

Министерство образования Российской Федерации
Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Иркутская государственная сельскохозяйственная академия

Л.П. РЫЧКОВА

ЭЛЕКТРОПРИВОД.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Иркутск 2012

УДК 622.799.3(073)

Учебное пособие : «Электропривод. Примеры решения типовых задач» рекомендовано к изданию типографским способом научно-методическим советом Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. Протокол № 8 от 25 июня 2012 г.

Рецензенты :

Генеральный директор ООО «Системсервис»
Т.В. Крыжановский

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрооборудования и физики»
А.В. Рудых

Рычкова Л.П.

Электропривод. Примеры решения типовых задач. Издание 2-е, переработ. и доп. Учебное пособие : Иркутск: ИрГСХА, 2012.-112 с. предназначено для самостоятельной работы студентов энергетического факультета, специальности 110800.62 – электрооборудование и электротехнологии, для очной и заочной формы обучения.

Даны краткие теоретические сведения и решения типовых задач по четырём разделам : «Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором», «Асинхронный электродвигатель с фазным ротором», «Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения» и «Механика электропривода»

© Иркутская государственная сельскохозяйственная академия 2012

О Г Л А В Л Е Н И Е

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| 1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором..... | 6 |
| 1.1. Обозначение электродвигателей..... | 6 |
| 1.2. Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по 4-м точкам..... | 10 |
| 1.3. Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса при помощи ПК..... | 14 |
| 1.3.1. Мой компьютер..... | 14 |
| 1.3.2. Электронная таблица - EXCEL..... | 17 |
| 1.3.3. Уравнение Клосса..... | 24 |
| 2. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором..... | 31 |
| 2.1. Назначение электродвигателей..... | 31 |
| 2.2. Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором..... | 32 |
| 2.3. Определение количества и величины секций пускового резистора АД с фазным ротором..... | 39 |
| 3. Двигатель постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения..... | 49 |
| 3.1. Обозначение ДПТ серии 4П..... | 49 |
| 3.2. Основные формулы, используемые при решении задач..... | 50 |
| 3.3. Определение количества и величины секций пускового резистора ДПТ с независимым возбуждением..... | 57 |
| 4. Механика электропривода..... | 66 |

| | |
|---|----|
| 4.1. Статические и механические нагрузки..... | 66 |
| 4.2. Основное уравнение движения электропривода..... | 68 |
| 4.3. Приведение моментов сопротивления рабочей машины к валу электродвигателя..... | 69 |
| 4.4. Приведение моментов инерции рабочей машины к валу электродвигателя..... | 73 |
| 4.5. Расчёт времени пуска и торможения системы «электродвигатель-рабочая машина»..... | 79 |
| 4.6. Графоаналитический метод определения времени пуска системы «АД с к.з. ротором-вентилятор»..... | 85 |

П р и л о ж е н и я

| | |
|--|-----|
| Приложение А. Некоторые часто встречающиеся числа..... | 93 |
| Приложение Б. Приставки к обозначениям единиц..... | 93 |
| Приложение В. Единицы физических величин ГОСТ 8.417 – 81..... | 93 |
| Приложение Г. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ..... | 95 |
| Приложение Д. Основные технические данные электродвигателей серии АИ основного исполнения..... | 97 |
| Приложение Е. Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором..... | 103 |
| Приложение Ж. Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии 4П..... | 108 |
| Список литературы..... | 112 |

Введение

Для обеспечения растущих потребностей человечества созданы, продолжают разрабатываться и совершенствоваться сотни тысяч рабочих машин, производственных и бытовых механизмов, подъёмно-транспортных средств и т.д.

Для функционирования рабочих машин и механизмов к их исполнительным органам от привода должна быть подведена механическая энергия, за счёт которой и совершается их движение. Характер этого движения может быть разнообразным: вращательным однонаправленным и реверсивным, поступательным однонаправленным и реверсивным, а также возвратнопоступательным. Основное назначение приводного электродвигателя заключается в преобразовании электрической энергии, потребляемой им из сети, в механическую, отдаваемую через вал двигателя.

Механические характеристики электроприводов необходимы для выбора рационального электропривода. Правильное сочетание механических характеристик электропривода и рабочей машины - одно из неперемных условий высоких технико-экономических показателей работы производственного агрегата.

Механическими характеристиками электродвигателя называются зависимости частоты или скорости вращения от вращающего момента $n = f_1(M)$ или $\omega = f_2(M)$. Электромеханическими характеристиками электродвигателя называются зависимости частоты или скорости вращения от силы тока $n = f_3(I)$ или $\omega = f_4(I)$.

Эти характеристики называются естественными, если они получены при номинальных условиях питания (при номинальных напряжениях и частоте), номинальном возбуждении и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях ротора (или якоря) и статора. Характеристики двигателя называются искусственными при изменении любого из перечисленных выше факторов. Обычно при исследовании электроприводов механические характеристики изображают на графиках в виде функции $\omega = f(M)$. Однако в некоторых случаях (при теоретическом анализе механических характеристик) их изображают в виде функции $M = \varphi(\omega)$. При исследовании механических характеристик электродвигателей необходимо знать сопротивление их обмоток, а также значение вводимых в цепи обмоток пусковых, тормозных и других сопротивлений.

1 АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

1.1 Обозначение электродвигателей

Наиболее распространённой электрической машиной, применяемой для привода сельскохозяйственных машин и механизмов, является трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Это обусловлено сравнительно небольшой его стоимостью, простотой конструкции и высокой надёжностью в эксплуатации.

Асинхронные электродвигатели в целях упорядочения их шкал мощностей, скоростей и т. д. , а также унификации применения выпускаются сериями, как в основном исполнении, так и в различных модификациях, с учётом областей применения, климатических условий, степени защищённости и т. д.

Двигатели серии АИ - новая, разработанная совместно со странами Интерэлектро, унифицированная серия асинхронных двигателей, отвечающая перспективному уровню развития мирового электромашиностроения. Они предназначены для работы в зоне умеренного климата при температуре окружающей среды - $-45 \dots +40$ °С и относительной влажности воздуха до 80% при температуре $+20$ °С. По сравнению с двигателями серии 4АМ двигатели серии АИ имеют улучшенные энергетические показатели, снижен уровень шума, повышены надёжные показатели.

Структура условного обозначения :

А И X₁ X₂ X₃ X₄X₅X₆ X₇ X₈ X₉ X₁₀ X₁₁

А - асинхронный ;

И - унифицированная серия (Интерэлектро) ;

X₁ - привязка мощности к установочным размерам или обозначение специального исполнения; Р - привязка мощности к установочным размерам по РС3031 – 71, габариты и шкала мощностей соответствует двигателям серии 4АМ ; С - привязка в соответствии с нормами CENELEK, при этом мощности в тех же габаритах снижены на одну-две ступени по

сравнению с вариантом Р, предназначены только для поставок на экспорт. Отсутствие букв Р или С означает исполнение двигателя по варианту Р, М - взрывозащищённое исполнение; У - взрывозащищённое рудничное исполнение; Ф - с встроенным вентилятором для охлаждения двигателя;

- X₂** - буква - обозначение исполнения по виду защиты и охлаждения: закрытое с внешним обдувом корпуса со встроенным вентилятором (не указывается), Б – закрытое с естественным охлаждением, Н – защищённое, Л – открытое, В- встраиваемое, П – закрытое продуваемое;
- X₃** - буква - обозначение модификаций: С - с повышенным скольжением, Р- с повышенным пусковым моментом, Х – с регулируемой частотой вращения, Ф - с фазным ротором, У – однофазные с пусковым конденсатором, Е – однофазные с рабочим конденсатором, УЕ – однофазные с пусковым и рабочим конденсатором, Кр - для кратковременного режима работы.
- X₄** - габарит (высота оси вращения), мм;
- X₅** - установочный размер по длине станины : S, M, L ;
- X₆** - длина сердечника статора (А или В, отсутствие буквы означает только одну длину сердечника – первую);
- X₇** - число полюсов : 2, 4, 6, 8, 10, 12 (в многоскоростных число полюсов указывается через дробь - 2/4 ; 2/6 ; 4/6 ; 4/8 и др.);
- X₈** и **X₉** - дополнительные буквы для модификации двигателя (Б – со встроенной температурной защитой; П - с повышенной точностью по установочным размерам; Х2 - химически стойкие; С - сельскохозяйственные; УП – пылезащищённое исполнение; РЗ - для привода зубчатых редукторов; Ж - для моноблочных насосов; Е - с электромагнитным тормозом; ЕЭ - с электромагнитным тормозом для электроталей; Ф - фреоно-маслостойкие; Н - малошумные);
- X₁₀** - климатическое исполнение (У, УХЛ, Т);
- X₁₁** - категория размещения (1, 2, 3, 4, 5) по ГОСТ 15150 – 69.

Правильное обозначение модификаций и исполнений серии важно для автоматической системы управления производством (АСУП), а также для создания системы ведения чертёжного хозяйства как части общей системы автоматизированного проектирования (САПР).

Серия АИ содержит значительное количество модификаций и исполнений, поэтому задача выбора обозначений является весьма сложной. Для обозначения серии АИ принята структура, в которой можно выделить три вида обозначения : *базовое* , *основное* , *полное*.

Базовое обозначение - это сочетание элементов символов, определяющих серию АД, его мощность, частоту вращения (обозначение серии, вариант увязки мощности к установочным размерам, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и длина магнитопровода статора, число полюсов).

Например : АИР100М4 (серия АИ, увязка по варианту Р, высота оси вращения 100, длина корпуса по установочным размерам М, число полюсов 4).

Основное обозначение - это сочетание базового исполнения АД с видом защиты и охлаждения, с электрической и конструктивной модификацией, со специализированным исполнением и исполнением по условиям окружающей среды

Например : АИРБС100М4НПТ2 (АИР100М4 - базовое обозначение, Б - закрытое исполнение с естественным охлаждением без обдува, С - с повышенным скольжением , Н - малошумные, П - с повышенной точностью установочных размеров, Т - для тропического климата, 2 - категория размещения).

Полное обозначение - сочетание основного обозначения с дополнительными электрическими и конструктивными характеристиками.

Например : АИРБС100М4НПТТ2 220/380 В, 60 IM2181, КЗ-11-3, F100, (АИРБС100М4НПТ2 - основное обозначение, 220 / 380 В - напряжение, 60 - частота сети, IM2181 - исполнение по способу монтажа и по концу вала, КЗ-11-3 - исполнение выводного устройства и количество штуцеров, F100 - исполнение фланцевого щита).

Классификация конструктивных исполнений электрических машин *по способу монтажа* дана в Публикации МЭК 34-7 и ВСТ СЭВ 246-76. Согласно этим документам конструктивное исполнение электрической машины обозначается символом IM и четырьмя цифрами.

Условное обозначение конструктивного исполнения расшифровывается так :

IM X₁ X₂X₃ X₄

IM - буквенная часть обозначения ;

X₁ - первая цифра определяет группу конструктивных исполнений.

Серия АД Интерэлектро производится по трём группам исполнений (1 - на лапах, с подшипниковыми щитами; 2 - на лапах, с подшипниковыми щитами и с фланцем на подшипниковом щите или щитах; 3 - без лап, с подшипниковыми щитами и с фланцем на одном подшипниковом щите);

X₂X₃ - вторая и третья цифры обозначают способ монтажа.

Вторая цифра. Для группы IM1-0. Третья указывает на расположение вала двигателя в пространстве при монтаже. Для группы IM1 -третья цифра обозначает: 0 - вал горизонтальный, машина лапами вниз; 1- вал вертикальный, конец вала вниз; 3 - вал вертикальный, конец вала вверх; 5 - вал горизонтальный, конец вала влево, машина крепится лапами на вертикальной плоскости; 6 - вал горизонтальный, конец вала направо, машина крепится на вертикальной плоскости; 7 - вал горизонтальный, машина крепится на горизонтальной плоскости лапами вверх; 8 - машина может работать при любом направлении конца вала;

X₄ - исполнение выступающего конца вала: 0 - без конца вала; 1 - с одним цилиндрическим концом вала; 2 - с двумя цилиндрическими; 3- с одним коническим; 4 - с двумя коническими; 6, 7 и 9 - в асинхронных двигателях общего назначения не применяются.

Обозначение исполнений вводных устройств расшифровывается так : К-3-І - с панелью выводов и одним штуцером; К-3-ІІ - с панелью выводов и двумя штуцерами; К-3-М – с панелью выводов и удлинителем под сухую разделку кабеля или под эпоксидную заделку; К-2-І – без панели выводов с одним штуцером; К-2-ІІ – без панели выводов с двумя штуцерами.

Основным исполнением вводных устройств является устройство с панелью выводов и одним штуцером (К-3-1). По заказу потребителя заводы-изготовители двигателей устанавливают вводное устройство с двумя штуцерами. Два штуцера необходимо для ввода дополнительных проводов в двигатели с температурной защитой и др.

1.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по 4-м точкам

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется номинальными техническими данными, которые указываются в каталоге: P_n , кВт – номинальная мощность, n_n , об/мин – номинальная частота вращения вала электродвигателя при номинальной нагрузке, U_n , В – номинальное напряжение, I_n , А – номинальная сила тока, (\sim) – род тока, f_n , Гц – частота питающей сети, $\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности при номинальной нагрузке, η_n коэффициент полезного действия, кроме того в каталоге задаются n_c , об/мин – синхронная частота вращения (частота вращения магнитного поля статора), $\mu_n = \frac{M_{max}}{M_n}$ – кратность пускового момента, $\mu_k = \frac{M_{крит}}{M_n}$ – кратность максимального (или критического) момента.

Естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с к.з. ротором $\omega = f(M)$ ориентировочно можно построить, используя его данные из каталога, по 4 – м характерным точкам (рисунок 1.1) :

Координаты точек :

Точка А ($M = 0$; $\omega = \omega_c$) ; ω_c – синхронная скорость вращения, рад/с.

$$\omega_c = \pi n_c / 30, \quad (1.1)$$

Точка В ($M = M_H$; $\omega = \omega_H$); M_H – номинальный момент электродвигателя, Н м; ω_H – номинальная скорость вращения, рад/с.

$$M_H = 1000 \cdot P_H / \omega_H, \quad (1.2)$$

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30; \quad (1.3)$$

Точка С ($M = M_{кр}$; $\omega = \omega_{кр}$); $M_{кр}$ – момент критический (или максимальный), Нм; $\omega_{кр}$ – критическая скорость вращения, рад/с.

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_H; \quad (1.4)$$

$$\omega_{кр} = \omega_c (1 - S_{кр}), \quad (1.5)$$

где $S_{кр}$ – критическое скольжение, о.е.

$$S_{кр} = S_H (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1}); \quad (1.6)$$

Точка Д ($M = M_{пуск}$; $\omega = 0$); $M_{пуск}$ – пусковой момент электродвигателя, Нм;

$$M_{пуск} = \mu_{п} \cdot M_H; \quad (1.7)$$

Примечание :

Если нагрузка у АД с к.з. ротором номинальная и параметры сети соответствуют номинальным данным, то запуск электродвигателя осуществляется от точки Д далее точка С и рабочая точка это точка В.

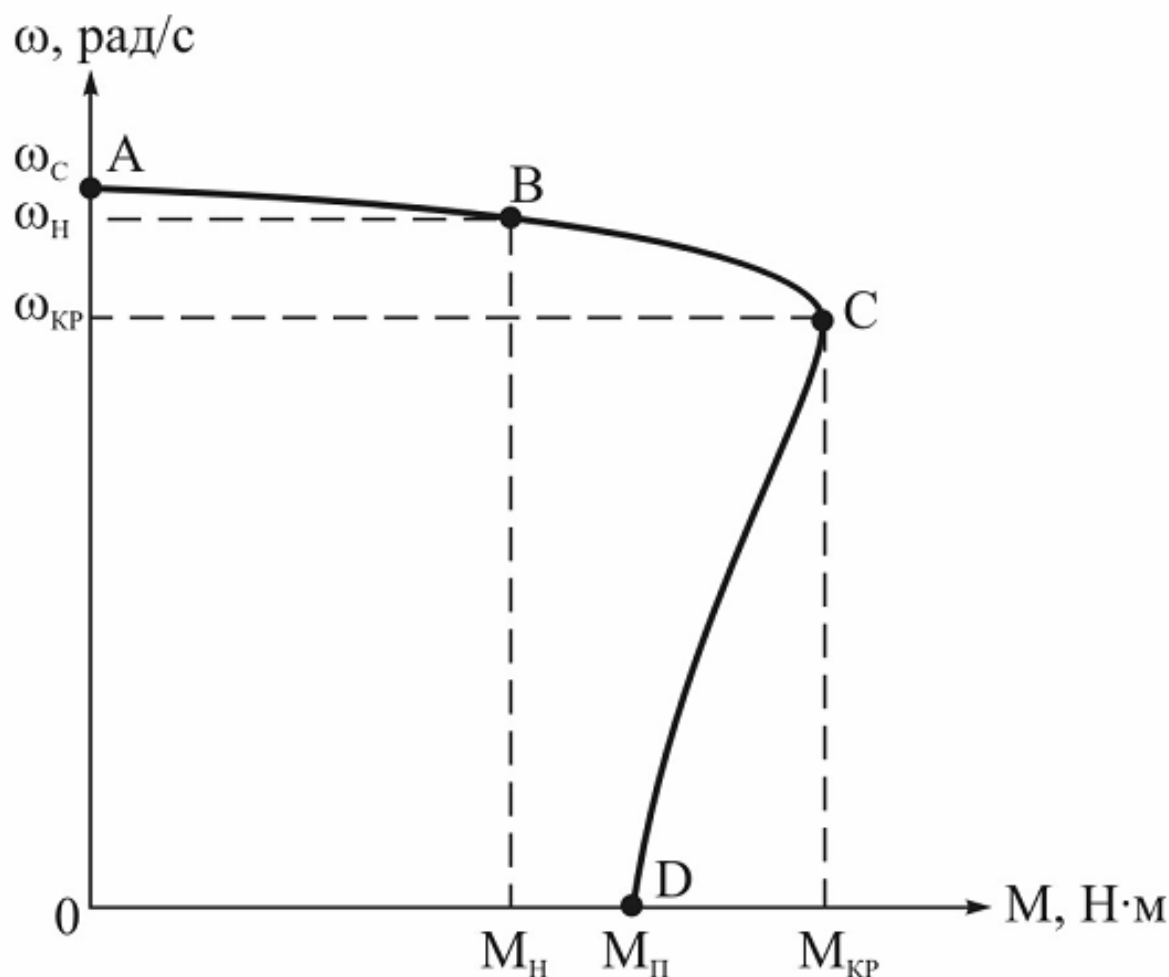


Рисунок 1.1 - Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя с к.з. ротором, построенная по 4-м точкам

