100	100	20	260
6	2ПН132М	2,5	1000	1,2	0,4	0	0	1,2	300	40	180	20	10	50

Таблица П1.4

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
7	2ПН112L	1,25	1060	1,2	0,4	1,0	0	0	300	10	140	20	20	110
8	2ПН180L	7,1	750	1,2	0,3	1,0	0,8	0	200	60	60	100	40	140
9	2ПН180L	10	1000	1,2	0,2	1,1	0,6	0,2	200	40	60	120	20	160

Таблица П1.5

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
10	2ПН132М	10,5	3000	1,2	0,4	1,0	0,8	0,4	200	40	60	180	20	280
11	2ПН180М	8,0	870	0,9	0	1,2	0,8	0,6	80	60	40	220	40	50
12	2ПН225L	18,5	750	0,9	0,2	1,1	0,6	0,2	100	20	80	300	20	0

Таблица П1.6

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
13	2ПН132М	4,0	1500	1,1	0,4	0,7	0,8	0,4	150	40	20	190	20	180
14	2ПН200L	11	750	0,9	0	1,1	0,9	0,1	180	60	0	140	0	220
15	2ПН225М	150	750	1,1	0,5	1,2	0,9	0,5	200	0	100	160	0	140

Таблица П1.7

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
16	2ПН160L	6,3	1000	1,0	0	0,6	1,2	0,3	80	40	100	40	0	340
17	2ПН200М	13	1120	0,9	0,5	0,9	1,2	0	200	20	80	20	40	240
18	2ПН132L	5,5	1500	1,0	0,3	0,2	1,1	0	100	20	80	100	20	280

Таблица П1.8

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
19	2ПН160М	4,5	950	1,1	0	1,2	1,0	0,4	180	40	0	180	40	160
20	2ПН200L	16,0	1000	1,0	0,2	1,2	0,8	1,2	220	40	40	10	40	250
21	2ПН250М	22,0	750	1,1	0,3	1,1	1,2	0	200	60	20	160	20	140

Таблица П1.9

Вариант	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$M_1/M_H$	$M_2/M_H$	$M_3/M_H$	$M_4/M_H$	$M_5/M_H$	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$t_6$ , с
22	2ПН160М	8,0	1500	0,9	0,4	1,1	0	0	180	40	40	240	30	70
23	2ПН160L	11,0	1500	1,2	0,2	0,9	1,0	0,4	300	20	20	100	0	160
24	2ПН225М	22,0	1000	1,1	0,3	1,1	1,0	0,3	100	30	70	150	20	230
25	2ПН160L	30	1060	1,1	0,2	1,0	1,1	0	100	40	60	100	0	300

Напряжение питания для всех двигателей постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением 220В.  
 $t_6$  – время паузы. В течение этого времени двигателя отключен от сети. Период повторения нагрузки 600 сек.

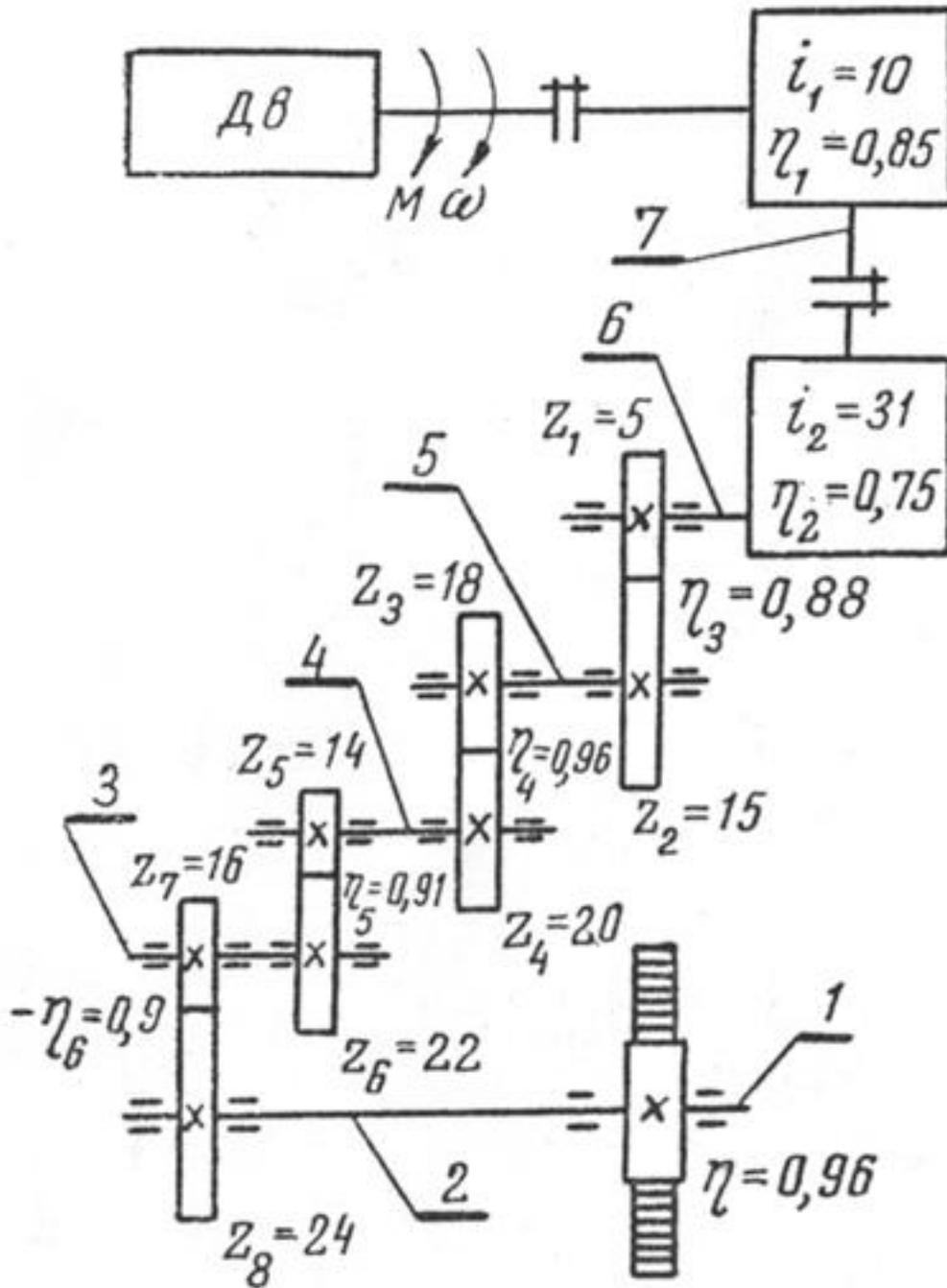


Рис. П1.2. Кинематическая схема механизма перемещения электрода дуговой сталеплавильной печи

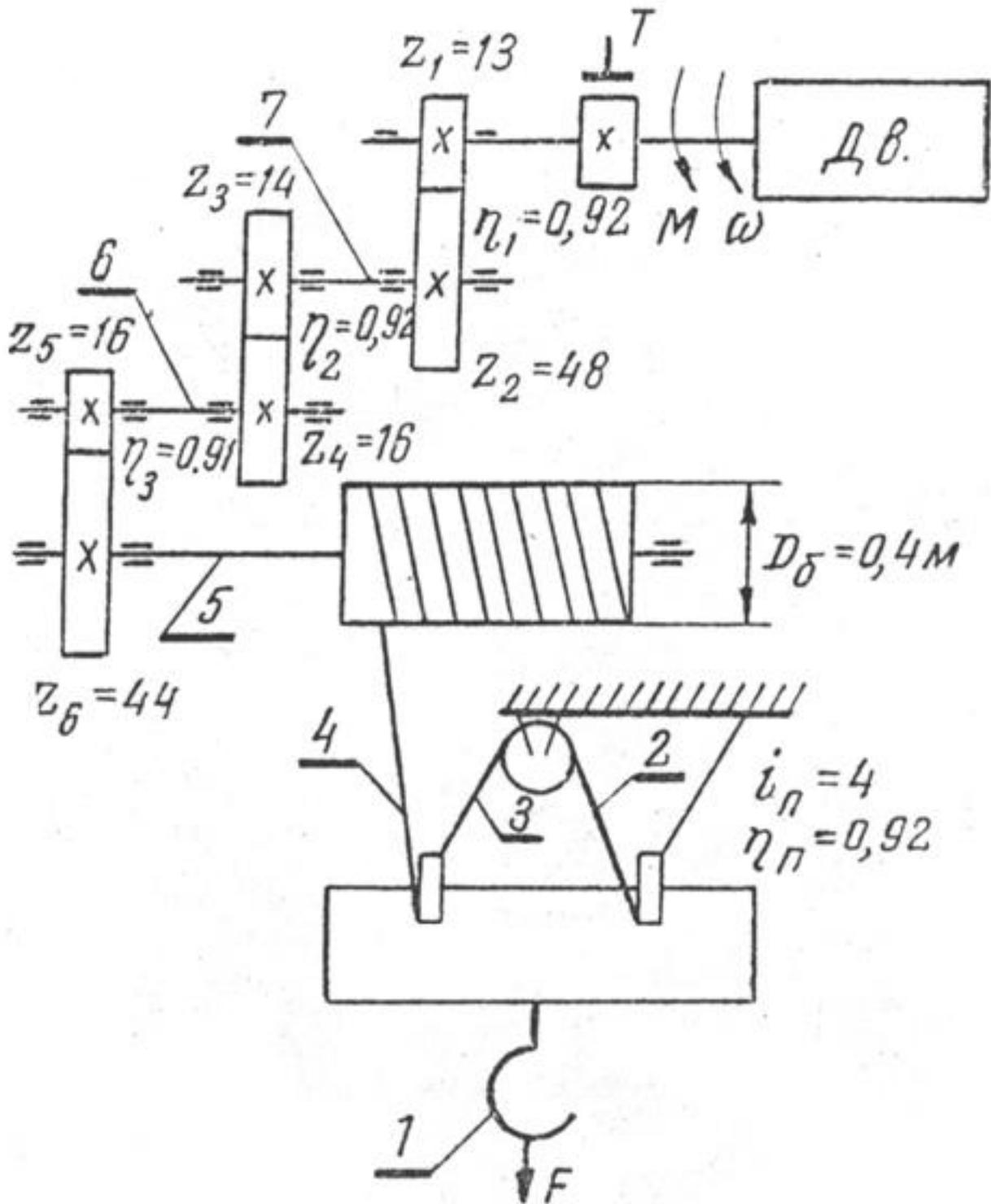


Рис. П1.3 Кинематическая схема механизма загрузочного устройства

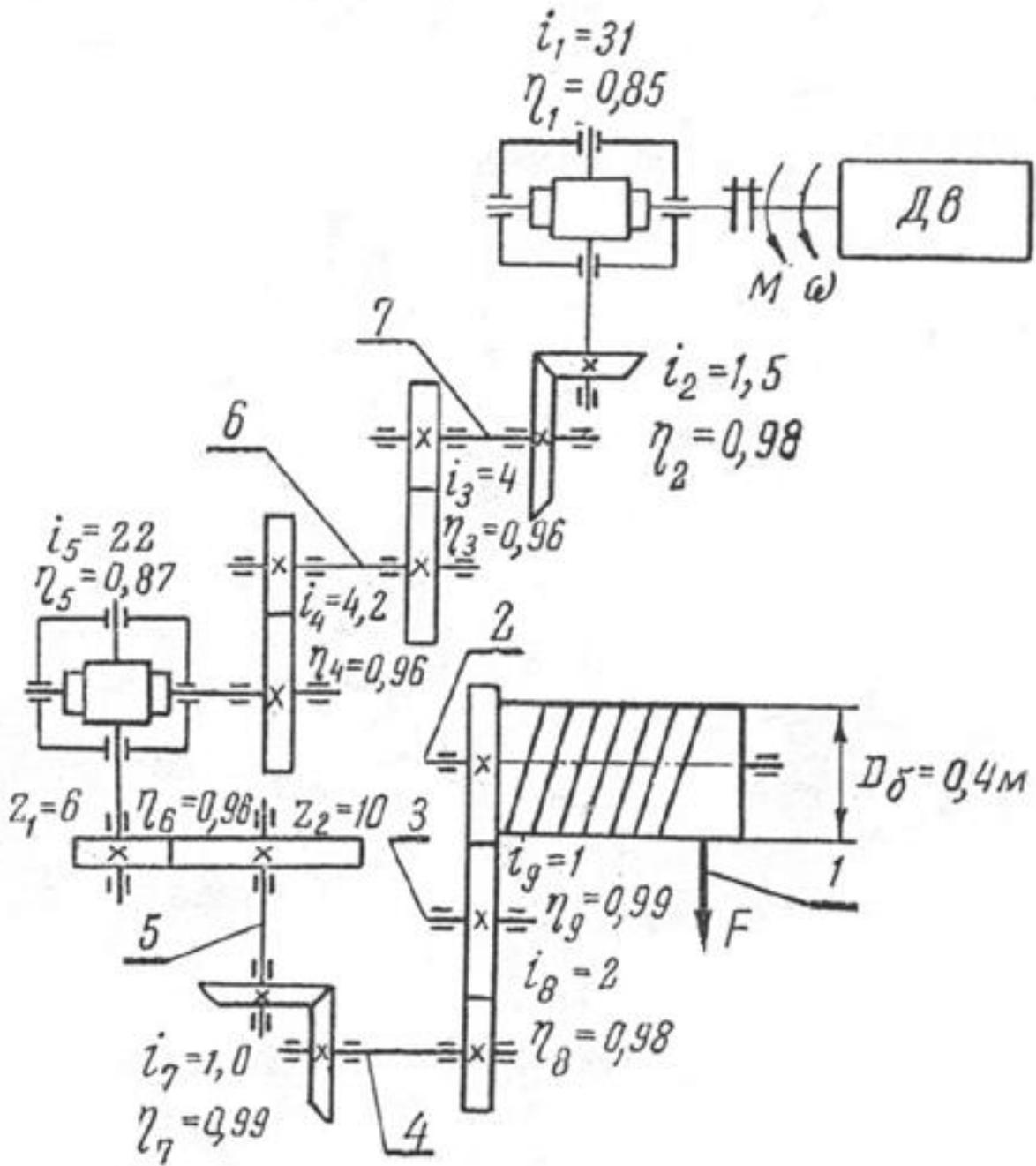