Задача 1.1. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АИР225М2, имеющего следующие паспортные данные :

$P_n = 55 \text{ кВт}$; $n_n = 2940 \text{ об/мин}$; $n_c = 3000 \text{ об/мин}$; $\mu_n = 1,8$; $\mu_{кр} = 2,6$;
построить естественную механическую характеристику по 4-м точкам :

Решение:

1. Определяем синхронную скорость вращения ω_c , рад/с, по формуле:

$$\omega_c = \pi \cdot n_c / 30, \quad (1.8)$$

$$\omega_c = 3,14 \cdot 3000 / 30 = 314 \text{ рад/с.}$$

2. Определяем номинальную скорость вращения ω_n , рад/с, электродвигателя:

$$\omega_n = \pi \cdot n_n / 30 ; \quad (1.9)$$

$$\omega_n = 3,14 \cdot 2940 / 30 = 307,7 \text{ рад/с.}$$

3. Определяем номинальный момент M_n , Нм, электродвигателя:

$$M_n = 1000 \cdot P_n / \omega_n ; \quad (1.10)$$

$$M_n = 1000 \cdot 255 / 307,7 = 178,7 \text{ Нм,}$$

4. Определяем критический момент $M_{кр}$, Нм, электродвигателя:

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_n ; \quad (1.11)$$

$$M_{кр} = 2,6 \cdot 178,7 = 464,6 \text{ Нм,}$$

5. Определяем номинальное скольжение S_n , о.е., электродвигателя:

$$S_n = (n_c - n_n) / n_c ; \quad (1.12)$$

$$S_n = 3000 - 2940 / 3000 = 0,02$$

6. Определяем критическое скольжение $S_{кр}$, о.е., электродвигателя:

$$S_{кр} = S_n (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1}); \quad (1.13)$$

$$S_{кр} = 0,02 (2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1}) = 0,1$$

7. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{кр}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{кр} = \omega_c (1 - S_{кр}), \quad (1.14)$$

$$\omega_{кр} = 314 (1 - 0,1) = 282,6 \text{ рад/с.}$$

8. Определяем пусковой момент $M_{\text{пуск}}$, Н·м, электродвигателя:

$$M_{\text{пуск}} = \mu_{\text{п}} \cdot M_{\text{н}} ; \quad (1.15)$$

$$M_{\text{пуск}} = 1,8 \cdot 178,7 = 321,66 \text{ Н·м.}$$

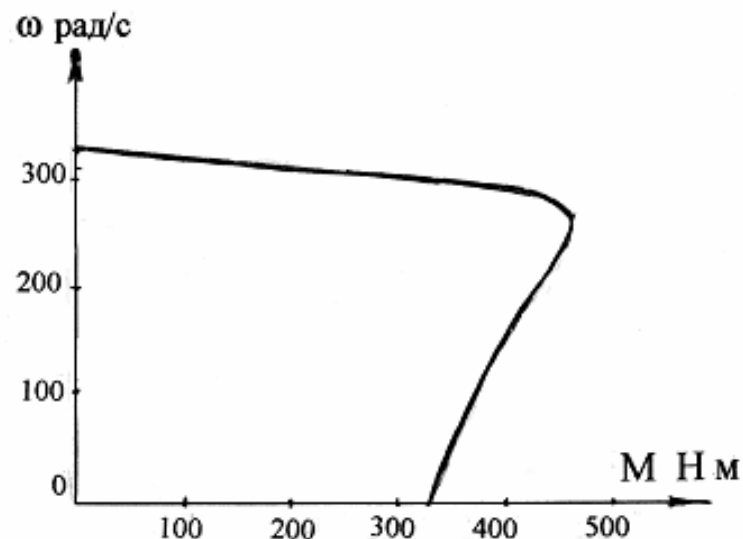


Рисунок 1.2- Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя типа АИР225М2

1.3 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса при помощи ПК

1.3.1 Мой компьютер

Персональный компьютер – это техническое средство, предлагающее сегодня пользователю всё, что необходимо для обработки информации на рабочем месте, и огромные по возможностям программные средства или математическое обеспечение для решения практически любых задач в самом доступном для пользователя виде.

Технические устройства ПК :

Стандартный комплект современного ПК включает в себя :

- системный блок
- монитор
- клавиатуру
- мышь с ковриком.

Системный блок - это основа ПК, в него входят устройства, определяющие всю работу по обработке информации.

Монитор – окно в ПК. Монитор даёт возможность ведения диалога с ПК, а диалог представляет основу работы пользователя на ПК.

Клавиатура – всю клавиатуру можно разбить на 4 зоны:

- основная (пишущая машинка);
- числовая (калькулятор);
- управления курсором;
- функциональная.

Основная. Расположение символов на основной части клавиатуры такое же, как и на пишущей машинке. Русские символы в соответствии с русскоязычной пишущей машинкой, а латинские символы - с англоязычной. Верхний ряд содержит цифры и специальные символы. Большая клавиша внизу - пробел (интервал между словами). Справа и слева - управляющие клавиши.

Ctrl - (контрол), правый и левый;

Alt - (альт), правый и левый;

Shift - (шифт), правый и левый.

У клавиатуры два регистра - нижний и верхний. В нижнем регистре находятся обычные символы, буквы и цифры. В верхнем регистре - заглавные буквы и некоторые специальные символы, которые, обычно, отображены на верху клавиши. Символ из верхнего регистра берётся при нажатой клавише Shift. Для закрепления верхнего регистра используется клавиша Caps Lock. Отключается верхний регистр повторным нажатием этой клавиши. Включённый верхний регистр отмечается включённым индикатором Caps на панели индикации в правом верхнем углу клавиатуры. Для переключения режимов клавиатуры (русский / латинский) в WINDOWS следует нажать одновременно Ctrl + Shift - левый или правый.

Клавиша Back Space или (←) стирает набранные символы (справа налево).

Клавиша Tab - табуляция.

Клавиша Enter - ввод, основная клавиша, вводит информацию в ОП для обработки, подтверждает выбор на экране, завершает выполнение команды.

Клавиша Esc (Escape) – в левом верхнем углу клавиатуры, отмена действия, отказ, сброс информации.

Числовая. (Правая часть клавиатуры). Расположение цифр подобно калькулятору. Эта часть клавиатуры может работать в двух режимах - для ввода чисел или для управления курсором. Режимы переключаются клавишей Num Lock. Включённый числовой режим отображается индикатором Num на табло индикации.

Курсор. – это указатель на экране. Символьный курсор – вертикальная мигающая чёрточка обозначает на экране место для ввода. Курсор-указатель - выделенный прямоугольник, перемещая который можно выбрать информацию на экране. Курсор перемещается по экрану клавишами-стрелками. Если информации много, то для перелистывания экранов используются клавиши PgUp и PgDn страница вверх и страница вниз. Home - перевод курсора в начало информации (списка, строки), End - перевод курсора в конец информации (списка, строки) Клавиша ins (Inset - вставить) переключает режимы « Вставка » / « Замена ». В режиме « Вставка » символ с клавиатуры вставляется в позицию слева от курсора, раздвигая текст.

Клавиша Del (Delete - удалить) удаляет символ справа от курсора.

Функциональная. 12 клавиш в верхней части клавиатуры - F1, F2,.. ...F12.

Эти клавиши имеют конкретное назначение в каждом пакете программ и описываются в инструкциях.

Управление Мышью. При работе на ПК мышь становится основным инструментом в руках пользователя.

Рабочие элементы Мыши - это шарик на её нижней стороне и две рабочие клавиши наверху. При перемещении Мыши по коврику шарик вращается и перемещает стрелку-указатель по экрану.

Левая клавиша - 3 основных действия :

Одинарный щелчок. Выбирает объект на экране, вызывает команду из меню, нажимает кнопку на графическом экране, и т. д.

Двойной щелчок. Открывает папку, вызывает документ, выполняет другие операции по инструкции.

Перетаскивание. Перемещает объект, для этого : установить указатель мыши на нужный объект, нажать левую клавишу и, удерживая её, переместить мышь в нужном направлении. Выбранный объект перемещается вместе с мышкой и остаётся там, где опущена клавиша.

Правая клавиша.

Щелчок правой клавишей мыши вызывает контекстное меню.

Меню – это перечень команд для выбора пользователем. Контекстное меню всегда содержит только те команды, которые можно применить к выбранному мышкой объекту, работа с этим меню значительно упрощает поиск нужной команды.

1.3.2 Электронная таблица - EXCEL

Электронные таблицы сегодня являются самыми популярными программами для автоматизации обработки информации в любой сфере управления. Одних только математических, логических, бухгалтерских, статистических функций, которые Excel умеет выполнять над табличными данными, - более двухсот штук.

Рабочее поле Excel представляет собой не чистый лист, а пустую таблицу, которую предстоит заполнять.

Идея автоматизации расчётов в электронных таблицах очень простая :

В таблице добавляются номера строк и буквы столбцов, таблица становится адресной, т.е. у каждой клетки есть адрес, как на шахматной доске. Значит, у любой информации таблицы есть адрес, так же как и у фигуры на шахматной доске. Теперь в таблице можно писать формулы расчёта, используя адреса с информацией.

Таблица 1.1- Таблица Excel

| | A | B | C | D | E |
|---|----|----|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 15 | 20 | = A1 + B1 (35) | = 10% * C1 (3.5) | = C1 -D1 (31.5) |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |

Когда исходные данные в адресах меняются, одновременно пересчитываются и все формулы с этими адресами.

Таким образом, надо только правильно задать формулы расчёта, и тогда достаточно ввести новые исходные данные и распечатать уже пересчитанную таблицу. Если при этом учесть, что размеры таблиц практически не ограничены, и в формулах можно использовать огромное количество функций, в том числе сложных математических функций и специальных функций EXCEL, и что работа в таблице полностью автоматизирована, то становится понятной растущая популярность этого пакета программ.

Вызов EXCEL

EXCEL входит в состав MS OFFICE и проще всего его вызвать щелчком мыши на кнопке с его значком на панели OFFICE в верхней части экрана Рабочего Стола. Всегда можно вызвать EXCEL из списка программ через пусковое меню :

ПУСК - Программы - Microsoft Excel

Экран EXCEL

Экран EXCEL – стандартное окно WINDOWS. Верхняя строка-заголовок, затем меню, под строкой меню находятся панели инструментов с кнопками-значками для быстрого вызова основных команд. По умолчанию, так же как и в WORDe, на экране две основные панели - стандартная и форматирование. Другие панели можно устанавливать или убирать по мере необходимости, используя для этого команду :

Вид - Панели инструментов

Вызывается список панелей. Установленные панели отмечены слева галочкой. Нужная панель устанавливается или убирается щелчком мыши. Если необходимо полностью настроить панели инструментов, то следует выполнить :

Вид - Панели инструментов - Настройка

В окне запроса выбираются панели инструментов для постоянного отображения на экране.

Рабочее поле окна EXCEL - таблица. Сверху и слева от таблицы расположена рамка EXCEL с заголовками столбцов и строк. Имена столбцов - буквы латинского алфавита, имена строк - номера по порядку, таким образом, у каждой клетки есть адрес, например : A1, F34, - AN15 и т.д.

Клетка, выделенная прямоугольной рамкой, называется « Активной клеткой» или «Табличным курсором»-Активная клетка перемещается клавишами-стрелками или щелчком мыши.

- указатель мыши в рабочем поле. **Home** - перемещает Активную Клетку в начало строки ; **Ctrl + Home** - в начало таблицы, в клетку A1 ; курсор имеет форму толстенького белого крестика.

Вся таблица - книга. В этой книге по умолчанию 3 листа. Количество листов можно уменьшить или увеличить практически без ограничений (до 255 листов). Номера листов обозначены на ярлычках под таблицей. Один лист - это 255 столбцов и 65580 строк.

Управление листами :

- **переход на другой лист** - щелчок мыши на ярлычке листа ;
- **задать новое имя** - двойной щелчок мыши на ярлычке, задать на ярлычке новое имя с клавиатуры ; (или из контекстного меню выполнить команду - **Переименовать**) ;
- **удалить лист** - из контекстного меню выполнить команду –
- **Удалить** ;
- **добавить новые листы** - из контекстного меню выполнить команду - **Вставить** ;

листы можно перемещать, перетаскивая мышкой ярлычок, или копировать, перетаскивая мышкой при нажатии клавиши Ctrl. Между панелями инструментов и таблицей находится Строка

Формул. Эта строка устанавливается или убирается с экрана командой : **Вид - Строка Формул**.

Слева в Строке формул отображается адрес Активной клетки, а справа - содержимое Активной клетки в формульном виде, если эта информация - формула. Последняя строка экрана - строка состояния.

Виды информации в EXCEL :

3 основных вида информации в EXCEL :

Текстовая - эту информацию EXCEL различает самостоятельно. Числовое значение текстовой информации 0 или ошибка.

Числовая - это числа, целые или десятичные с разделителем десятичных знаков - запятая, например, 15,72.

Числа могут быть представлены в нормализованном виде (экспоненциальная форма числа). Этот формат называют ещё инженерным или научным, и используется он для представления очень больших или очень маленьких чисел, используя для этого степень десяти (экспоненту).

Например :

$$1200000000 = 1,2 * 10^9 = 1,2 + E9$$

$$0,0000000012 = 1,2 * 10^{-9} = 1,2 - E9$$

Формульная - всегда начинается с признака формулы, знака = . Без этого признака формула воспринимается как текст. Формулы могут содержать :

- числа,
- адресные ссылки (например : A1 + B1),
- текстуальные константы, текст в кавычках, т.е. « текст».

Используется для ввода текста в формулы.

- функции EXCEL. Большое разнообразие функций даст возможность решения самых различных классов задач, это в свою очередь и определяет такую популярность данного пакета программ.

Вот далеко не полный перечень только классов функций :

- математические ;
- статистические ;
- логические ;
- финансовые ;
- календарные и другие .

Для записи (построения) формулы используются следующие арифметические операции :

- + сложение
- вычитание
- * умножение
- / деление
- ^ возведение в степень (например : A1 ^ 3),

% процент от числа или от адресной ссылки, используется со знаком умножения * (например : = 5%*A1) ;

() круглые скобки используются для изменения порядка вычислений. Стандартные правила порядка вычислений при расчёте формул EXCEL выполняет.

Если при вводе формулы допущена синтаксическая ошибка, то формула воспринимается как текст и выдаётся сообщение об ошибке. В формулах не допускаются пробелы.

Вид сообщений об ошибках :

#ИМЯ? - в адресных ссылках формулы использованы русские буквы, или неверно записано имя функции.

#ЗНАЧ? - в формуле допущена адресная ссылка на клетку с текстом или с ошибкой.

#ССЫЛКА? - адресная ссылка на ошибку.

#ДЕЛ/0! - деление на 0.

В одной клетке таблицы может быть информация только одного вида, иначе она воспринимается как текст.

Ввод информации:

Информация всегда вводится в «Активную клетку», поэтому необходимо следить за её местоположением в таблице. Перед вводом информации Активную клетку необходимо установить в нужное место.

Размер информации в одной клетке таблицы ограничен до 255 символов. Если при вводе текст превышает размер клетки, то он автоматически переходит в клетки справа по строке, если они свободны. Если клетки справа заняты, то текст на экране обрывается, но при этом он полностью остаётся в оперативной памяти по адресу клетки ввода.

Информация при вводе отображается в активной клетке и в строке формул, чтобы её сбросить в процессе ввода, нужно нажать клавишу Esc. Информация считается введённой в указанный адрес только при завершении ввода : (Enter) - стандартный способ завершения ввода. Обязательно применяется при вводе и редактировании формул. После ввода «Активная клетка» автоматически переходит на одну клетку вниз.

Клавиши-стрелки - обычно завершают ввод исходных данных. После ввода «Активная клетка» автоматически перемещается в выбранном стрелкой направлении.

Щелчок мыши - используется тоже при вводе исходных данных, когда они разбросаны по таблице. «Активная клетка» перемещается по адресу щелчка мыши.

Если перед вводом щелкнуть мышкой в строке формул, то в ней появляется символьный курсор, и информация вводится непосредственно в строку формул. При этом в строке формул появляются дополнительные кнопки, которые можно использовать для редактирования, удаления или для ввода. В этом случае «Активная клетка» при вводе никуда не перемещается.

Редактирование информации:

Информация стирается из «Активной клетки» или выделенного блока клеток клавишей Del.

Если информация вводится в занятую клетку, то новая информация заменяет старую, таким образом, нет необходимости стирать старую информацию при вводе новых исходных данных.

Если в занятую клетку информация вводится ошибочно, то клавиша Esc стирает набираемую информацию, восстанавливая старую. Для редактирования данных в клетке таблицы необходимо включить режим редактирования, который вызывается двойным щелчком мыши в клетке редактирования или клавишей F2 : в клетке появляется текстовый курсор, который можно перемещать по информации в клетке и затем редактировать (удалять, вставлять или заменять символы).

Щелчок мыши в строке формул также вызывает режим редактирования информации Активной клетки, символьной курсор по-является прямо в строке формул, где и отображается процесс редактирования. Редактирование завершается клавишей Enter.

Выделение в таблице:

Практически все операции в EXCEL выполняются для выделенного блока клеток или только для «Активной клетки».

Основные приёмы выделения :

- с клавиатуры - Shift + стрелки управления курсором;

- мышкой - перетаскиванием по нужному блоку клеток.

Дополнительные приёмы :

- **выделение столбца** - щелчок мыши на букве столбца в рамке таблицы, перетаскиванием мышки по буквам столбцов в рамке можно выделить несколько смежных столбцов ;

- **выделение строки** - щелчок мыши на номере строки в рамке таблицы, перетаскиванием мыши по номерам строк можно выделить несколько смежных строк в таблице ;

- **выделение всей таблицы** - щелчок мыши в левом верхнем углу рамки таблицы ;

- **выделение таблицы пользователя** - поместить «Активную клетку» в A1 и нажать клавиши Shift + Ctrl + End ;

- **выделение разрывного блока клеток** – EXCEL допускает выделение несмежных между собой блоков клеток, для этого выделить мышкой нужные блоки при нажатой клавише Ctrl. В выделенном блоке остаётся не закрашенной Активная клетка.

Перемещение и копирование мышкой:

- выделить блок клеток ;

- установить указатель мыши строго на рамку блока или Активной клетки ;

- для перемещения - перетащить мышкой блок в другое место таблицы ;

- для копирования - перетащить мышкой при нажатой клавише

Ctrl. Эту клавишу отпустить после выполнения операции в последнюю очередь.

Если блок клеток перемещается или копируется в занятое место таблицы, то на экране появляется окно-предупреждение, что будет произведена замена информации. Если эта замена нежелательна, то надо отказаться от выполнения операции.