Рис. П1.4. Кинематическая схема механизма подъема заслонки печи.

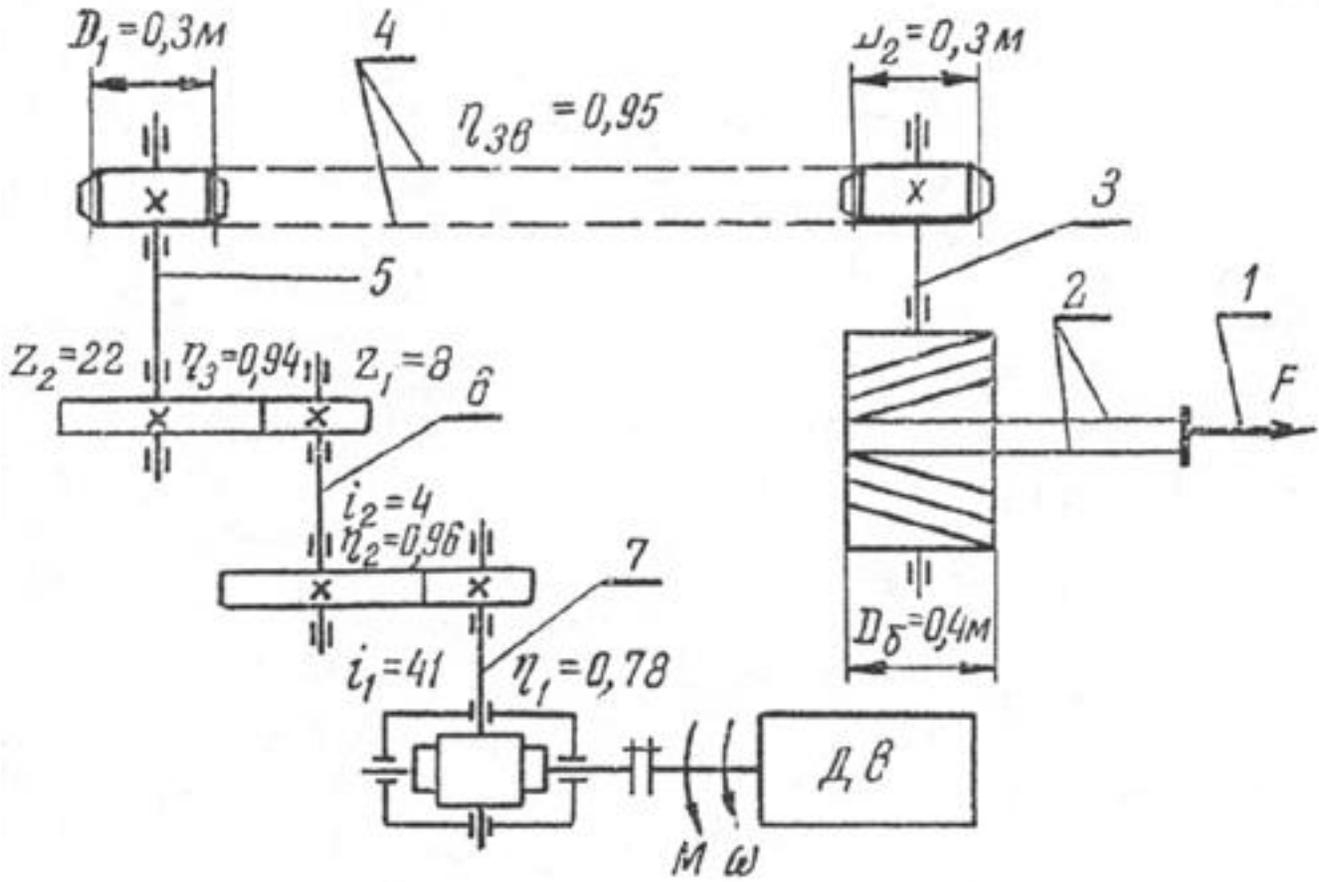


Рис. П1.5 Кинематическая схема механизма наклона тигля печи.