Использование некоторых функций EXCEL:

Возможности электронных таблиц значительно расширяются, если использовать функции. Все функции EXCEL можно просмотреть, если вызвать окно «Мастер функций». Это окно вызывается кнопкой fx на стандартной панели инструментов. В этом

окне слева представлен список категорий (видов) функций, а справа – список функций выбранной категории. Общий вид функций, выбранной щелчком мыши, и краткая подсказка по ней отображается внизу окна. Чтобы получить подробную инструкцию по её применению надо нажать кнопку с вопросом (или кнопку СПРАВКА в EXCEL-7).

Окно « Мастер функций» можно использовать при вводе сложных или незнакомых функций, тогда в режиме « шаг за шагом» вводится сначала имя выбранной функции, а затем её аргументы.

1.3.3 Уравнение Клосса

Уравнение механической характеристики АД записывается следующим образом :

$$M = \frac{2M_{\text{макс}} (1 + aS_{\text{кр}})}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S} + 2a \cdot S_{\text{кр}}}; \quad (1.16)$$

где $M_{\text{макс}}$ - максимальный (критический) момент электродвигателя, Н·м;

$S_{\text{кр}}$ - критическое скольжение, соответствующее критическому моменту, о.е.

$a = R_1^I / R_2^{II}$ - отношение активного сопротивления R_1^I фазы обмотки статора АД к приведённому активному сопротивлению R_2^{II} фазы обмотки ротора.

Задача 1.2. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АИР100L6, имеющего следующие паспортные данные :

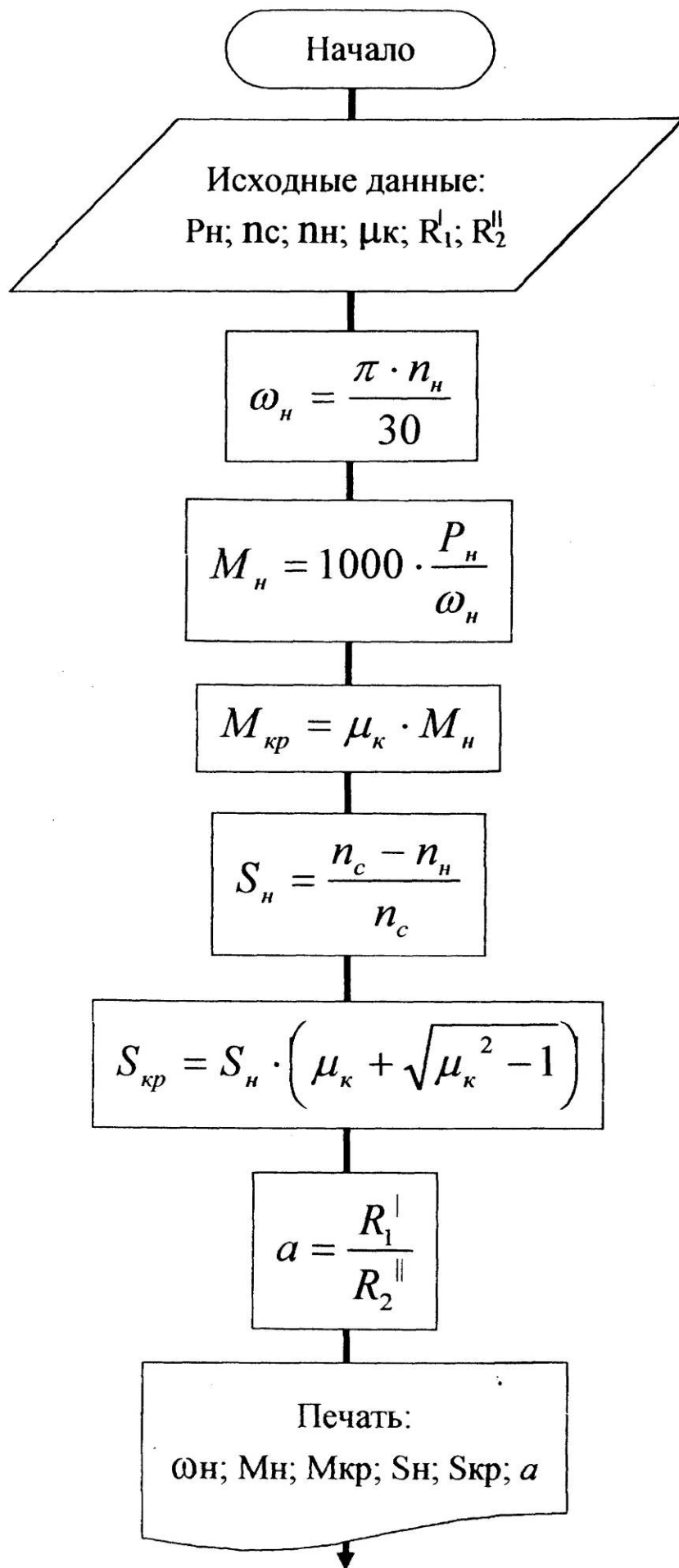
$P_n = 2,2$ кВт ; $n_c = 1000$ об/мин ; $n_n = 945$ об/мин ; $\mu_{\text{кр}} = 2,2$; $R_1^I = 0,09$; $R_2^{II} = 0,067$; построить естественную механическую характеристику по уравнению Клосса при помощи персонального компьютера.

Решение :

1. Составляем блок-схему алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АИР100L6 (рисунок 1.3).

2. Составляем инструкцию по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики АД с к.з. ротором типа АИР100L6.

3. Заполняем электронную таблицу EXCEL согласно инструкции и получаем механическую характеристику $M = f(S)$ для электродвигателя типа АИР100L6 (рисунок 1.4).



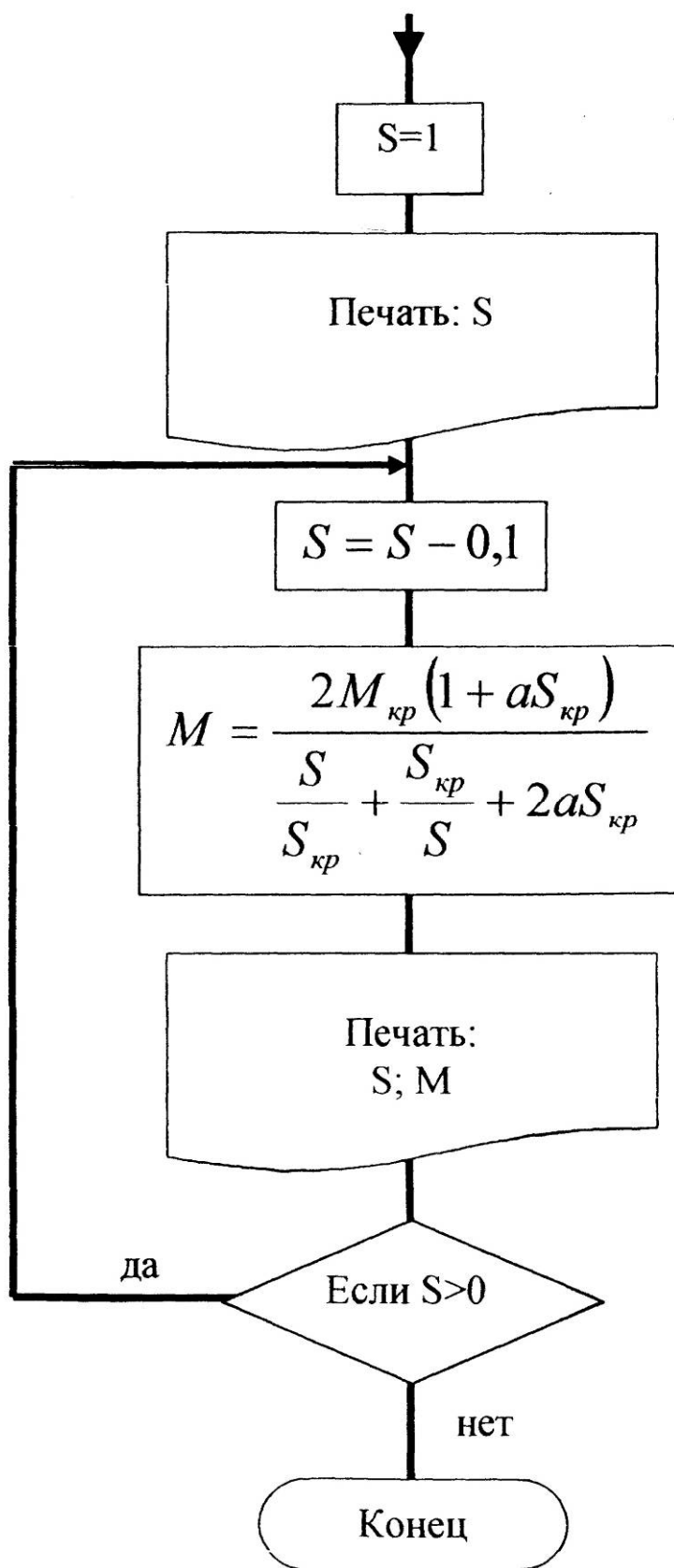


Рисунок 1.3- Блок-схема алгоритма расчета координат для построения естественной механической характеристики асинхронного двигателя с к.з. ротором

Таблица 1.2- Инструкция по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма определения координат для построения естественной механической характеристики асинхронного двигателя с к.з. ротором

| Ячейка | Значение |
|---------------|--|
| A1 (A1-G1) | "Построение механической характеристики" |
| A2 (A2-G2) | "асинхронного электродвигателя с к.з. " |
| A3 (A3-G3) | "ротором по уравнению Клосса" |
| B6 (B6-E6) | "Исходные данные" |
| A8 | "Тип двигателя" |
| B8 | " P_H , кВт" |
| C8 | " n_c , об/мин" |
| D8 | " n_H , об/мин" |
| E8 | " μ_k " |
| F8 | " R_1 " |
| G8 | " R_2 " |
| B12 (B12-E12) | "Промежуточные расчеты" |
| B14 | " ω_H , рад/с" |
| C14 | " M_H , Н*м" |
| D14 | " $M_{кр}$, Н*м" |
| E14 | " S_H " |
| F14 | " $S_{кр}$ " |
| G14 | " σ " |
| B15 | $=3,14*D9/30$ |
| C15 | $=1000*B9/B15$ |
| D15 | $=E9*C15$ |
| E15 | $=(C9-D9)/C9$ |
| F15 | $=E15*(E9+КОРЕНЬ(СТЕПЕНЬ(E9;2)-1))$ |
| G15 | $=F9/G9$ |
| A18 (A18-D18) | "Данные для построения" |
| A19 (A19-D19) | "механической характеристики:" |
| A21 | "S" |
| B21 | "M, Н*м" |
| A22 | =0 |
| B22 | =0 |
| A23 | =A24-0,1 |
| B23 | $=2*D15*(1+G15*F15)/(A23/F15+F15/A23+2*G15*F15)$ |

| Ячейка | Значение |
|----------------------------|---|
| A24 | =A25-0,1 |
| B24 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A24/F15+F15/A24+2*G15*F15) |
| A25 | =A26-0,1 |
| B25 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A25/F15+F15/A25+2*G15*F15) |
| A26 | =A27-0,1 |
| B26 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A26/F15+F15/A26+2*G15*F15) |
| A27 | =A28-0,1 |
| B27 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A27/F15+F15/A27+2*G15*F15) |
| A28 | =A29-0,1 |
| B28 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A28/F15+F15/A28+2*G15*F15) |
| A29 | =A30-0,1 |
| B29 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A29/F15+F15/A29+2*G15*F15) |
| A30 | =A31-0,1 |
| B30 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A30/F15+F15/A30+2*G15*F15) |
| A31 | =A32-0,1 |
| B31 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A31/F15+F15/A31+2*G15*F15) |
| A32 | =1 |
| B32 | =2*D15*(1+G15*F15)/(A32/F15+F15/A32+2*G15*F15) |
| B37 (B37-G37) (B40-G40) | "Рисунок 1.4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с к.з. ротором" |
| Объект | =ВНЕДРИТЬ("диаграмма Microsoft Graph") ="M(S)" Значения X: "=Лист1!\$A\$22:\$A\$32" Значения Y: "=Лист1!\$B\$22:\$B\$32" |

**Построение механической характеристики
асинхронного электродвигателя с к.з.
ротором по уравнению Клосса**

| | |
|----------------------|--------------|
| Ф.И.О. | группа, курс |
| Иванов Иван Иванович | 1,1 |

Исходные данные

| Тип двигателя | P_N , кВт | n_c , об/мин | n_N , об/мин | μ_k | R'_1 | R''_2 |
|---------------|-------------|----------------|----------------|---------|--------|---------|
| AIP100L6 | 2,2 | 1000 | 945 | 2,2 | 0,09 | 0,067 |

Промежуточные расчеты

| ω , рад/с | M_k , Н·м | $M_{\text{эп}}$, Н·м | S_N | $S_{\text{кр}}$ | a |
|------------------|-------------|-----------------------|-------|-----------------|--------|
| 98,91 | 22,242443 | 48,933374 | 0,055 | 0,2288 | 1,3433 |

Данные для построения механической характеристики

| s | M , Н·м |
|-----|-----------|
| 0 | 0 |
| 0,1 | 38,31178 |
| 0,2 | 48,59697 |
| 0,3 | 47,58817 |
| 0,4 | 43,59209 |
| 0,5 | 39,27374 |
| 0,6 | 35,35732 |
| 0,7 | 31,97609 |
| 0,8 | 29,09473 |
| 0,9 | 26,63928 |
| 1 | 24,53608 |

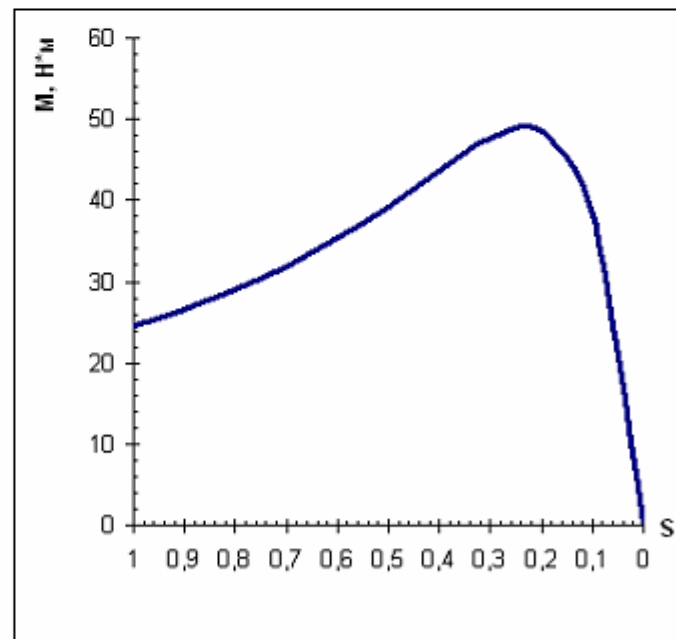


Рисунок 1.4- Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя с к.з. ротором

2 АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

2.1 Назначение электродвигателей

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются при тяжёлых условиях пуска, а также при необходимости плавного регулирования частоты вращения вниз от номинальной. Они используются для рабочих машин, требующих большой пусковой момент. Двигатели с фазным ротором являются модификацией АД с короткозамкнутым ротором. Главным достоинством таких АД – возможность пуска при малых пусковых токах, что особенно важно для работы от слабых сетей. Кроме того, фазный АД можно регулировать по частоте вращения, вводя в ротор резистор. В ряде случаев фазные асинхронные электродвигатели работают в режиме генератора, как нагружающие устройства. Иногда они используются в асинхронном вентильном каскаде, допускающем плавную регулировку частоты вращения в широком диапазоне при высоком коэффициенте мощности.

Выводные концы обмотки ротора, соединённой обычно в звезду, подключены к трём контактными кольцам. С помощью щёток через кольца в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор или добавочную ЭДС для изменения пусковых или рабочих свойств электродвигателя. Щётки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

В большинстве случаев добавочный резистор вводится в обмотку ротора только для облегчения пуска АД, так как в этом случае увеличивается момент и уменьшается ток. При работе АД пусковой резистор должен быть полностью выведен, а обмотка ротора замкнута накоротко.

Двигатели с фазным ротором выполняются с теми же степенями защиты, что и АД с короткозамкнутым ротором, -IP54 (IP44) и IP23 по СТ СЭВ 247-76.

В серии АИ на базе вариантов АИР, АИС, АИРН, АИСН разработаны соответственно следующие модификации АД с фазным ротором : АИРФ - со степенью защиты IP54 (IP44) ; АИСФ - со степенью защиты IP54 (IP44) ; АИРНФ – со степенью защиты IP23 ;

АИСНФ – со степенью защиты IP23.

2.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором характеризуется номинальными техническими данными, которые указываются в каталоге :

$P_{\text{н}}$, кВт – номинальная мощность; $U_{\text{н}}$, В – номинальное напряжение; $n_{\text{н}}$, об/мин – номинальная частота вращения вала электродвигателя (или $S_{\text{н}}$ – номинальное скольжение); $I_{\text{н}}$, А – номинальный ток; $f_{\text{н}}$, Гц – частота питающей сети; $\cos \varphi_{\text{н}}$ – коэффициент мощности при номинальной нагрузке; $\eta_{\text{н}}$ – номинальный коэффициент полезного действия; $n_{\text{с}}$, об/мин – синхронная частота вращения (частота вращения магнитного поля статора);

$\mu_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}$ – кратность максимального (или критического момента); $I_{2\text{н}}$, А – номинальный ток обмотки фазы ротора; $E_{2\text{н}}$, В – э.д.с. номинальная ротора (линейное напряжение на кольцах разомкнутой цепи неподвижного ротора).

Естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором $\omega = f(M)$ ориентировочно можно построить, используя его данные по каталогу по 3 –м характерным точкам : А ; В ; С , координаты которых рассчитываются аналогично координатам точек для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором (см. п.п. 1.2.). Пусковой момент (M_1) рассчитывается при введённом пусковом сопротивлении в цепи ротора согласно законов коммутации по формуле :

$$M_1 = (0,8 \dots 0,85) M_{\text{макс}}, \quad (2.1)$$

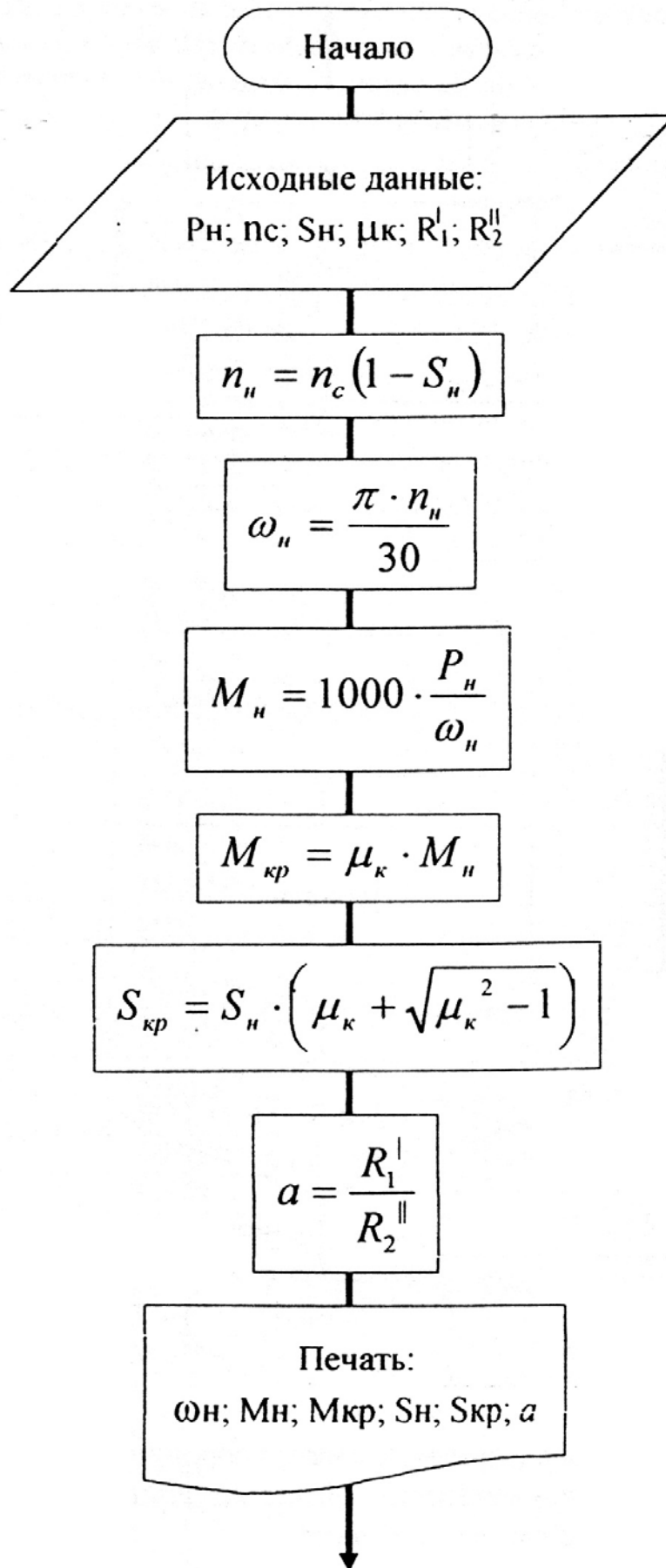
Естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя с фазным ротором можно построить по уравнению Клосса по формуле (1.16), задаваясь скольжением в пределах от $S=0$ до $1 > S > S_{кр}$;

Задача 2.1. Для асинхронного электродвигателя с фазным ротором типа АИРФ200М4, имеющего следующие паспортные данные : $P_n = 22$ кВт ; $n_c = 1500$ об/мин ; $S_n = 0,025$; $\mu_{кр} = 2,5$.

Параметры схемы замещения : $R_1^I = 0,024$; $R_2^{II} = 0,026$. Построить естественную механическую характеристику по уравнению Клосса при помощи персонального компьютера.

Решение :

1. Составляем блок-схему алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором типа АИРФ200М4 (рисунок 2.1).
2. Составляем инструкцию по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики АД с фазным ротором типа АИРФ200М4.
3. Заполняем электронную таблицу EXCEL согласно инструкции и получаем механическую характеристику $M=f(S)$ для асинхронного электродвигателя с фазным ротором типа АИРФ200М4 (рисунок 2.2).



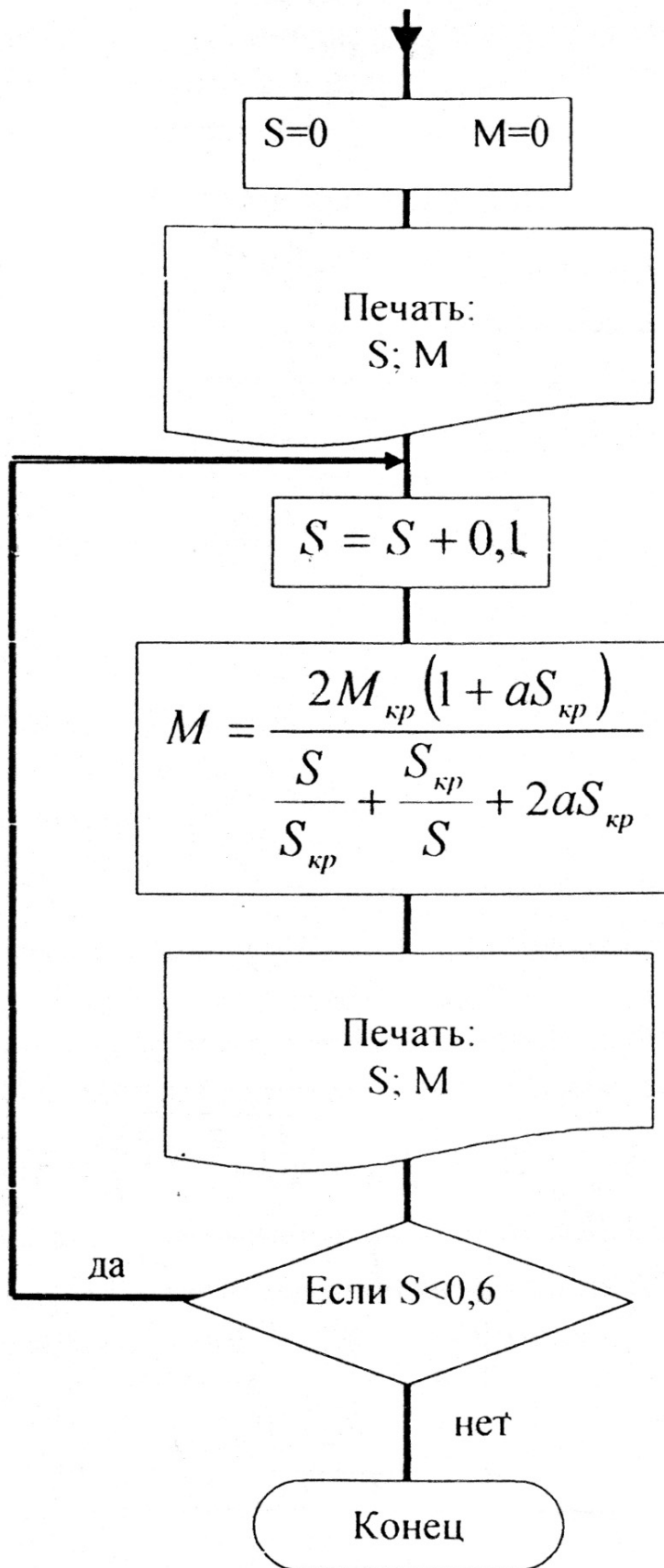


Рисунок 2.1 - Блок-схема алгоритма расчета координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Таблица 2.1 - Инструкция по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма определения координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

| Ячейка | Значение |
|---------------|--|
| A1 (A1-G1) | "Построение механической характеристики" |
| A2 (A2-G2) | "асинхронного электродвигателя с фазным" |
| A3 (A3-G3) | "ротором по уравнению Клосса" |
| B6 (B6-E6) | "Исходные данные" |
| A8 | "Тип двигателя" |
| B8 | " P_H , кВт" |
| C8 | " n_c , об/мин" |
| D8 | " S_H , о.е." |
| E8 | " μ_k " |
| F8 | " R_1 " |
| G8 | " R_2 " |
| B12 (B12-E12) | "Промежуточные расчеты" |
| B14 | " n_H , об/мин" |
| C14 | " ω_H , рад/с" |
| D14 | " M_H , Н*м" |
| E14 | " $M_{кр}$, Н*м" |
| F14 | " $S_{кр}$ " |
| G14 | " a " |
| B15 | $=C9*(1-D9)$ |
| C15 | $=3,14*B15/30$ |
| D15 | $=1000*B9/C15$ |
| E15 | $=E9*D15$ |
| F15 | $=D9*(E9+КОРЕНЬ(СТЕПЕНЬ(E9;2)-1))$ |
| G15 | $=F9/G9$ |
| A18 (A18-D18) | "Данные для построения" |
| A19 (A19-D19) | "механической характеристики:" |
| A21 | "S" |
| B21 | "M, Н*м" |
| A22 | =0 |
| B22 | =0 |
| A23 | =A22+0,1 |
| B23 | $=2*E15*(1+G15*F15)/(A23/F15+F15/A23+2*G15*F15)$ |

| Ячейка | Значение |
|----------------------------|--|
| A24 | =A23+0,1 |
| B24 | =2*E15*(1+G15*F15)/(A24/F15+F15/A24+2*G15*F15) |
| A25 | =A24+0,1 |
| B25 | =2*E15*(1+G15*F15)/(A25/F15+F15/A25+2*G15*F15) |
| A26 | =A25+0,1 |
| B26 | =2*E15*(1+G15*F15)/(A26/F15+F15/A26+2*G15*F15) |
| A27 | =A26+0,1 |
| B27 | =2*E15*(1+G15*F15)/(A27/F15+F15/A27+2*G15*F15) |
| A28 | =A27+0,1 |
| B28 | =2*E15*(1+G15*F15)/(A28/F15+F15/A28+2*G15*F15) |
| B37 (B37-G37) (B40-G40) | ”Рисунок 2.2 Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором” |
| Объект 13 | =ВНЕДРИТЬ(”MSGraph.Chart.8”;” ”) |
| | |
| | |

Построение механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором по уравнению Клосса

Исходные данные:

| Тип двигателя | P_n , кВт | n_c , об/мин | S_n , о.е. | μ_k | R_1' | R_2'' |
|---------------|-------------|----------------|--------------|---------|--------|---------|
| АИРФ200М4 | 22 | 1500 | 0,025 | 2,5 | 0,024 | 0,026 |

Промежуточные расчеты:

| n_n , об/мин | ω_n , рад/с | M_n , Н*м | $M_{кр}$, Н*м | $S_{кр}$ | a |
|----------------|--------------------|-------------|----------------|----------|------|
| 1462,50 | 153,08 | 143,72 | 359,30 | 0,12 | 0,92 |

Данные для построения механической характеристики:

| S | M , Н*м |
|-----|-----------|
| 0 | 0 |
| 0,1 | 354,09 |
| 0,2 | 320,54 |
| 0,3 | 255,38 |
| 0,4 | 206,75 |
| 0,5 | 172,18 |
| 0,6 | 146,98 |

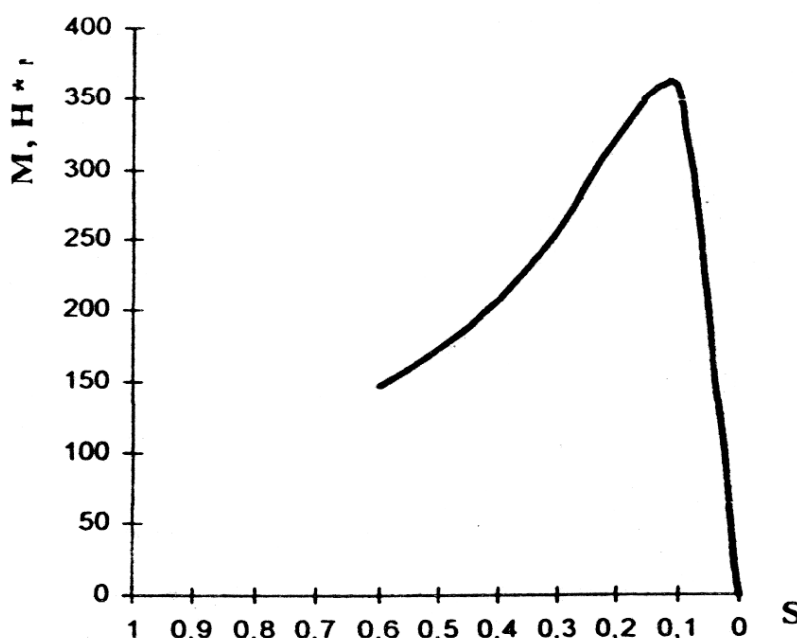


Рисунок 2.2 - Естественная механическая характеристика
асинхронного электродвигателя с фазным ротором

2.3 Определение количества и величины секций пускового резистора АД с фазным ротором

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором запускается при полностью введённом пусковом резисторе (реостате), который состоит из секций. Пусковой реостат служит для ограничения пускового тока АД с фазным ротором. Определить количество и величины сопротивлений секций пускового реостата можно графическим и аналитическим способами.

Графический метод:

Для определения количества и величины сопротивлений секций пускового реостата необходимо построить пусковую диаграмму АД с фазным ротором (рисунок 2.3).

1. Строим механическую характеристику АД с фазным ротором по 3-м точкам или по уравнению Клосса ;
2. Определяем искусственный пусковой момент M_1 , Н·м, согласно законов коммутации :

$$M_1 = (0,8 - 0,85) M_{\text{макс}} ; \quad (2.2)$$

3. Определяем момент переключения M_2 , Н·м, секций пускового реостата:

$$M_2 = (1 - 1,5) M_{\text{н}} ; \quad (2.3)$$

4. Строим прямые $M = M_1$ и $M = M_2$;
5. Соединяем точку 1 и точку А , точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 2, из точки 2 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 3 ; соединяем точку 3 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 4, из точки 4 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 5 ; соединяем точку 5 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 6, из точки 6 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 7.

(Цифра 7 обязательно должна находиться на пересечении естественной механической характеристики АД и прямой $M = M_1$ - это может быть достигнуто путём подбора коэффициентов от 1 до 1,5 у момента переключения M_2 и коэффициентов от 0,8 до 0,85 у пускового момента M_1).

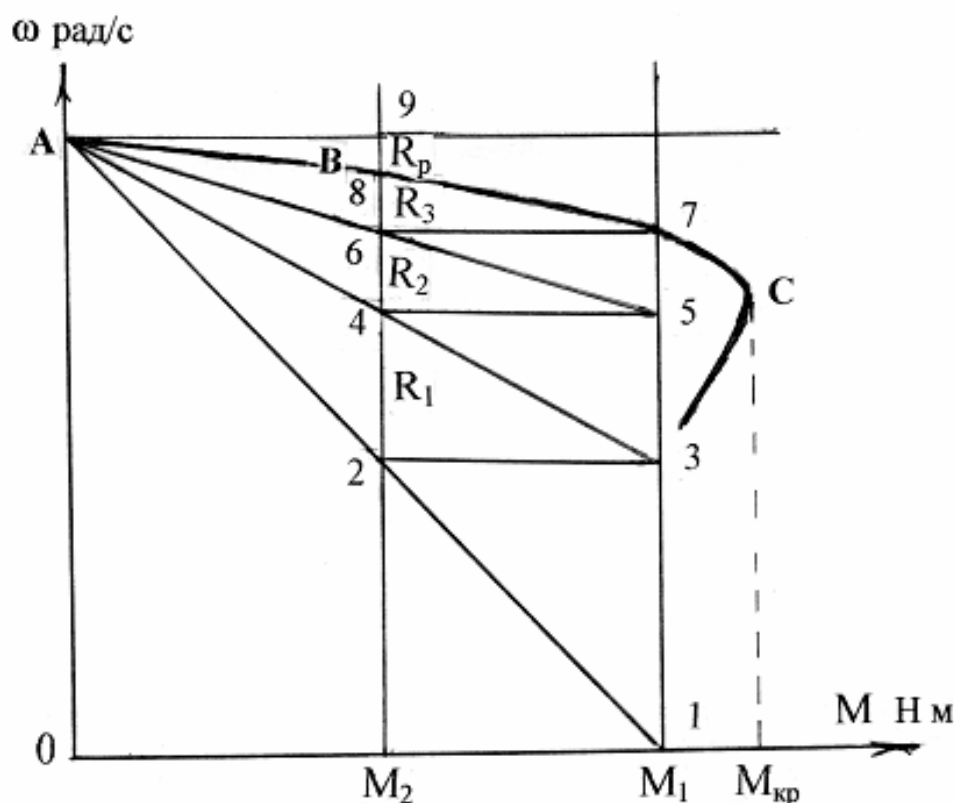


Рисунок 2.3 - Пусковая диаграмма АД с фазным ротором

6. Проводим прямую $\omega = \omega_c$ параллельную оси моментов и обозначаем точку пересечения с прямой $M = M_2$ цифрой 9, а точку пересечения механической характеристики с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 8.

По пусковой диаграмме определяем количество ступеней пускового реостата (m). Согласно рисунка 2.3. $m = 3$.

7. Определяем номинальное активное сопротивление $R_{2н}$, Ом, обмотки фазы ротора :

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} ; \quad (2.4)$$

где $E_{2н}$ — Э.Д.С. номинальная ротора, В ; $I_{2н}$ — номинальный ток обмотки фазы ротора, А.

8. Определяем активное сопротивление R_p , Ом, обмотки фазы ротора при $M_c = M_H$:

$$R_p = R_{2H} \cdot S_H ; \quad (2.5)$$

9. Определяем масштаб сопротивлений m_R , Ом/мм, замеряем расстояние отрезка (8 – 9) в мм.

$$m_R = R_p / (8 - 9) ; \quad (2.6)$$

10. Определяем величину сопротивления первой секции R_1 , Ом, пускового реостата : замеряем расстояние отрезка (2 – 4) в мм.

$$R_1 = m_R \cdot (2 - 4) ; \quad (2.7)$$

11. Определяем величину сопротивления второй секции R_2 , Ом, пускового реостата : замеряем расстояние отрезка (4 – 6) в мм.

$$R_2 = m_R \cdot (4 - 6) ; \quad (2.8)$$

12. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3 , Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (6 – 8) в мм.

$$R_3 = m_R \cdot (6 - 8) ; \quad (2.9)$$

13. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_N , Ом, при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_N = \sum R = R_p + R_1 + R_2 + R_3 ; \quad (2.10)$$

Аналитический метод:

Так как стоит задача определить число и величину сопротивлений ступеней пускового реостата, следовательно, задаются M_1 и M_2 .