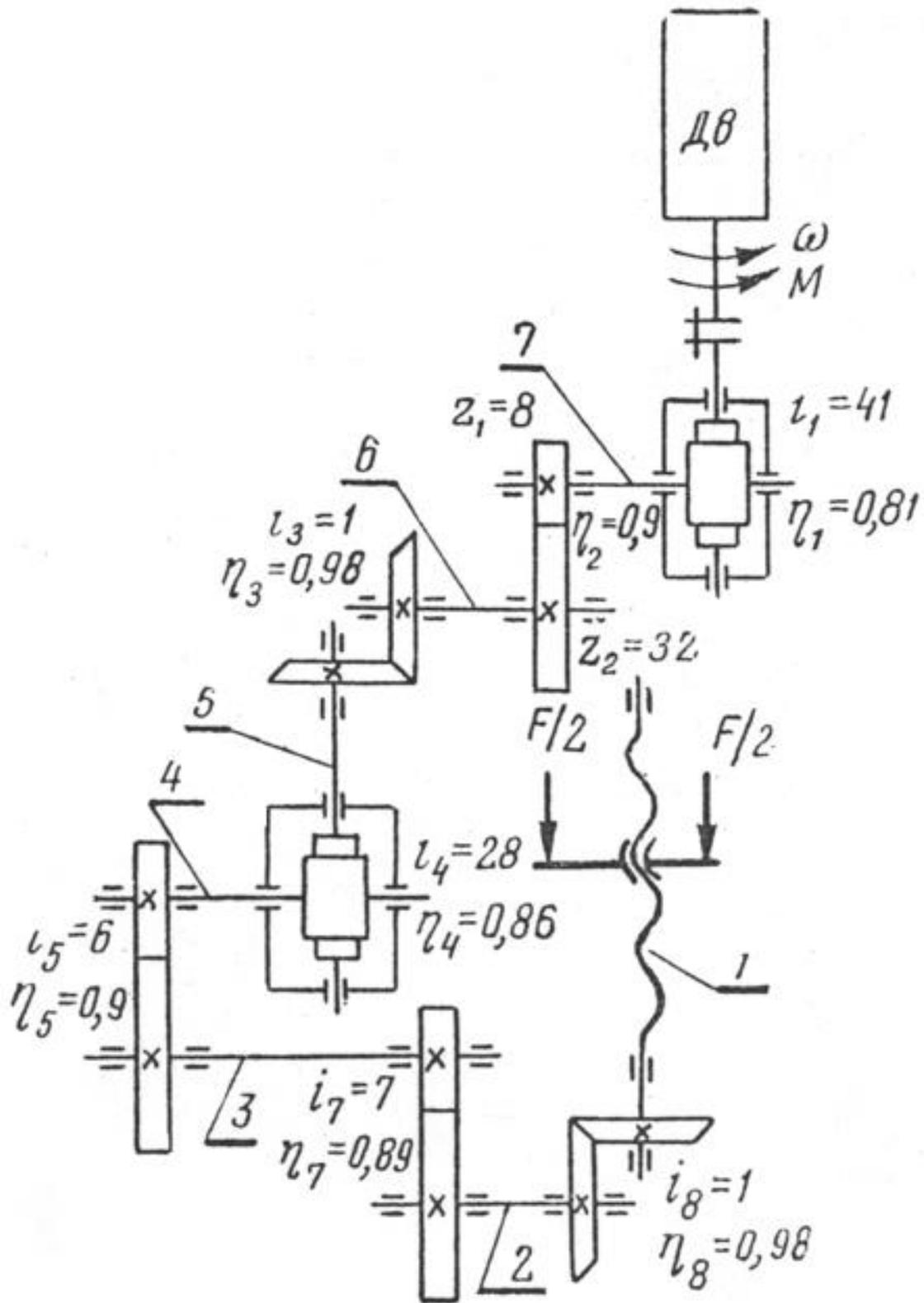


Рис. П1.6. Кинематическая схема механизмов вытяжки слитков в электропечи сопротивления.