1. Задаёмся $M_1 = (0,8 - 0,85) M_{\text{макс}}$, $M_2 = (1 - 1,5) M_H$;

2. Определяем номинальное активное сопротивление R_{2H} , Ом, обмотки фазы ротора :

$$R_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} ; \quad (2.11)$$

3. Определяем активное сопротивление R_p , Ом, обмотки фазы ротора :

$$R_p = R_{2H} \cdot S_H ; \quad (2.12)$$

4. Определяем колебания момента при пуске :

$$\lambda = M_1 / M_2 ; \quad (2.13)$$

5. Определяем количество ступеней пускового реостата :

$$m = \frac{\lg \frac{M_H R_{2H}}{R_p M_1}}{\lg \lambda} ; \quad (2.14)$$

6. Принимаем m целым числом ;

7. Рассчитываем уточнённое значение λ :

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_{2H} M_H}{R_p M_1}} \quad (2.15)$$

8. Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата :

$$R_m = R_p (\lambda - 1) ; \quad (2.16)$$

$$R_{m-1} = R_p \cdot \lambda (\lambda - 1) = R_m \cdot \lambda ; \quad (2.17)$$

.....

$$R_1 = R_p \cdot \lambda^{m-1} (\lambda - 1) = R_2 \cdot \lambda ; \quad (2.18)$$

9. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_N , Ом, при полностью введённом пусковом реостате :

$$R_N = \sum R = R_p + R_1 + \dots + R_m, \quad (2.19)$$

Задача 2.2. Определить число и величины сопротивлений секций пускового реостата для АД с фазным ротором типа АИРФ200М4, имеющего следующие паспортные данные: $P_H = 22$ кВт; $n_c = 1500$ об/мин; $S_H = 2,5$ %; $\mu_{кр} = 2,5$; Данные ротора: $E_{2H} = 340$ В; $I_{2H} = 45$ А.

Графический метод:

1. Строим естественную механическую характеристику АД типа АИРФ200М4 по 3-м характерным точкам: А; В; С. (рисунок 2.4).
2. Рассчитываем координаты точек:
 - определяем синхронную скорость вращения:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30}; \quad (2.20)$$

$$\omega_c = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с};$$

3. Определяем номинальную частоту вращения n_H , об/мин:

$$n_H = n_c (1 - S_H); \quad (2.21)$$

$$n_H = 1500 (1 - 0,025) = 1462,5 \text{ об/мин};$$

4. Определяем номинальную скорость вращения ω_H , рад/с, электродвигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}; \quad (2.22)$$

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1462,5}{30} = 153 \text{ рад/с};$$

5. Определяем номинальный момент M_H , Н·м, электродвигателя:

$$M_H = 1000 \frac{P_H}{\omega_H}; \quad (2.23)$$

$$M_H = 1000 \frac{22}{153} = 143,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

6. Определяем максимальный (критический) момент $M_{\text{макс}}$, Н·м, электродвигателя:

$$M_{\text{макс}} = \mu_{\text{кр}} \cdot M_H; \quad (2.24)$$

$$M_{\text{макс}} = 2,5 \cdot 143,7 = 359,25 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

7. Определяем критическое скольжение $S_{\text{кр}}$, о.е. по формуле:

$$S_{\text{кр}} = S_H \left(\mu_{\text{кр}} + \sqrt{\mu_{\text{кр}}^2 - 1} \right); \quad (2.25)$$

$$S_{\text{кр}} = 0,025 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,12;$$

8. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{\text{кр}}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{\text{кр}} = \omega_c \left(1 - S_{\text{кр}} \right); \quad (2.26)$$

$$\omega_{\text{кр}} = 157 \left(1 - 0,12 \right) = 138,2 \text{ рад/с};$$

9. Определяем пусковой момент M_1 , Н·м, электродвигателя:

$$M_1 = 0,85 \cdot M_{\text{кр}}; \quad (2.27)$$

$$M_1 = 0,85 \cdot 359,25 = 305,4 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

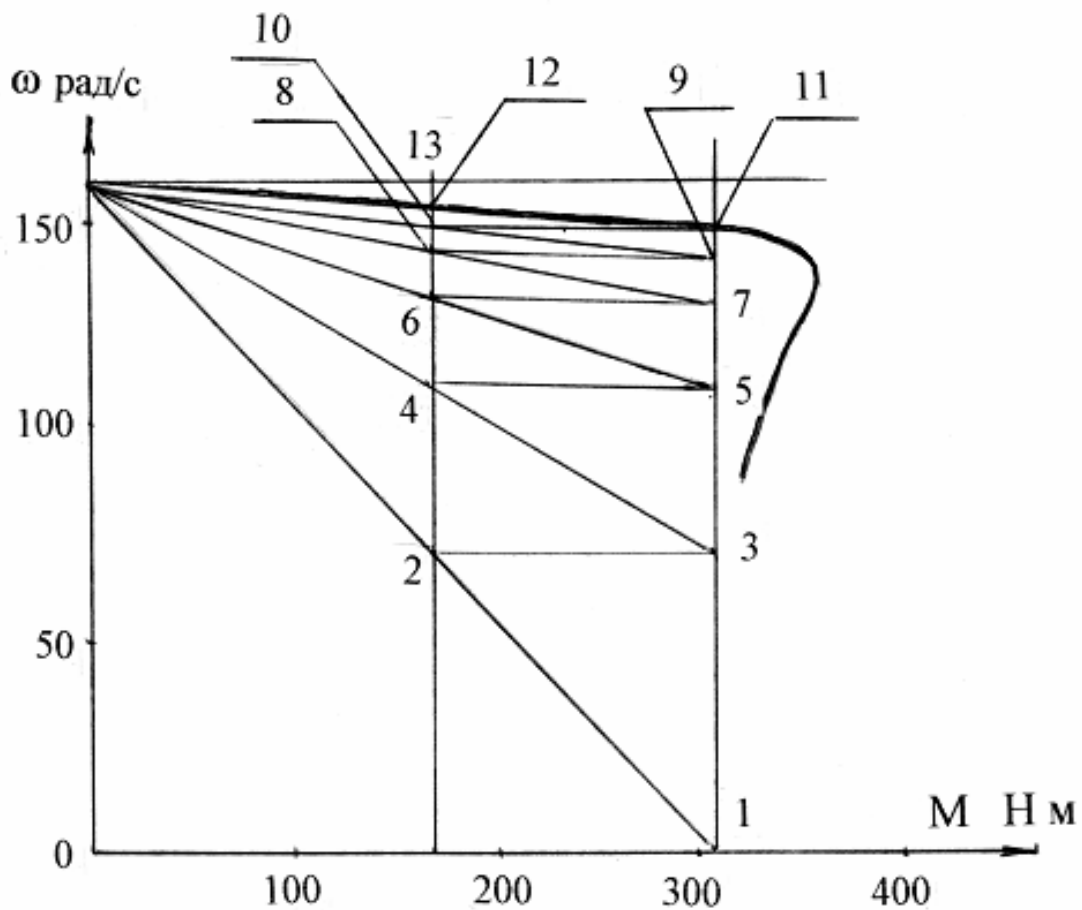


Рисунок 2.4- Пусковая диаграмма АД с фазным ротором типа АИРФ200М4

10. Определяем момент переключения M_2 , Н·м, электродвигателя

$$M_2 = (1 - 1,5) M_H ; \quad (2.28)$$

$$M_2 = 1,17 \cdot 143,7 = 168 \text{ Н·м} ;$$

11. Определяем номинальное активное сопротивление R_{2H} , Ом, обмотки фазы ротора :

$$R_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3}I_{2H}} ; \quad (2.29)$$

$$R_{2H} = \frac{340}{1,73 \cdot 45} = 4,36 \text{ Ом} ;$$

12. Определяем активное сопротивление R_p , Ом, обмотки фазы ротора:

$$R_p = R_{2H} \cdot S_H; \quad (2.30)$$

$$R_p = 4,36 \cdot 0,025 = 0,1 \text{ Ом};$$

13. Определяем масштаб m_R , Ом/мм, сопротивлений:

$$m_R = R_p / (12 - 13); \quad (2.31)$$

$$m_R = 0,1 / 2 = 0,05 \text{ Ом/мм};$$

14. Определяем величину сопротивления первой секции R_1 , Ом, пускового реостата:

$$R_1 = m_R \cdot (2 - 4); \quad (2.32)$$

$$R_1 = 0,05 \cdot 19 = 0,95 \text{ Ом};$$

15. Определяем величину сопротивления второй секции R_2 , Ом, пускового реостата:

$$R_2 = m_R \cdot (4 - 6); \quad (2.33)$$

$$R_2 = 0,05 \cdot 11 = 0,5 \text{ Ом};$$

16. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3 , Ом, пускового реостата:

$$R_3 = m_R \cdot (6 - 8); \quad (2.34)$$

$$R_3 = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ Ом};$$

17. Определяем величину сопротивления четвёртой секции R_4 , Ом, пускового реостата:

$$R_4 = m_R \cdot (8 - 10); \quad (2.35)$$

$$R_4 = 0,05 \cdot 3 = 0,15 \text{ Ом};$$

18. Определяем величину сопротивления пятой секции R_5 , Ом, пускового реостата :

$$R_5 = m_R \cdot (10 - 12); \quad (2.36)$$

$$R_5 = 0,05 \cdot 2 = 0,075 \text{ Ом};$$

19. Определяем суммарное сопротивление R_N , Ом, роторной цепи при полностью введённом пусковом реостате :

$$R_N = \sum R = R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5; \quad (2.37)$$

$$R_N = 0,1 + 0,95 + 0,5 + 0,25 + 0,15 + 0,072 = 2,02 \text{ Ом};$$

Аналитический метод :

1. *Дано :* $M_1 = 305,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_H = 143,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $R_p = 0,1 \text{ Ом}$;
 $M_2 = 168 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $R_{2H} = 4,36 \text{ Ом}$.

2. Определяем колебания момента при пуске :

$$\lambda = M_1 / M_2; \quad (2.38)$$

$$\lambda = 305,4 / 168 = 1,82;$$

3. Определяем количество ступеней m , шт, пускового реостата по формуле :

$$m = \frac{\lg \frac{M_H R_{2H}}{R_p M_1}}{\lg \lambda}; \quad (2.39)$$

$$m = \frac{\lg \frac{143,7 \cdot 4,36}{0,1 \cdot 305,4}}{\lg 1,82} = \frac{1,31}{0,26} = 5,03$$

4. Принимаем m целым числом: $m = 5$;
5. Рассчитываем уточнённое значение λ :

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{M_H \cdot R_{2H}}{R_p \cdot M_1}}; \quad (2.40)$$

$$\lambda = \sqrt[5]{\frac{143,7 \cdot 4,36}{0,1 \cdot 305,4}} = \sqrt[5]{20,5} = 1,83;$$

6. Определяем величины сопротивлений ступеней пускового реостата:

$$R_5 = R_p (\lambda - 1); \quad (2.41)$$

$$R_5 = 0,1 (1,83 - 1) = 0,083 \text{ Ом};$$

$$R_4 = R_5 \cdot \lambda; \quad (2.42)$$

$$R_4 = 0,083 \cdot 1,83 = 0,15 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_4 \cdot \lambda; \quad (2.43)$$

$$R_3 = 0,15 \cdot 1,83 = 0,27 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_3 \cdot \lambda; \quad (2.44)$$

$$R_2 = 0,27 \cdot 1,83 = 0,49 \text{ Ом};$$

$$R_1 = R_2 \cdot \lambda; \quad (2.45)$$

$$R_1 = 0,49 \cdot 1,83 = 0,896 \text{ Ом};$$

7. Определяем суммарное сопротивление роторной ΣR , Ом, цепи при полностью введённом пусковом реостате:

$$\Sigma R = R_p + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5; \quad (2.46)$$

$$\Sigma R = 0,1 + 0,896 + 0,49 + 0,27 + 0,15 + 0,083 = 1,989 \text{ Ом};$$

Примечание: Расхождение значений величин секций пускового реостата, полученных графическим методом и аналитическим объясняются тем, что аналитический метод предполагает, что рабочая часть механической характеристики АД с фазным ротором представляет собой прямую линию.

Рабочая часть механической характеристики АД с фазным ротором построенная по уравнению Клосса максимально приближена к прямой линии, поэтому и величины сопротивлений секций пускового реостата полученные графическим методом максимально приближены к величинам сопротивлений, рассчитанных аналитическим методом.

3 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

3.1 Обозначение ДПТ серии 4П

Двигатели постоянного тока стоят в 3–5 раз дороже, чем асинхронные короткозамкнутые двигатели, и требуют больших расходов на обслуживание. Поэтому они находят применение в тех случаях, когда их особые свойства (широкие пределы регулирования частоты вращения и возможность получения специальных механических характеристик) играют решающее значение. Постоянный ток для питания ДПТ получается с помощью генераторов постоянного тока или выпрямительных установок, преобразующих переменный ток в постоянный.

Двигатели постоянного тока серии 4П с высотами оси вращения 80, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 355, 450 мм с номинальными вращающими моментами от 1,2 до 15000 Н*м предназначены для регулируемых электроприводов, питаемых как от полупроводниковых преобразователей, так и от иных источников питания (генераторов, аккумуляторных батарей). Электродвигатели изготавливаются для различных отраслей народного хозяйства климатических исполнений УХЛ4, 04 по ГОСТ 15150-69 и для поставки на экспорт в страны с умеренным и тропическим климатом.

Структура условного обозначения :

4 П X₁ М С X₂X₃X₄ X₅ X₆ X₇ X₈X₉

4 – порядковый номер серии ;

- П** – наименование вида двигателя - постоянного тока ;
X₁ – исполнение по степени защиты и способу охлаждения :
 (**O** – закрытое с наружным обдувом от вентилятора на валу двигателя IP44, IСO141 ;
H – защищённое с самовентиляцией IP23, IСO1 ;
Ф – защищённое с независимой вентиляцией от постороннего источника ;
П – закрытое продуваемое от постороннего источника) ;
M - модификация ;
C - смешанное возбуждение ; отсутствие буквы **C** указывает на параллельное или независимое возбуждение ;
X₂ X₃ X₄ - высота оси вращения ;
X₅ - условная длина корпуса по МЭК 72 – 1 ;
X₆ - условная длина сердечника якоря (1 - первая длина ; 2 – вторая длина). Отсутствие цифры означает совпадение количества длин якорей и корпусов ;
X₇ - наличие тахогенератора : **Г** - с тахогенератором ; отсутствие буквы - без тахогенератора ;
X₈ - климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69 ;
X₉ - категория размещения по ГОСТ 15543-70.

3.2 Основные формулы, используемые при решении задач

Уравнение электрического равновесия цепи якоря электродвигателя постоянного тока (ДПТ) записывается следующим образом :

$$U = E + IR = K \Phi \omega + I (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) ; \quad (3.1)$$

- где **U** – напряжение, приложенное к цепи ДПТ, В ;
E – ЭДС, наведённая в обмотке якоря ДПТ, В ;
I - ток в цепи якоря ДПТ, А ;
R - общее сопротивление цепи якоря, Ом ;
K – безразмерный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами электродвигателя ;
Φ - магнитный поток ДПТ, Вб ;

ω - угловая скорость вращения якоря ДПТ, рад/с;

R_d - сопротивление добавочного резистора, включаемого последовательно в цепь якоря, Ом;

$R_{\text{я}}$ - внутреннее сопротивление цепи якоря ДПТ, состоящее из сопротивлений последовательно соединённых обмоток якоря $r_{\text{о.я.}}$, дополнительных полюсов $r_{\text{д.п.}}$ и компенсационной обмотки $r_{\text{к.о.}}$, щёточного контакта $r_{\text{щ}}$, а также сопротивления последовательной обмотки возбуждения $r_{\text{о.в.}}$ (для ДПТ последовательного возбуждения);

Внутреннее сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}}$, Ом, ДПТ с независимым возбуждением рассчитывается по формуле :

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 (1 - \eta_{\text{н}}) U_{\text{н}} / I_{\text{н}} = 0,5 (1 - \eta_{\text{н}}) R_{\text{н}}; \quad (3.2)$$

где $\eta_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $R_{\text{н}}$ - соответственно номинальные КПД, напряжение, В, ток, А, и сопротивление, Ом.

Электродвижущая сила $E_{\text{н}}$, В, (ЭДС), наведённая в обмотке ДПТ при номинальной скорости вращения $\omega_{\text{н}}$ и номинальном магнитном потоке $\Phi_{\text{н}}$ рассчитывается по формуле :

$$E_{\text{н}} = C_{\text{н}} \omega_{\text{н}} = U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{я}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{я}}; \quad (3.3)$$

где $C_{\text{н}}$ - коэффициент пропорциональности между ЭДС и скоростью вращения, а также между электромагнитным моментом и током якоря в ДПТ при неизменном магнитном потоке возбуждения $\Phi_{\text{н}}$.

Номинальный электромагнитный вращающий момент $M_{\text{э.н.}}$, Н·м, ДПТ рассчитывается по формуле :

$$M_{\text{э.н.}} = K \Phi_{\text{н}} I_{\text{н}} = C_{\text{н}} I_{\text{н}} = M_{\text{н}} + M_{\text{х.х.}}; \quad (3.4)$$

где $M_{\text{н}}$ - номинальный вращающий момент на валу электродвигателя, Н·м;

$M_{\text{х.х.}}$ - момент холостого хода (момент потерь) двигателя, Н·м.

Этот момент ($M_{x.x.}$) мал относительно момента на валу электродвигателя, поэтому в приближённых расчётах им можно пренебречь и считать, что момент на валу двигателя равен его электромагнитному моменту.

Уравнение электромеханической характеристики ДПТ независимого возбуждения (параллельного) записывается следующим образом:

$$\omega = (U - I R) / C = \omega_0 - \Delta \omega ; \quad (3.5)$$

где ω_0 —скорость якоря при идеальном холостом ходе ДПТ, рад/с;
 $\Delta \omega$ - статическое падение скорости якоря, рад/с.

Уравнение механической характеристики ДПТ независимого возбуждения записывается следующим образом:

$$\omega = U / C - MR / C^2 = \omega_0 - \Delta \omega ; \quad (3.6)$$

где M – вращающий момент на валу двигателя, Н·м,

Мощность, потребляемая двигателем из электрической сети $P_{э.н.}$, Вт, при номинальной нагрузке:

$$P_{э.н.} = U_n I_n = P_n / \eta_n = M_n \omega_n / \eta_n ; \quad (3.7)$$

где P_n – номинальная механическая мощность на валу электродвигателя, Вт;

ω_n - номинальная скорость вращения якоря, рад/с;

n_n – номинальная частота вращения электродвигателя, об /мин .

Номинальный вращающий момент M_n , Н·м, на валу электродвигателя:

$$M_n = 1000 \frac{P_n}{\omega_n} = 9555 \frac{P_n}{n_n} ; \quad (3.8)$$

Скорость вращения идеального холостого хода ω_0 , рад/с :

$$\omega_0 = U_H / C_H = \frac{\omega_H U_H}{U_H - I_H R_H} = \frac{U_H \omega_H}{E_H} ; \quad (3.9)$$

Полные потери мощности ΔP_H , Вт, в двигателе при $P = P_H$:

$$\Delta P_H = P_{э.н.} - P_H = P_H \left(\frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right) ; \quad (3.10)$$

Задача 3.1. Для ДПТ независимого возбуждения, используя следующие его паспортные (номинальные) данные : $P_H = 2,5$ кВт; $U_H = 110$ В ; $\eta_H = 72\%$; $n_H = 1000$ об /мин, определить величины, характеризующие его работу в номинальном режиме, и построить естественную механическую характеристику.

Решение :

1. Определяем номинальный ток I_H , А, электродвигателя :

$$I_H = 1000 \frac{P_H}{U_H \eta_H} ; \quad (3.11)$$

$$I_H = 1000 \frac{2,5}{110 \cdot 0,72} = 31,6 \text{ А} ;$$

2. Определяем номинальное сопротивление R_H , Ом, электродвигателя:

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} ; \quad (3.12)$$

$$R_H = \frac{110}{31,6} = 3,48 \text{ Ом} ;$$

3. Определяем внутреннее сопротивление цепи якоря $R_{я}$, Ом по формуле:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 R_{\text{н}} (1 - \eta_{\text{н}}); \quad (3.13)$$

$$R_{\text{я}} = 0,5 \cdot 3,48 (1 - 0,72) = 0,487 \text{ Ом};$$

4. Определяем потерю напряжения $\Delta U_{\text{я}}$, В, в цепи якоря:

$$\Delta U_{\text{я}} = I_{\text{н}} R_{\text{я}}; \quad (3.14)$$

$$\Delta U_{\text{я}} = 31,6 \cdot 0,487 = 15,4 \text{ В};$$

5. Определяем номинальную ЭДС $E_{\text{н}}$, В, якоря:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{я}}; \quad (3.15)$$

$$E_{\text{н}} = 110 - 15,4 = 94,6 \text{ В};$$

6. Определяем номинальную скорость вращения $\omega_{\text{н}}$, рад/с, якоря:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30}; \quad (3.16)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с};$$

7. Определяем номинальный вращающий момент $M_{\text{н}}$, Н·м, на валу электродвигателя:

$$M_{\text{н}} = 1000 \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}; \quad (3.17)$$

$$M_{\text{н}} = 1000 \frac{2,5}{105} = 23,8 \text{ Н·м};$$

8. Определяем номинальную мощность $P_{\text{э.н}}$, кВт, потребляемую электродвигателем из электрической сети:

$$P_{\text{э.н.}} = \frac{P_{\text{н.}}}{\eta_{\text{н.}}}; \quad (3.18)$$

$$P_{\text{э.н.}} = \frac{2,5}{0,72} = 3,47 \text{ кВт};$$

9. Определяем полные номинальные потери мощности $\Delta P_{\text{н.}}$, кВт, в электродвигателе:

$$\Delta P_{\text{н.}} = P_{\text{н.}} \left(\frac{1 - \eta_{\text{н.}}}{\eta_{\text{н.}}} \right); \quad (3.19)$$

$$\Delta P_{\text{н.}} = 2,5 \frac{1 - 0,72}{0,72} = 0,97 \text{ кВт};$$

10. Определяем скорость идеального холостого хода ω_0 , рад/с, при номинальном напряжении:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н.}} \omega_{\text{н.}}}{E_{\text{н.}}}; \quad (3.20)$$

$$\omega_0 = \frac{110 \cdot 105}{94,6} = 122 \text{ рад/с};$$

11. Определяем коэффициент пропорциональности $C_{\text{н.}}$, Вб:

$$C_{\text{н.}} = \frac{E_{\text{н.}}}{\omega_{\text{н.}}}; \quad (3.21)$$

$$C_{\text{н.}} = \frac{94,6}{105} = 0,9 \text{ Вб};$$

12. Определяем номинальный электромагнитный момент $M_{\text{э.н.}}$, Н·м, по формуле:

$$M_{\text{э.н.}} = C_{\text{н.}} I_{\text{н.}}; \quad (3.22)$$

$$M_{э.н.} = 0,9 \cdot 31,6 = 28,4 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

13. Определяем перепад скорости вращения:

$$\delta_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{122 - 105}{122} = 0,14 \quad ; \quad (3.23)$$

14. Определяем момент холостого хода $M_{х.х.}$, Н·м, (момент потерь):

$$M_{х.х.} = M_{э.н.} - M_n; \quad (3.24)$$

$$M_{х.х.} = 28,4 - 23,8 = 4,6 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

15. Определяем скорость вращения $\omega_{х.х.}$, рад/с, реального холостого хода:

$$\omega_{х.х.} = \frac{U_n}{C_n} - M_{х.х.} \frac{R_{я}}{C_n^2}; \quad (3.25)$$

$$\omega_{х.х.} = \frac{110}{0,9} - 4,6 \frac{0,487}{0,81} = 119,2 \text{ рад/с};$$

Анализируя уравнение (3.6), можно сделать вывод о том, что механическая характеристика ДПТ параллельного или независимого возбуждения при $U = \text{const}$; $\Phi = \text{const}$; $R = \text{const}$ представляет собой прямую линию.

Для построения естественной механической характеристики ДПТ независимого возбуждения в двигательном режиме достаточно знать две точки с координатами: А ($M = 0; \omega = \omega_0$); В ($M = M_n; \omega = \omega_n$), (рисунок 3.1).

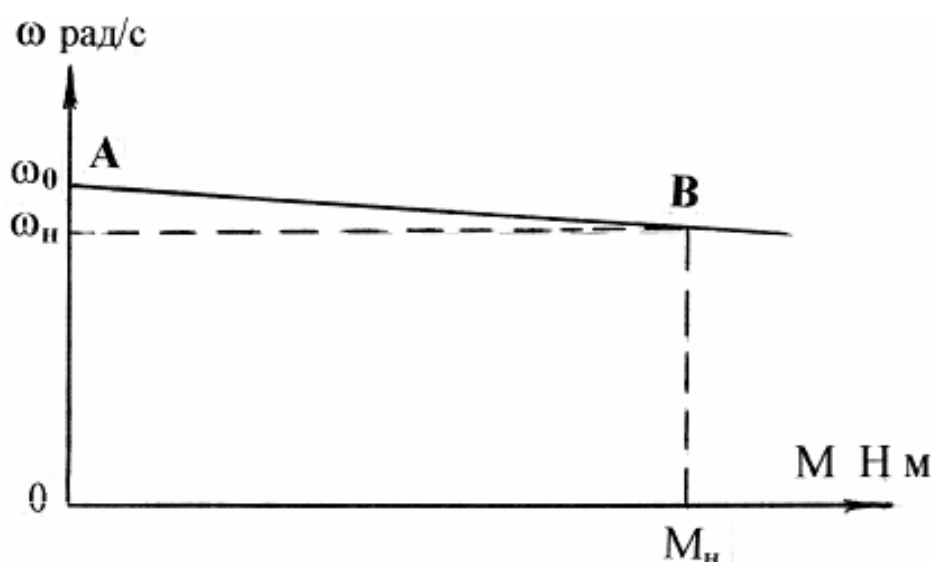


Рисунок 3.1- Построение естественной механической характеристики ДПТ независимого возбуждения

3.3 Определение количества и величины секций пускового резистора ДПТ с независимым возбуждением

Двигатель постоянного тока (ДПТ) запускается при полностью введённом пусковом резисторе (реостате), который служит для ограничения пускового тока при подаче номинального напряжения в якорную цепь. Пусковой ток ($I_{\text{пуск}}$) превышает номинальный ток (I_n) в 30 – 40 раз, поэтому без пускового реостата обмотки ДПТ сгорят. Пусковой реостат состоит из секций.

Определить количество и величины сопротивлений секций пускового реостата можно графическим и аналитическим способами.

Графический метод:

Для определения количества и величины секций пускового реостата графическим способом необходимо построить пусковую диаграмму ДПТ с независимым возбуждением (рисунок 3.2).

- 1). Строим естественную механическую характеристику ДПТ НВ по двум точкам: А и В;
- 2). Определяем искусственный пусковой момент M_1 , Н·м, согласно законов коммутации:

$$M_1 = (2 - 2,5) M_H; \quad (3.26)$$

3). Определяем момент переключения M_2 , Н·м, секций пускового реостата:

$$M_2 = (1,1 - 1,5) M_H; \quad (3.27)$$

4). Строим прямые $M = M_1$ и $M = M_2$;

5). Соединяем точку 1 и точку А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 2, из точки 2 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 3; соединяем точку 3 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 4, из точки 4 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 5; соединяем точку 5 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 6, из точки 6 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 7.

(Цифра 7 обязательно должна находиться на пересечении естественной механической характеристики ДПТ и прямой $M = M_1$ –

- это может быть достигнуто путём подбора коэффициентов от 1 до 1,5 у момента переключения M_2 и коэффициентов от 2,0 до 2,5 у пускового момента M_1). По пусковой диаграмме определяем количество ступеней пускового реостата (m).

Согласно рисунка 3.2. $m = 3$.

6). Проводим прямую $\omega = \omega_0$ параллельную оси моментов и обозначаем точку пересечения с прямой $M = M_2$ цифрой 9, точку пересечения механической характеристики с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 8, а точку пересечения прямых $M = M_1$ и $\omega = \omega_0$ цифрой 10.

7). Определяем масштаб m_R , Ом/мм, сопротивлений: измеряем расстояние отрезка (7 – 10) в мм.

$$m_R = R_{\pi} / (7 - 10); \quad (3.28)$$

8). Определяем величину сопротивления первой секции R_1 , Ом, пускового реостата: измеряем расстояние отрезка (1 – 3) в мм.

$$R_1 = m_R \cdot (1 - 3); \quad (3.29)$$

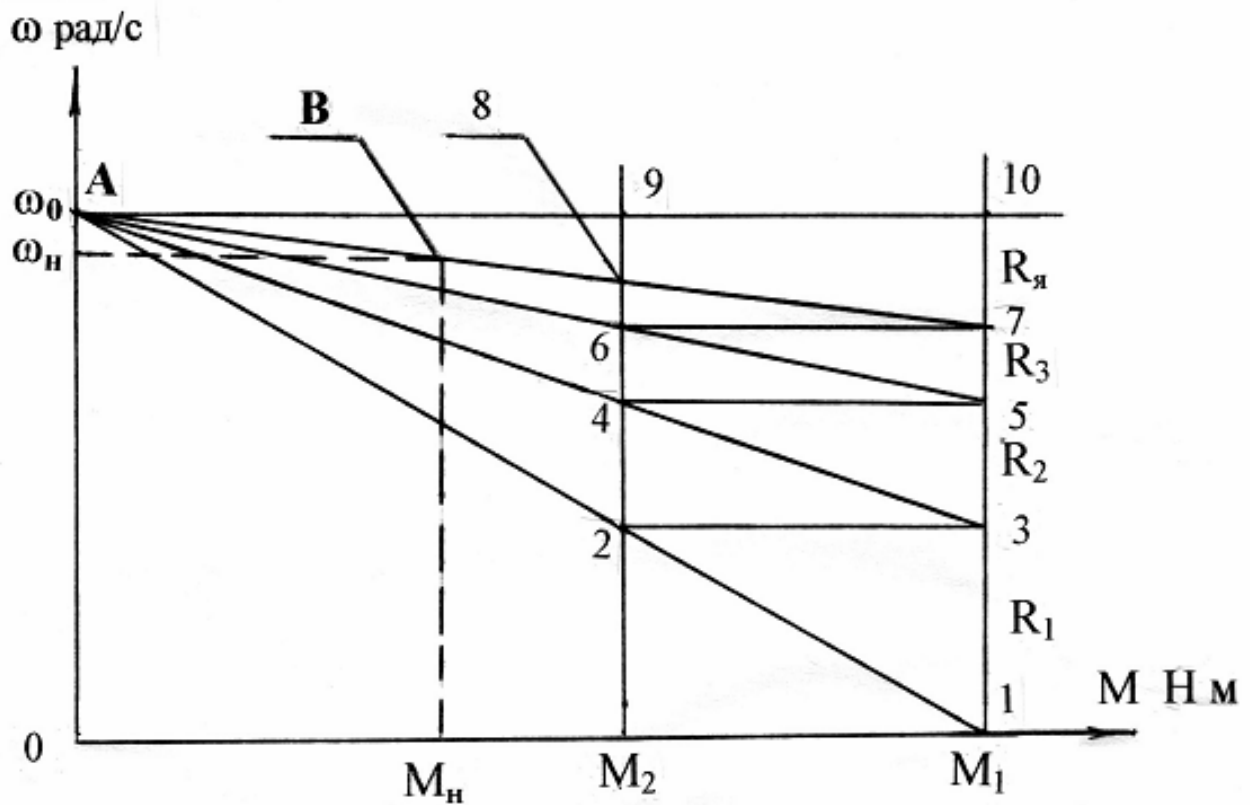


Рисунок 3.2-Пусковая диаграмма ДПТ независимого возбуждения

9). Определяем величину сопротивления второй секции R_2 , Ом, пускового реостата : замеряем расстояние отрезка (3 – 5) в мм.

$$R_2 = m_R \cdot (3 - 5); \quad (3.30)$$

10). Определяем величину сопротивления третьей секции R_3 , Ом, пускового реостата : замеряем расстояние отрезка (5 – 7) в мм.

$$R_3 = m_R \cdot (5 - 7); \quad (3.31)$$

11). Определяем суммарное сопротивление ΣR , Ом, якорной цепи при полностью введённом пусковом реостате :

$$\Sigma R = R_{\text{я}} + R_1 + R_2 + R_3; \quad (3.32)$$

Аналитический метод:

При аналитическом методе расчёта сначала определяется колебание момента при пуске λ .

а). Если заданы число ступеней m и момент переключения при пуске M_2 :

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{M_{\text{н}} R_{\text{н}}}{R_{\text{я}} M_2}}, \quad (3.33)$$

б). Если заданы число ступеней m и максимальный момент при пуске M_1 :

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{M_{\text{н}} R_{\text{н}}}{R_{\text{я}} M_1}}, \quad (3.34)$$

с). Если заданы M_1 и M_2 , сначала определяется $\lambda = M_1/M_2$, а затем определяется число пусковых ступеней :

$$m = \frac{\lg \frac{M_{\text{н}} R_{\text{н}}}{R_{\text{я}} M_1}}{\lg \lambda}, \quad (3.35)$$

Так как стоит задача определить число и величину сопротивлений ступеней пускового реостата, следовательно, задаются M_1 и M_2 .

- 1). Задаёмся $M_1 = (2 - 2,5) M_{\text{н}}$, соответственно $I_1 = (2 - 2,5) I_{\text{н}}$, А; $M_2 = (1,1 - 1,5) M_{\text{н}}$;

где I_1 – пусковой ток ДПТ НВ соответствующий M_1 .

- 2). Определяем сопротивление цепи якоря $R_{\text{н}}$, Ом, при полностью включённом пусковом резисторе :

$$R_{\text{н}} = \sum R = \frac{U_{\text{н}}}{I_1}; \quad (3.36)$$

$$R_N = \frac{M_H R_H}{M_1}; \quad (3.37)$$

3). Определяем колебания момента (тока) при пуске :

$$\lambda = M_1 / M_2; \quad (3.38)$$

4). Определяем количество ступеней пускового реостата :

$$m = \frac{\lg \frac{R_N}{R_{\Sigma}}}{\lg \lambda}; \quad (3.39)$$

5). Принимаем m целым числом ;

6). Рассчитываем уточнённое значение λ :

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_N}{R_{\Sigma}}}; \quad (3.40)$$

7). Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата :

$$R_m = R_{\Sigma} (\lambda - 1); \quad (3.41)$$

$$R_{m-1} = R_{\Sigma} \cdot \lambda (\lambda - 1) = R_m \cdot \lambda; \quad (3.42)$$

.....

$$R_1 = R_{\Sigma} \cdot \lambda^{m-1} (\lambda - 1) = R_2 \cdot \lambda; \quad (3.43)$$

Задача 3.2. Определить графически и аналитически величины и число ступеней пускового реостата для ДПТ НВ типа 4ПНМ180L, имеющего следующие паспортные данные :

$P_H = 10$ кВт ; $U_H = 220$ В ; $I_H = 53$ А ; $n_H = 1100$ об/мин ; $\eta_H = 83,6\%$.

Решение :

1. Определяем внутреннее сопротивление R_{Σ} , Ом, цепи якоря :

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 (1 - \eta_{\text{н}}) \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}; \quad (3.44)$$

$$R_{\text{я}} = 0,5 (1 - 0,836) \frac{220}{53} = 0,34 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{н}} = U_{\text{н}} / I_{\text{н}}; \quad (3.45)$$

$$R_{\text{н}} = 220 / 53 = 4,15 \text{ Ом};$$

2. Определяем номинальную скорость вращения $\omega_{\text{н}}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi n_{\text{н}}}{30}; \quad (3.46)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{3,14 \cdot 1100}{30} = 115,1 \text{ рад/с};$$

3. Определяем скорость вращения идеального холостого хода ω_0 , рад/с, ДПТ:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}}}{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}}}; \quad (3.47)$$

$$\omega_0 = \frac{220 \cdot 115,1}{220 - 53 \cdot 0,34} = 124,3 \text{ рад/с};$$

4. Определяем коэффициент пропорциональности:

$$C_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}; \quad (3.48)$$

$$C_{\text{н}} = \frac{220 - 53 \cdot 0,34}{115,1} = 1,7;$$

5. Определяем номинальный электромагнитный момент $M_{\text{н}}$, Нм,:

$$M_H = C_H \cdot I_H ; \quad (3.49)$$

$$M_H = 1,7 \cdot 53 = 90 \text{ Н}\cdot\text{м} ;$$

6. Определяем пусковой момент M_1 , Н·м, (задаёмся крайним правым пределом - 2,5) :

$$M_1 = 2,5 \cdot M_H ; \quad (3.50)$$

$$M_1 = 2,5 \cdot 90 = 225 \text{ Н}\cdot\text{м} ;$$

7. Строим пусковую диаграмму ДПТ, варьируя пределами M_2 от 1,1 до 1,5, устанавливаем истинное значение коэффициента- 1,5 и количество ступеней пускового реостата.

Согласно рисунка 3.3 : $m = 3$.