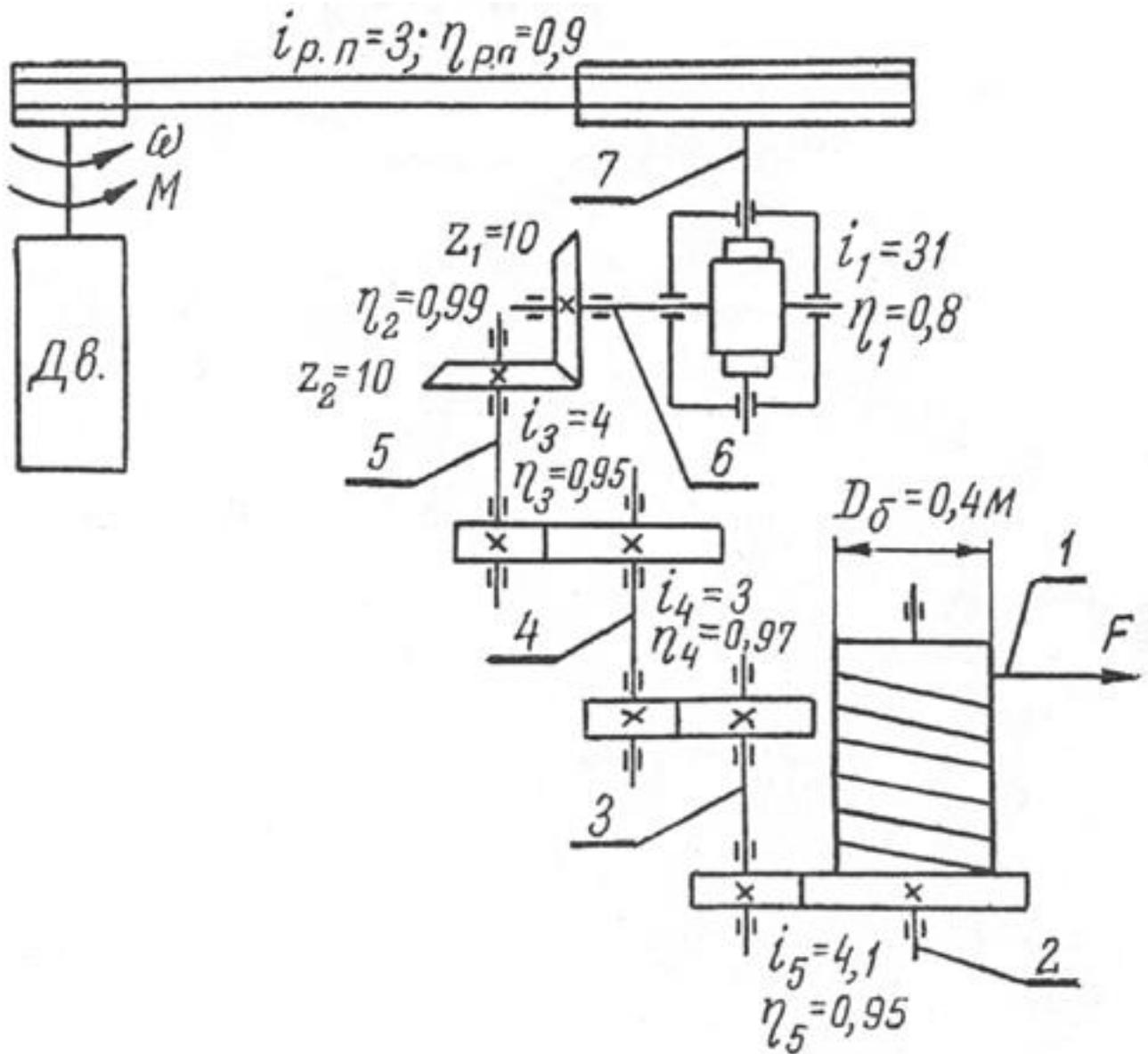


Рис. П1.7. Кинематическая схема механизма перемещения тележки крана

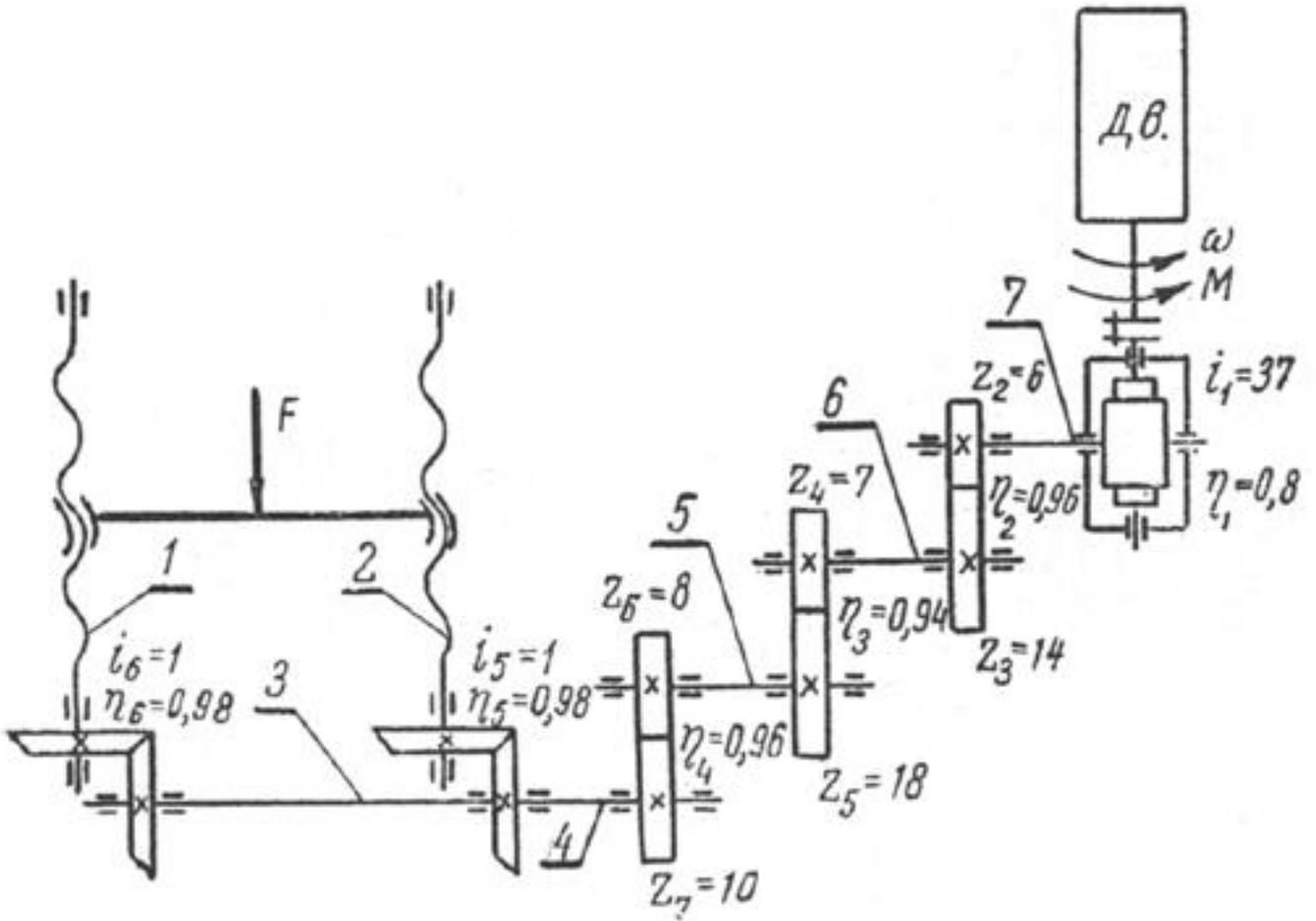


Рис. П1.8. Кинематическая схема механизма перемещения электрода электродуговой печи.