8. Определяем момент M_2 , Н·м, переключения :

$$M_2 = 1,5 \cdot M_H ; \quad (3.51)$$

$$M_2 = 1,5 \cdot 90 = 135 \text{ Н}\cdot\text{м} ;$$

9. Определяем масштаб m_R , Ом/мм, сопротивлений :

$$m_R = R_{\Sigma} / (7 - 10) ; \quad (3.52)$$

$$m_R = 0,34 / 13 = 0,027 \text{ Ом} / \text{мм} ;$$

10. Определяем величину сопротивления первой ступени (секции) R_1 , Ом, пускового реостата:

$$R_1 = m_R \cdot (1 - 3) ; \quad (3.53)$$

$$R_1 = 0,027 \cdot 25 = 0,67 \text{ Ом} ;$$

11. Определяем величину сопротивления второй ступени R_2 , Ом, пускового реостата :

$$R_2 = m_R \cdot (3 - 5); \quad (3.54)$$

$$R_2 = 0,027 \cdot 15 = 0,4 \text{ Ом};$$

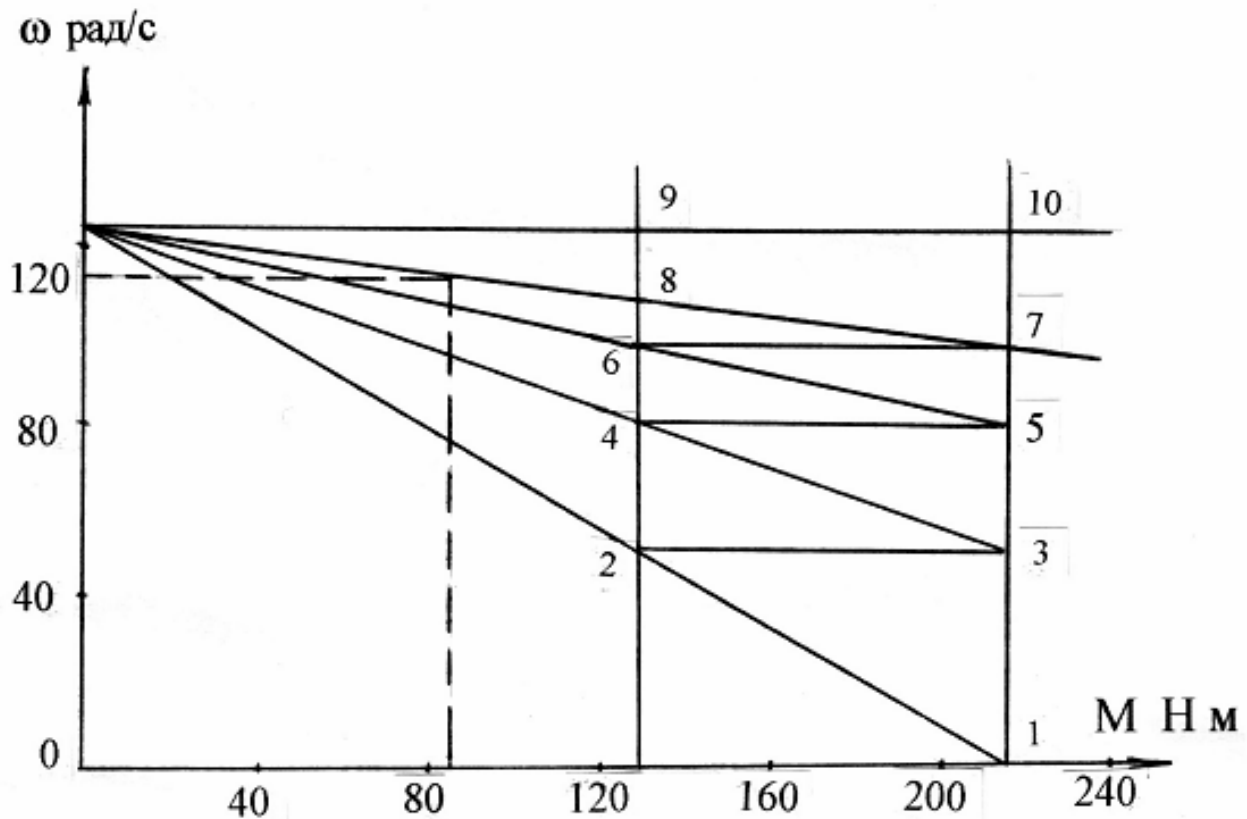


Рисунок 3.3 - Пусковая диаграмма ДПТ типа 4ПНМ180L

12. Определяем величину сопротивления третьей ступени R_3 , Ом, пускового реостата :

$$R_3 = m_R \cdot (5 - 7); \quad (3.55)$$

$$R_3 = 0,027 \cdot 9 = 0,24 \text{ Ом};$$

13. Определяем суммарное сопротивление ΣR , Ом, якорной цепи:

$$\Sigma R = R_{\text{я}} + R_1 + R_2 + R_3; \quad (3.56)$$

$$\Sigma R = 0,34 + 0,67 + 0,4 + 0,24 = 1,65 \text{ Ом};$$

Аналитический метод :

- 1). Задаёмся $M_1 = 2,5 \cdot M_H = 225 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_2 = 1,5 \cdot M_H = 135 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
 $I_1 = 2,5 \cdot I_H = 132,5 \text{ А}$;
- 2). Определяем сопротивление цепи якоря R_N , Ом, при полностью включённом пусковом резисторе :

$$R_N = \frac{U_H}{I_1} ; \quad (3.57)$$

$$R_N = \frac{220}{132,5} = 1,66 \text{ Ом} ;$$

$$R_N = \frac{M_H R_H}{M_1} ; \quad (3.58)$$

$$R_N = \frac{90 \cdot 4,15}{225} = 1,66 \text{ Ом} ;$$

- 3). Определяем колебания момента при пуске :

$$\lambda = M_1 / M_2 ; \quad (3.59)$$

$$\lambda = 225 / 135 = 1,66 ;$$

- 4). Определяем количество ступеней пускового реостата :

$$m = \frac{\lg \frac{R_N}{R_{я}}}{\lg \lambda} ; \quad (3.60)$$

$$m = \frac{\lg \frac{1,66}{0,34}}{\lg 1,66} = \frac{0,68}{0,22} = 3,09 ;$$

- 5). Принимаем $m = 3$; рассчитываем уточнённое значение λ :

$$\lambda = m \sqrt[m]{\frac{R_N}{R_{я}}} ; \quad (3.61)$$

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{1,66}{0,34}} = 1,69;$$

6. Определяем величины сопротивлений ступеней пускового реостата :

$$R_3 = R_x (\lambda - 1); \quad (3.62)$$

$$R_3 = 0,34 (1,69 - 1) = 0,24 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_3 \cdot \lambda; \quad (3.63)$$

$$R_2 = 0,24 \cdot 1,69 = 0,4 \text{ Ом};$$

$$R_1 = R_2 \cdot \lambda; \quad (3.64)$$

$$R_1 = 0,4 \cdot 1,69 = 0,67 \text{ Ом};$$

Анализ результатов расчёта показывает, что графический метод расчёта пусковых резисторов ДПТ независимого возбуждения более прост и нагляден, но менее точен, чем аналитический.

4 МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

При выборе параметров электродвигателя, приводящего в движение рабочую машину, очень важно разрешение вопроса о совместном действии вращающего момента, развиваемого электродвигателем, и момента сопротивления рабочей машины.

4.1 Статические и динамические нагрузки

Вращающий момент. Соотношение между полезной мощностью электродвигателя $P_{дв}$, Вт, его вращающим моментом $M_{дв}$, Н·м, и скоростью вращения $\omega_{дв}$, рад/с, определяется следующей зависимостью :

$$P_{дв} = M_{дв} \cdot \omega_{дв}, \quad (4.1)$$

Если вал электродвигателя соединён непосредственно с валом рабочей машины, то частота вращения вала электродвигателя равна частоте вращения вала рабочей машины, и мощность, развиваемая электродвигателем в установившемся режиме, равна мощности, потребляемой рабочей машиной P_m , Вт, то есть :

$$P_{дв} = P_m, \quad (4.2)$$

Эту мощность на валу, на основании формулы (4.1), можно выразить произведением момента на скорость вращения :

$$M_{дв} \cdot \omega_{дв} = M_c \cdot \omega_m, \quad (4.3)$$

где M_c – момент сопротивления рабочей машины, Н·м;

ω_m – скорость вращения рабочей машины, рад/с;

следовательно, $M_{дв} = M_c$, (4.4)

Момент сопротивления, приложенный к валу электродвигателя со стороны рабочей машины M_c , в установившемся режиме работы называется *статическим моментом сопротивления*. При неизменной скорости вращения и неизменной нагрузки момент статического сопротивления является величиной постоянной.

Если же скорость вращения системы, состоящей из электродвигателя и рабочей машины, изменяется, то в этом случае появляется динамическая нагрузка $P_{дин}$, Вт, которая определяется по формуле :

$$P_{дв} - P_m = P_{дин}, \quad (4.5)$$

Это уравнение мощностей справедливо при вращении системы с любой скоростью вращения.

Динамическую нагрузку $P_{дин}$, Вт, можно выразить через динамический момент $M_{дин}$, Н·м и скорость вращения вала электродвигателя :

$$P_{дин} = M_{дин} \cdot \omega; \quad (4.6)$$

В свою очередь динамический момент можно определить по формуле :

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{сист.}} \frac{d\omega}{dt}; \quad (4.7)$$

где $J_{\text{сист.}}$ – момент инерции системы, приведённый к валу электродвигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение системы, $\text{рад}/\text{с}^2$.

4.2 Основное уравнение движения электропривода

Механическая энергия, развиваемая электродвигателем при работе электропривода, расходуется на преодоление сопротивления рабочей машины.

При вращательном движении уравнение движения можно записать следующим образом :

$$M_{\text{дв.}} - M_{\text{с}} = M_{\text{дин.}} = J_{\text{сист.}} \frac{d\omega}{dt} ; \quad (4.8)$$

где $M_{\text{дв.}}$ - вращающий момент, развиваемый электродвигателем, Н·м;

$M_{\text{с}}$ – момент сопротивления рабочей машины, Н·м;

$M_{\text{дин.}}$ – динамический момент, Н·м;

$J_{\text{сист.}}$ – момент инерции системы, приведённый к валу электродвигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение системы, $\text{рад}/\text{с}^2$.

Динамический момент - $M_{\text{дин}}$ появляется только во время переходных режимов, когда изменяется угловая скорость.

При поступательном движении уравнение движения системы по аналогии с вращательным движением можно записать следующим образом :

$$F - F_{\text{с}} = m \frac{dv}{dt} , \quad (4.9)$$

где F – движущая сила, Н ;

- F_c – сила статического сопротивления, Н;
 v – скорость поступательного движения, м/с;
 m – масса движущего груза, кг;
 $m \frac{dv}{dt}$ – динамическая сила, Н.

4.3 Приведение моментов сопротивления рабочей машины к валу электродвигателя

Когда вал рабочей машины соединён непосредственно с валом электродвигателя, рабочая машина и вал электродвигателя вращаются с одинаковой угловой скоростью, в этом случае никакого приведения моментов не требуется.

Если рабочая машина соединена с электродвигателем при помощи передачи, то скорость вращения вала машины ω_M , рад/с, отличается от скорости вращения вала электродвигателя $\omega_{дв}$, рад/с, поэтому момент сопротивления рабочей машины M_M необходимо привести к скорости вращения вала электродвигателя.

Если рабочая машина совершает вращательное движение, то момент сопротивления рабочей машины $M_{с.н.}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя, определяется по формуле :

$$M_{с.н.} = \frac{M_M}{i \cdot \eta_{п}}, \quad (4.10)$$

где M_M – момент сопротивления рабочей машины относительно своего вала, Н·м;

i – передаточное отношение редуктора (передачи);

$\eta_{п}$ – коэффициент полезного действия редуктора (передачи);

Передаточное отношение редуктора определяется по формуле :

$$i = \frac{\omega_{дв}}{\omega_M}; \quad (4.11)$$

где $\omega_{дв}$ – угловая скорость вращения вала электродвигателя, рад/с;

ω_M – угловая скорость вращения вала рабочей машины, рад/с;

Если передача от электродвигателя к рабочей машине состоит из нескольких звеньев, то общее передаточное отношение передачи от электродвигателя к рабочей машине равняется произведению передаточных отношений отдельных звеньев :

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 ; \quad (4.12)$$

аналогично, общий коэффициент полезного действия передачи, состоящей из нескольких звеньев, определяется :

$$\eta_{\text{п}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 ; \quad (4.13)$$

Если рабочая машина совершает поступательное движение, то момент сопротивления рабочей машины $M_{\text{с.н}}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя, определяется по формуле :

$$M_{\text{с.н}} = \frac{F \cdot v}{\omega_{\text{дв.}} \cdot \eta_{\text{п}}} ; \quad (4.14)$$

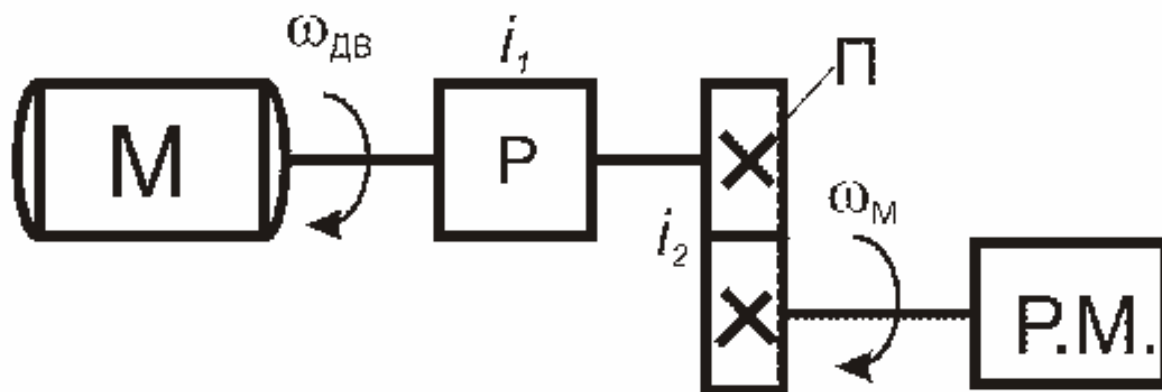
где F – сила сопротивления рабочей машины, обусловленная массой груза m , кг;

v – скорость поступательного движения груза, м/с ;

$$F = 9,81 \cdot m \cdot f_{\text{тр.}} ; \quad (4.15)$$

где $f_{\text{тр.}}$ – коэффициент трения ;

Задача 4.1 Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_c = 1500$ об/мин, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 4.1.



М- электродвигатель; Р- редуктор; П- клиноремённая передача; P.M.-рабочая машина; i_1 – передаточное отношение редуктора, i_2 - передаточное отношение клиноремённой передачи; $\omega_{дв}$ – угловая скорость вращения вала электродвигателя; $\omega_{м}$ - угловая скорость вращения вала рабочей машины.

Рисунок 4.1 – Кинематическая схема системы «электродвигатель-рабочая машина»

Момент сопротивления на валу рабочей машины: $M_{м} = 1200 \text{ Н}\cdot\text{м}$; Передаточное отношение редуктора $i_1 = 28$; передаточное отношение клиноремённой передачи $i_2 = 2$; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,86$; к.п.д. клиноремённой передачи $\eta_{пер} = 0,8$.

Решение :

1. Определяем скорость вращения $\omega_{дв}$, рад/с, электродвигателя :

$$\omega_{дв} = \frac{\pi \cdot n_c}{30}, \tag{4.16}$$

$$\omega_{дв} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с};$$

2. Определяем общее передаточное отношение :

$$i = i_1 \cdot i_2 = 28 \cdot 2 = 56; \tag{4.17}$$

3. Определяем общий к.п.д. системы :

$$\eta_{п.} = \eta_p \cdot \eta_{пер} = 0,86 \cdot 0,8 = 0,69; \tag{4.18}$$

4. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{с.н.}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя:

$$M_{с.н.} = \frac{M_{\Sigma}}{i \cdot \eta_{\Sigma}} = \frac{1200}{56 \cdot 0,69} = 31 \text{ Н·м}; \quad (4.19)$$

5. Определяем расчётную мощность $P_{расч.}$, Вт, электродвигателя:

$$P_{расч.} = M_{с.н.} \cdot \omega_{дв} = 31 \cdot 157 = 4867 \text{ Вт}. \quad (4.20)$$

Задача 4.2. Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_c = 1000$ об/мин, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 4.2.

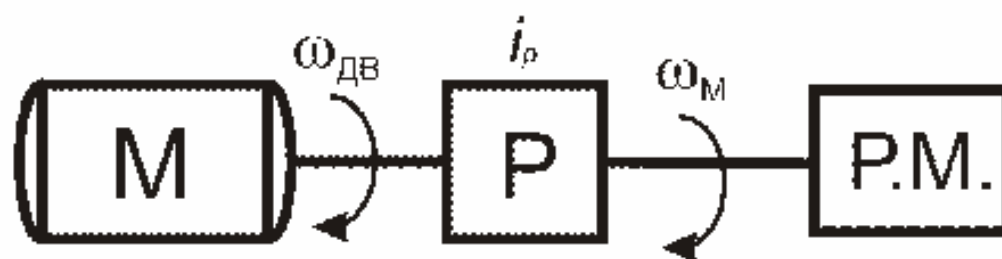


Рисунок 4.2 – Кинематическая схема системы «электродвигатель-рабочая машина»

Рабочая машина совершает поступательное движение и проходит расстояние $S = 6$ метров за 40 секунд; к.п.д. редуктора $\eta_p = 0,66$; Усилие необходимое для передвижения механизма $F = 36000$ Н.