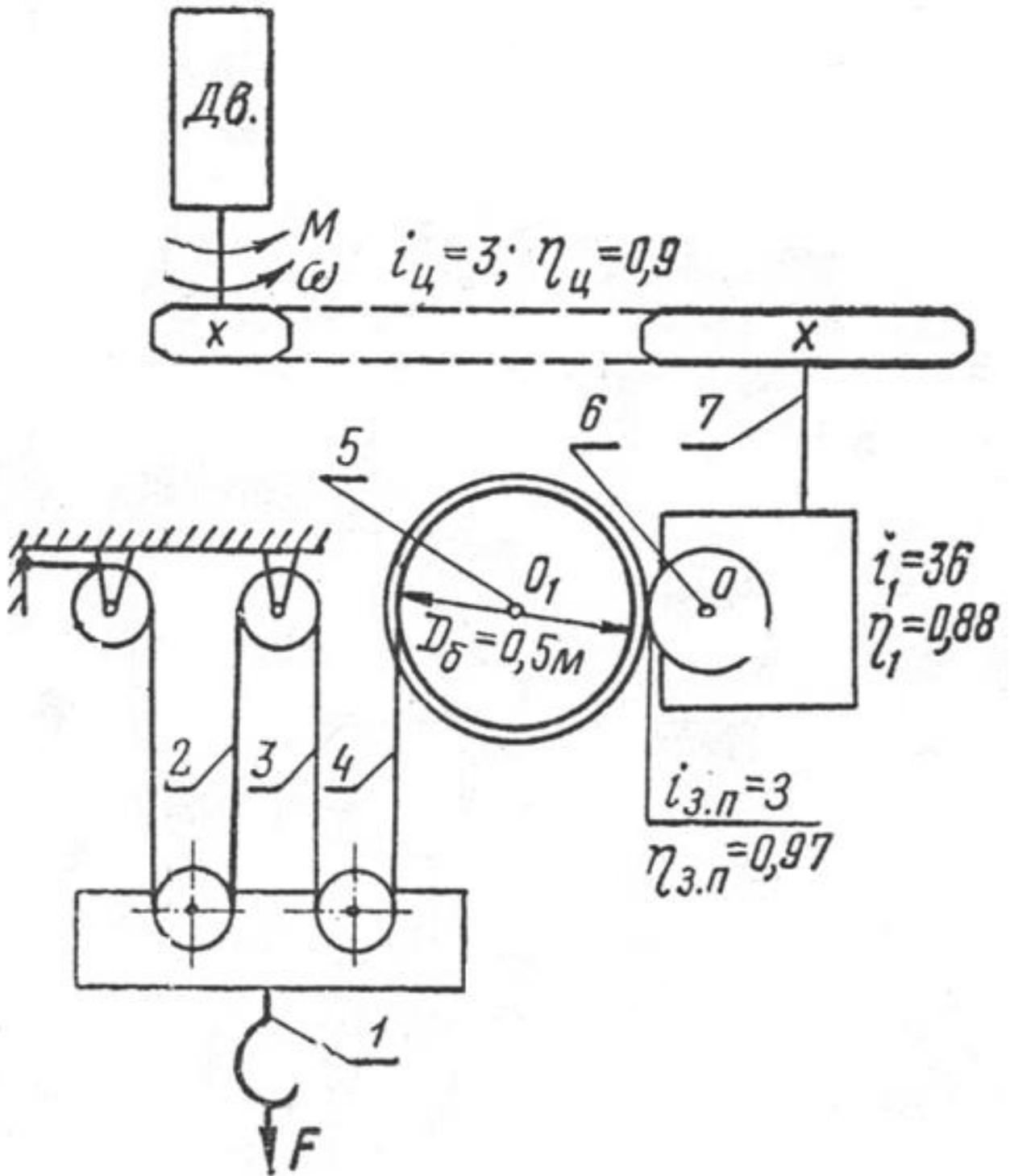


Рис. П1.9. Кинематическая схема механизма подъема колпака печи.

Технические данные двигателей постоянного тока для  $PV_{CT}=100\%$ 

Тип двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	
			номинальная	максимальная
2ПН112L	1.25	220	1000	3500
2ПН112M	1.5	220	1500	4000
2ПН132L	1.9	220	750	2500
2ПН132L	5.5	220	1500	4000
2ПН132M	2.5	220	1000	3000
2ПН132M	4.0	220	1500	4000
2ПН132M	10.5	220	3000	4000
2ПН160L	4.2	220	800	2500
2ПН160L	6.3	220	1000	3000
2ПН160L	11	220	1500	4000
2ПН160M	4.5	220	1000	3000
2ПН160M	7.5	220	1500	4000
2ПН180L	7,1	220	750	2500
2ПН180L	10	220	1000	3500
2ПН180M	5,6	220	750	2500
2ПН180M	8	220	1060	3000
2ПН200L	11	220	750	2500
2ПН200L	16	220	1000	3000
2ПН200M	8,5	220	750	2500
2ПН200M	13	220	1120	3000
2ПН225L	18,5	220	750	2500
2ПН225L	30	220	1060	2500
2ПН225M	15	220	750	2500
2ПН225M	22	220	1000	2500
2ПН250M	22	220	750	2000

Продолжение таблицы П2.1

Тип двигателя	КПД, %	Сопротивление обмотки при 15 <sup>0</sup> С, Ом			Момент инерции J <sub>ДВ</sub> , Кг·м <sup>2</sup>
		якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
2ПН112L	68	2.34	2.04	202	0.018
2ПН112M	70	1.77	1.55	181	0,015
2ПН132L	72	1.28	1	138	0.048
2ПН132L	80.5	0.322	0.27	101	0,048
2ПН132M	73.5	1.08	0.763	134	0.038
2ПН132M	79	0.564	0.366	134	0.038
2ПН132M	84	0.14	0.336	111	0.038
2ПН160L	78.5	0.486	0.389	117	0.1
2ПН160L	81.5	0.278	0.196	87,6	0.1
2ПН160L	85.5	0.096	0.073	65.3	0.1
2ПН160M	79.5	0.411	0.304	108	0.083
2ПН160M	83	0.183	0.135	82	0.083
2ПН180L	79	0,26	0,183	64	0,229
2ПН180L	82,5	0,042	0,03	72,5	0,23
2ПН180M	79	0,338	0/221	74.8	0,2
2ПН180M	83	0,181	0,122	74.8	0,2
2ПН200L	86	0,083	0,053	55	0,3
2ПН200L	86	0,083	0,053	55	0,3
2ПН200M	82	0,188	0,116	61,6	0,25
2ПН200M	85	0,106	0,061	61,6	0,25
2ПН225L	83	0.095	0,05	52,3	0,6
2ПН225L	84,5	0,049	0,0197	38,6	0,6
2ПН225M	80,5	0,146	0,0637	62,25	0,525
2ПН225M	82,3	0,086	0,0429	62,6	0,525
2ПН250M	81	0,074	0,039	37.9	1,05

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное  
 учреждение высшего образования  
 «Тульский государственный университет»

Кафедра электротехники и электрооборудования

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ  
 по курсу «Электрический привод»

Студент \_\_\_\_\_ Группа

1. Тема проекта: электропривод механизма...
2. Исходные данные к курсовой работе: \_\_\_\_\_
3. На основе исходных данных:
  - Рассчитать и построить график статической нагрузки на выходном валу или поступательно движущемся элементе кинематической схемы механизма.
  - Проверить двигатель по условиям нагрева.
  - Рассчитать и построить естественные механическую и электромеханическую характеристики двигателя  $\omega = f(M)$ ,  $\omega = f(I)$ .
  - Построить диаграмму реостатного пуска двигателя в две ступени и рассчитать значения сопротивлений пусковых и тормозного резисторов.
  - Рассчитать и построить графики переходных процессов пуска двигателя в две ступени при  $M_c = 0,5 M_{ном}$
  - Разработать схему пуска, реверса и торможения двигателя. Выбрать аппаратуру для схемы управления приводом. Составить перечень элементов.

Руководитель \_\_\_\_\_  
 должность                      подпись                      фамилия и инициалы  
 « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г

Студент \_\_\_\_\_  
 подпись                      фамилия и инициалы  
 « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г

**Министерство образования и науки РФ**  
**Государственное образовательное учреждение высшего образования**  
**Тульский государственный университет**

**ИНСТИТУТ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ им. В.П. ГРЯЗЕВА**

**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**  
по дисциплине «Электрический привод»

Студент \_\_\_\_\_  
Группа \_\_\_\_\_  
Вариант \_\_\_\_\_

Руководитель \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Члены комиссии: \_\_\_\_\_

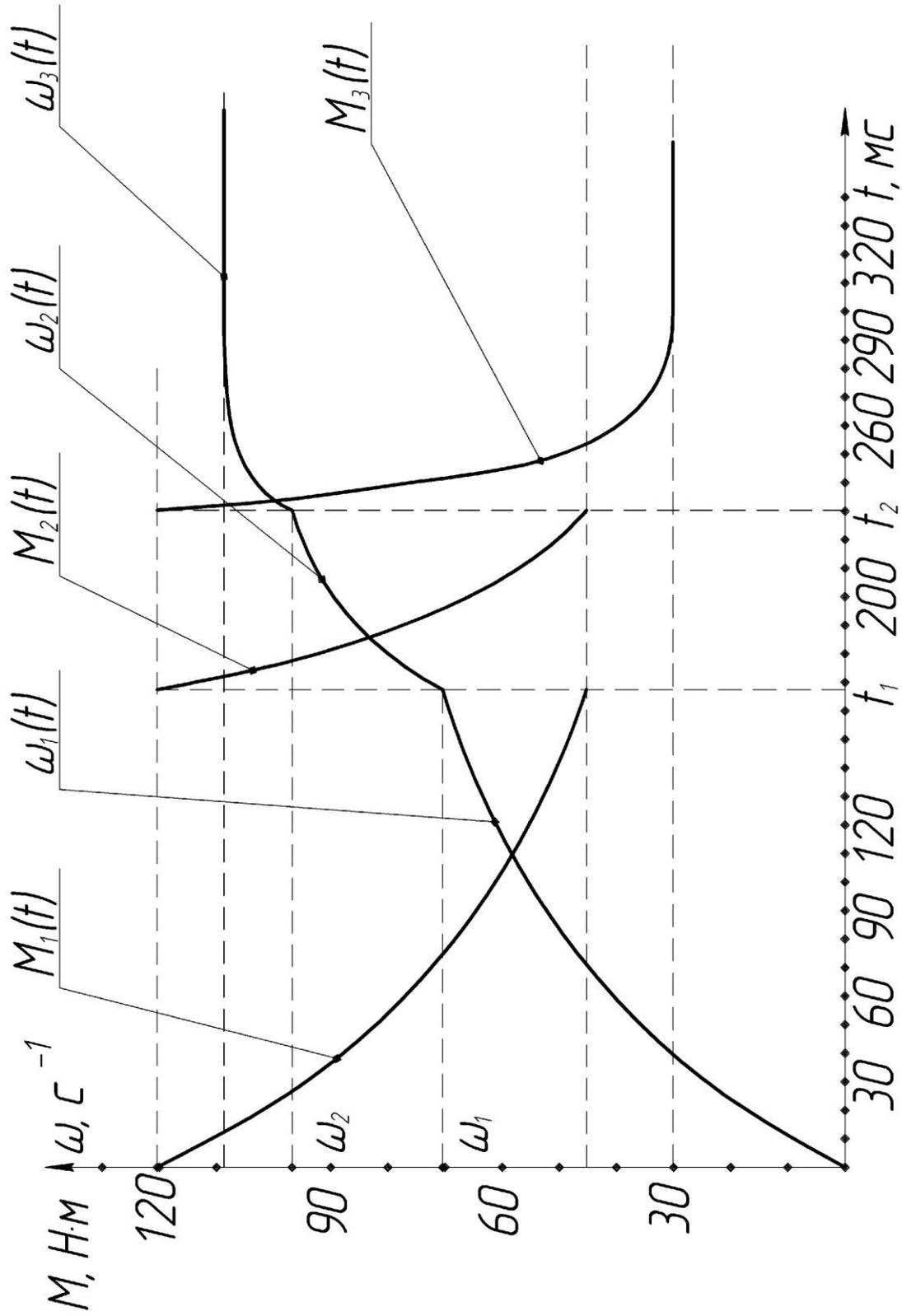
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Тула 20\_\_.

## Приложение П5

## Пример оформления перечня элементов к схеме управления привода

		Поз. Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание								
		FU1, FU2,	Предохранитель плавкий ПН2-100	4	Ипл.вк=30 А, Ипр.вк.=1,3Iном								
		FU3, FU4											
		HL1, HL2,	Лампа сигнальная В-15Г	3	U=110 В								
		HL3, HL4											
		KBR	Реле угловой скорости РС-2М	1	U=110 В								
		KM1, KM4	Контактор КГД 111-Т	2	U=110 В, Iном=75 А, Iдоп=20 А, 2сз+3з+1р								
		KM2	Контактор КГД 111-Т	1	U=110 В, Iном=40 А, Iдоп=20 А, 1сз+2з								
		KM3	Контактор КГД 111	1	U=110 В, Iном=75 А, Iдоп=20 А, 1сз+1з+1р								
		KM5	Контактор КМ27221-14	1	U=110 В, Iном=40 А, Iдоп=20 А, 2сз+2ср+1з								
		KT1, KT2	Реле времени ЭВ100	2	U=110 В, t=0,1 сек								
		KV	Реле напряжения РЭВ-821	1	U=110 В, Iоклт=2,5 А Iвкл=17 А, 1з+1р								
		M	Двигатель постоянного тока 2ПН112L	1	U=110 В, P=1250 Вт								
		QF1, QF2	Выключатель автоматический А63	2	U=110 В, Iрасцеп.=25 А, Iотп.=1,3Iн								
		R1.1, R2.1	Резистор ЛФ11	2	R=2,0 Ом, Iдлит.доп.=310-540 А								
		R1.2, R2.2	Резистор СЖ66	2	R=0,06 Ом, Iдлит.доп.=72 А								
		SB1	Выключатель кнопочный КЕ011	1	U=110 В, плафон-черн. надпись "Вперед"								
		SB2	Выключатель кнопочный КЕ011	1	U=110 В, плафон-черн. надпись "Назад"								
		SB3	Выключатель кнопочный КЕ011	1	U=110 В, плафон-красн. надпись "Стоп"								
Согласовано		ЭТЭОКП.16.00.00.000 ПЭЗ											
		Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							
Инф. № подл.		Разраб.			Лит			Лист			Листов		
		Проб			Электропривод механизма _____								
		Н. контр			Перечень элементов схемы управления.								
		Утв			ТулГУ, гр. _____ каф. ЭТЭО								
					Формат А4								



Графики переходных процессов  $\omega(t)$  и  $M(t)$  при двухступенчатом пуске.

## Приложение П7

Пример программы решения уравнений для расчета переходных процессов в Mathcad. Во избежание конфликта обозначений внутри программы (конфликт между  $\omega_1(t)$  и  $\omega_1$  - они воспринимаются программой как одинаковые переменные), необходимо ввести для соответствующих величин новые обозначения:

$$\omega_{y1} := 84.49 \quad \omega_{y2} := 102.07 \quad \omega_{ye} := 108.69$$

$$\omega_{1p} := 70.41 \quad \omega_{2p} := 96.78 \quad M_c := 30.1 \quad M_{1p} := 120.4$$

$$T_{m1} := 0.09346 \quad T_{m2} := 0.03509 \quad T_{me} := 0.01318$$

$$t \geq 0$$

$$\omega_1(t) := \omega_{y1} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{m1}}} \right)$$

$$t_1 := -T_{m1} \cdot \ln \left( 1 - \frac{\omega_{1p}}{\omega_{y1}} \right) = 0.16747$$

$$\omega_2(t) := \omega_{y2} + (\omega_{1p} - \omega_{y2}) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_{m2}}}$$

$$t_2 := t_1 - T_{m2} \cdot \ln \left( \frac{\omega_{2p} - \omega_{y2}}{\omega_{1p} - \omega_{y2}} \right) = 0.23025$$

$$\omega_3(t) := \omega_{ye} + (\omega_{2p} - \omega_{ye}) \cdot e^{-\frac{t-t_2}{T_{me}}}$$

$$\omega(t) := \begin{cases} \omega_1(t) & \text{if } 0 \leq t \leq t_1 \\ \omega_2(t) & \text{if } t_1 < t \leq t_2 \\ \omega_3(t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_1(t) := M_c + (M_{1p} - M_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{m1}}}$$

$$M_2(t) := M_c + (M_{1p} - M_c) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_{m2}}}$$

$$M_3(t) := M_c + (M_{1p} - M_c) \cdot e^{-\frac{t-t_2}{T_{me}}}$$

$$M(t) := \begin{cases} M_1(t) & \text{if } 0 \leq t \leq t_1 \\ M_2(t) & \text{if } t_1 < t \leq t_2 \\ M_3(t) & \text{otherwise} \end{cases}$$