Решение :

1. Определяем скорость вращения $\omega_{дв}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{дв} = \frac{\pi \cdot n_c}{30}; \quad (4.21)$$

$$\omega_{дв} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с};$$

2. Определяем скорость поступательного движения v , м/с, рабочей машины :

$$v = \frac{S}{t}; \quad (4.22)$$

$$v = \frac{6}{40} = 0,15 \text{ м/с};$$

3. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{с.н.}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя:

$$M_{с.н.} = \frac{F \cdot v}{\omega_{дв.} \cdot \eta_{п}}; \quad (4.23)$$

$$M_{с.н.} = \frac{36000 \cdot 0,15}{105 \cdot 0,66} = 78 \text{ Н·м};$$

4. Определяем расчётную мощность $P_{расч.}$, Вт, электродвигателя:

$$P_{расч.} = M_{с.н.} \cdot \omega_{дв.}; \quad (4.24)$$

$$P_{расч.} = 78 \cdot 105 = 8190 \text{ Вт}.$$

4.4 Приведение моментов инерции рабочей машины к валу электродвигателя

Момент инерции системы $J_{сист.}$, кг·м², «электродвигатель-рабочая машина», включающего в себя редуктор определяется по формуле:

$$J_{сист.} = J_{дв.} + J_{р.} + J_{м.}, \quad (4.25)$$

где $J_{дв.}$ – момент инерции электродвигателя, кг·м²; (даётся в паспорте электродвигателя);

$J_{р.}$ – момент инерции редуктора, кг·м²;

$J_{м.}$ – момент инерции рабочей машины, приведённый к валу электродвигателя, кг·м²;

$$J_{р.} = 1,1 \cdot J_{дв.}; \quad (4.26)$$

Для вращательного движения рабочей машины её момент инерции, приведённый к валу электродвигателя J_M , кг·м², определяется по формуле:

$$J_M = \frac{J_c}{i^2}, \text{ или } J_M = J_c \cdot \frac{\omega_x^2}{\omega_{дв}^2}, \quad (4.27)$$

где J_c – момент инерции рабочей машины на своём валу, кг·м²;
 ω_M – скорость вращения вала рабочей машины, рад/с;
 $\omega_{дв}$ – скорость вращения вала электродвигателя, рад/с;

Для поступательного движения рабочей машины её момент инерции, приведённый к валу электродвигателя J_M , кг·м², определяется по формуле:

$$J_M = m \cdot \frac{v^2}{\omega_{дв}^2}, \quad (4.28)$$

где m – масса поступательно движущихся частей рабочей машины, кг;
 v – скорость поступательного движения рабочей машины, м/с;
 $\omega_{дв}$ – скорость вращения вала электродвигателя, рад/с;

Если рабочая машина включает поступательно и вращательно движущиеся части, то приведённый к валу электродвигателя момент инерции J_M , кг·м², определяется по формуле:

$$J_M = J_c \cdot \frac{\omega_x^2}{\omega_{дв}^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega_{дв}^2}; \quad (4.29)$$

Задача 4.3. Определить расчётную мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором и момент инерции системы «электродвигатель- механизм подъёмной лебёдки», кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.3.

Дано:

Скорость вращения приводного электродвигателя $\omega_{дв} = 157$ рад/с;
 момент инерции электродвигателя $J_{дв} = 0,08$ кг·м²; к.п.д. передачи $\eta_{п} = 0,92$; масса барабана $m_b = 1400$ кг; радиус барабана $R = 1,25$ м;
 масса груза $m_{гр} = 200$ кг; скорость поступательного движения груза $v = 0,22$ м/с; коэффициент трения $f_{тр} = 0,66$.

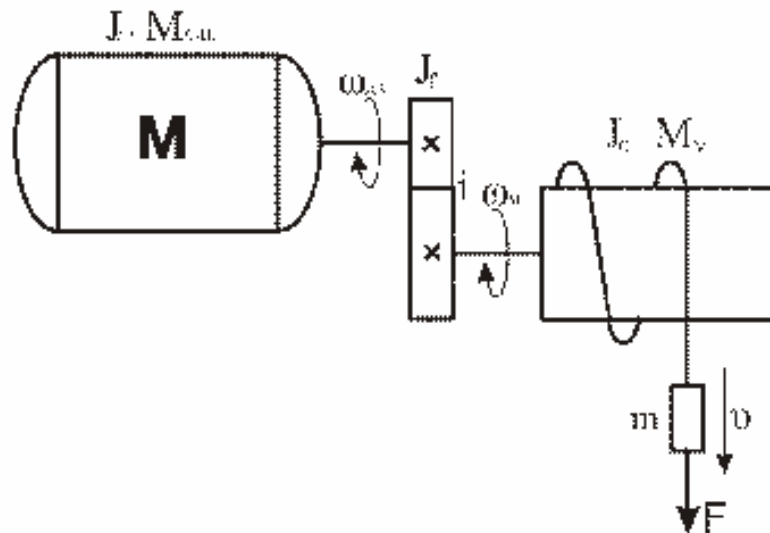


Рисунок 4.3- Кинематическая схема системы «электродвигатель-подъёмная лебёдка»

Решение :

1. Определяем момент инерции барабана относительно своей оси $J_{\text{бар}}$, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, как для сплошного цилиндра :

$$J_{\text{бар}} = m_{\text{б}} \cdot \rho^2 = m_{\text{б}} \cdot \frac{R^2}{2} ; \quad (4.30)$$

- где $m_{\text{б}}$ - масса барабана, кг ;
 ρ - радиус инерции сплошного цилиндра, м;
 R - радиус барабана, м ;

$$J_{\text{бар}} = 1400 \cdot \frac{1,25^2}{2} = 1093 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

2. Определяем скорость вращения $\omega_{\text{м}}$, рад/с, вала машины:

$$\omega_{\text{м}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{R} . \quad (4.31)$$

$$\omega_{\text{м}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,22}{1,25} = 1,1 \text{ рад/с};$$

3. Определяем момент инерции машины, приведённый к валу электродвигателя :

$$J_M = J_{\text{бар}} \cdot \frac{\omega_x^2}{\omega_{\text{ш}}^2} + m_{\text{гр}} \cdot \frac{v^2}{\omega_{\text{ш}}^2}; \quad (4.32)$$

$$J_M = 1093 \cdot \frac{1,1^2}{157^2} + 200 \cdot \frac{0,22^2}{157^2} = 0,0544 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

4. Определяем момент инерции J_p , кг \cdot м 2 , редуктора :

$$J_p = 1,1 \cdot J_{\text{дв}}; \quad (4.33)$$

$$J_p = 1,1 \cdot 0,08 = 0,088 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

5. Определяем момент инерции $J_{\text{сист.}}$, кг \cdot м 2 , системы :

$$J_{\text{сист.}} = J_{\text{дв}} + J_p + J_M, \quad (4.34)$$

$$J_{\text{сист.}} = 0,08 + 0,088 + 0,0544 = 0,222 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

6. Определяем передаточное отношение редуктора :

$$i = \frac{\omega_{\text{ш}}}{\omega_x} = \frac{157}{1,1} = 142 \quad (4.35)$$

7. Определяем усилие F , Н, необходимое для поднятия груза :

$$F = 9,81 \cdot m_{\text{гр}} \cdot f_{\text{тр}}; \quad (4.36)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса груза, кг;

$f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения ($f_{\text{тр}} = 0,66$);

$$F = 9,81 \cdot 200 \cdot 0,66 = 1295 \text{ Н};$$

8. Определяем вращающий момент механизма M_M Н \cdot м, подъёма груза на своём валу :

$$M_M = F \cdot R, \quad (4.37)$$

$$M_M = 1295 \cdot 1,25 = 1619 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

9. Определяем вращающий момент $M_{с.н.}$, Н·м, механизма подъёма груза, приведённый к валу электродвигателя:

$$M_{с.н.} = \frac{M_M}{i \cdot \eta_{\Pi}}, \quad (4.38)$$

где M_M – вращающий момент барабана относительно оси, проходящей через центр тяжести и проходящей параллельно длине барабана, Н·м;

i – передаточное отношение редуктора;

η_{Π} – к.п.д. редуктора.

$$M_{с.н.} = \frac{1619}{142 \cdot 0,92} = 12,4 \text{ Н·м};$$

10. Определяем расчётную мощность $P_{расч}$ Вт, приводного электродвигателя механизма подъёма груза:

$$P_{расч} = M_{с.н.} \cdot \omega_{дв}; \quad (4.39)$$

$$P_{расч} = 12,4 \cdot 157 = 1947 \text{ Вт};$$

Задача 4.4. Грузоподъёмная лебёдка, кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.4 имеет грузоподъёмность: вес поднимаемого груза и крюка $G = 22600 \text{ Н}$.

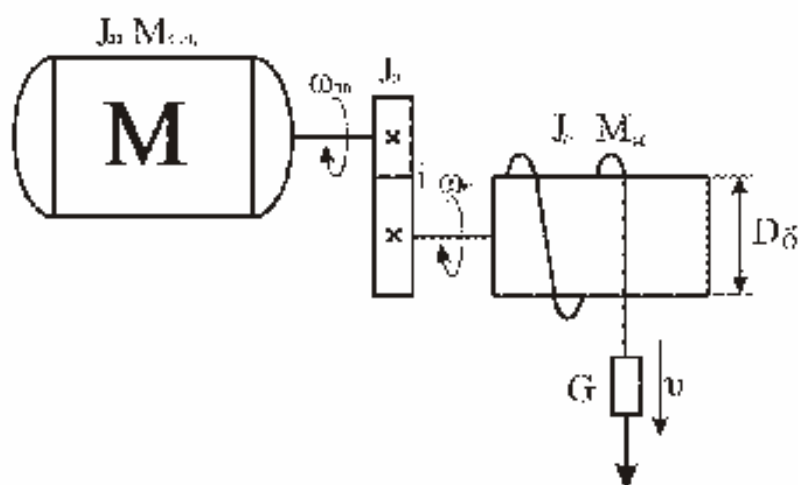


Рисунок 4.4 – Кинематическая схема грузоподъёмной лебёдки

Диаметр барабана $D_6 = 0,4$ м; к.п.д. барабана $\eta_6 = 0,97$; к.п.д. редуктора $\eta_{\pi} = 0,96$; скорость вращения электродвигателя $\omega_{дв} = 104,5$ рад/с; передаточное отношение редуктора $i = 25$; момент инерции электродвигателя $J_{дв} = 0,84$ кг·м²; момент инерции барабана на своём валу $J_6 = 77,5$ кг·м²;

Определить : а) скорость подъёма груза; б) моменты на валах барабана и электродвигателя при подъёме и опускании груза; в) мощность на валу электродвигателя при подъёме груза; г) момент инерции системы «электродвигатель- механизм подъёма груза».

Решение :

1. Определяем скорость вращения ω_M , рад/с, барабана:

$$\omega_M = \frac{\omega_{дв}}{i}, \quad (4.40)$$

$$\omega_M = 104,5/25 = 4,18 \text{ рад/с};$$

2. Определяем скорость поступательного движения v , м/с, перемещения груза :

$$v = \frac{\omega_M \cdot R}{2 \cdot \pi}; \quad (4.41)$$

$$v = \frac{4,18 \cdot 0,4/2}{2 \cdot 3,14} = 0,133 \text{ м/с};$$

3. Определяем вращающий момент на валу барабана M_M , Н·м, при подъёме груза :

$$M_M = \frac{G \cdot v}{\omega_M \cdot \eta_6}, \quad (4.42)$$

$$M_M = \frac{22600 \cdot 0,133}{2 \cdot 3,14} = 478,6 \text{ Н·м},$$

4. Определяем вращающий момент механизма подъёма груза $M_{с.н.}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя:

$$M_{с.н.} = \frac{M_M}{i \cdot \eta_{\pi}}; \quad (4.43)$$

$$M_{с.н.} = \frac{478,6}{25 \cdot 0,96} = 19,94 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

5. Определяем вращающий тормозной момент на валу барабана $M_{т.м.}$, Н \cdot м, при спуске груза :

$$M_{т.м.} = M_{с.н.} \cdot \eta_{п}^2; \quad (4.44)$$

$$M_{т.м.} = 478,6 \cdot 0,96^2 = 441 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

6. Определяем вращающий тормозной момент механизма опускания груза $M_{т.}$, Н \cdot м, приведённый к валу электродвигателя :

$$M_{т.} = \frac{M_{т.м.}}{i} \cdot \eta_{п}^2, \quad (4.45)$$

$$M_{т.} = \frac{441}{25} \cdot 0,96^2 = 16,25 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

7. Определяем мощность на валу электродвигателя $P_{расч.}$, Вт, при подъёме груза :

$$P_{расч.} = M_{с.н.} \cdot \omega_{дв.}; \quad (4.46)$$

$$P_{расч.} = 19,94 \cdot 104,5 = 2083,7 \text{ Вт};$$

8. Определяем момент инерции системы $J_{сист.}$, кг \cdot м², «электродвигатель-механизм подъёма груза :

$$J_{сист.} = J_{дв.} + J_{р.} + \frac{J_{бар.}}{i^2}; \quad (4.47)$$

$$J_{сист.} = 0,84 + 1,1 \cdot 0,84 + 77,5/25^2 = 1,888 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

4.5 Расчёт времени пуска и торможения системы «электродвигатель-рабочая машина»

Основное уравнение движения электропривода (4.48) даёт возможность определить продолжительность переходного процесса

при пуске, торможении, а также при переходе от одной угловой скорости к другой.

$$M_{дв.} - M_c = M_{дин.} = J_{сист.} \frac{d\omega}{dt} ; \quad (4.48)$$

В простейшем случае, когда можно принять $M_{дв.} = const$, $M_c = const$ и $J_{сист.} = const$ (например, при пуске ДПТ посредством пускового реостата в цепи якоря или при пуске АД с фазным ротором при помощи пускового реостата в цепи ротора), уравнение движения (4.40) будет линейным и имеет решение :

$$t_{пуск.} = J_{сист.} \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{дв.} - M_c} ; \quad (4.49)$$

где ω_1 – начальная угловая скорость вращения при пуске, рад/с;
($\omega_1 = 0$);

ω_2 – конечная угловая скорость вращения при пуске, рад/с,
т.е. скорость, при которой работает электродвигатель,
($\omega_2 = \omega_{раб.}$);

$M_{дв.}$ - за значение вращающего момента электродвигателя принимается его среднее значение : $M_{ср.} = \alpha \cdot M_H$;

α – коэффициент пропорциональности, ($\alpha = 1,2 \div 2$) ;

M_H – номинальный момент электродвигателя, Н·м;

Следовательно, время пуска $t_{пуск.}$, с, рассчитывается по формуле :

$$t_{пуск.} = J_{сист.} \frac{\omega_{раб.}}{1,2 \cdot M_H - M_c} ; \quad (4.50)$$

При электрическом торможении (генераторном, противовключенном, динамическом) время торможения $t_{торм.}$, с, рассчитывается по формуле:

$$t_{торм.} = J_{сист.} \frac{\omega_{раб.}}{M_{юрж.} + M_c} ; \quad (4.51)$$

Если торможение осуществляется за счёт сил сопротивления, т.е. электродвигатель отключен от сети $M_{дв.} = 0$, время торможения рассчитывается по формуле :

$$t_{\text{торм}} = J_{\text{сист}} \frac{\omega_{\text{рв}}}{M_c} ; \quad (4.52)$$

Однако для многих электроприводов, когда моменты имеют определённую зависимость от угловой скорости (например, электропривод с АД с к.з. ротором) уравнение движения электропривода оказывается нелинейным и не поддаётся аналитическому решению. В таких случаях применяют для решения графоаналитические методы.

Задача 4.5. Определить время пуска системы «электродвигатель-рабочая машина», если рабочую машину, совершающую поступательное движение, приводит ДПТ с параллельным возбуждением типа: 4П42; $P_H = 2,2$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_H = 13,3$ А; $n_H = 1000$ об/мин; $\eta_H = 0,75$; $J_{\text{дв}} = 0,015$ кг·м². Момент сопротивления и момент инерции рабочей машины на её валу составляют: $M_M = 101,5$ Н·м; $J_{\text{р.м}} = 0,36$ кг·м². Передаточное отношение редуктора $i = 6$; к.п.д. редуктора $\eta_{\text{п}} = 0,94$.

Решение :

1. Определяем момент инерции редуктора J_p , кг·м², по формуле:

$$J_p = 1,1 \cdot J_{\text{дв}}, \quad (4.53)$$

$$J_p = 1,1 \cdot 0,015 = 0,0165 \text{ кг·м}^2 ;$$

2. Определяем момент инерции рабочей машины J_M , кг·м², приведённый к валу электродвигателя :

$$J_M = \frac{J_{\text{р.м.}}}{i^2}, \quad (4.54)$$

$$J_M = \frac{0,36}{36} = 0,01 \text{ кг·м}^2 ;$$

3. Определяем момент инерции системы $J_{\text{сист}}$, кг·м², по формуле :

$$J_{\text{сист}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}}; \quad (4.55)$$

$$J_{\text{сист}} = 0,015 + 0,0165 + 0,01 = 0,041 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

4. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{\text{с.н.}}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя:

$$M_{\text{с.н.}} = \frac{M_{\text{м}}}{i \cdot \eta_{\text{п}}}; \quad (4.56)$$

$$M_{\text{с.н.}} = \frac{101,5}{6 \cdot 0,94} = 18 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

5. Определяем скорость вращения электродвигателя:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30}; \quad (4.57)$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,6 \text{ рад/с};$$

6. Определяем сопротивление якоря $R_{\text{я}}$, Ом, по формуле:

$$R_{\text{я}} = 0,5 (1 - \eta_{\text{н}}) \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}; \quad (4.58)$$

$$R_{\text{я}} = 0,5 (1 - 0,75) \frac{220}{13,3} = 2,06 \text{ Ом};$$

7. Определяем коэффициент пропорциональности:

$$C = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}; \quad (4.59)$$

$$C = \frac{220 - 13,3 \cdot 2,06}{104,6} = 1,83$$

8. Определяем скорость идеального холостого хода ω_0 , рад/с, электродвигателя по формуле :

$$\omega_0 = \frac{U_H \cdot \omega_H}{U_H - I_H \cdot R_{я}}; \quad (4.60)$$

$$\omega_0 = \frac{220 \cdot 104,6}{220 - 13,3 \cdot 2,06} = 119,9 \text{ рад/с};$$

9. Определяем рабочую скорость вращения $\omega_{\text{раб}}$, рад/с, решая совместно уравнение механической характеристики ДПТ и уравнение механической характеристики рабочей машины :

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_{я}}{C^2} \cdot M \text{ - уравнение естественной механической характеристики ДПТ.}$$

$M_c = M_{c.H.} = \text{const}$; - уравнение механической характеристики рабочей машины, движущийся поступательно.

$$\omega_{\text{раб}} = \omega_0 - \frac{R_{я}}{C^2} \cdot M_{c.H.};$$

$$\omega_{\text{раб}} = 119,9 - \frac{2,06}{1,83^2} \cdot 18 = 108,9 \text{ рад/с};$$

10. Определяем номинальный момент M_H , Н·м, электродвигателя :

$$M_H = C \cdot I_H; \quad (4.61)$$

$$M_H = 1,83 \cdot 13,3 = 24,34 \text{ Н·м};$$

11. Определяем время пуска $t_{\text{пуск}}$, с, системы :

$$t_{\text{пуск}} = J_{\text{сист}} \frac{\omega_{\text{раб}}}{\alpha \cdot M_H - M_c}; \quad (4.62)$$

$$t_{\text{пуск}} = 0,041 \frac{108,9}{1,2 \cdot 24,34 - 18} = 0,398 \text{ с ;}$$

Задача 4.6. Определить время торможения системы «электродвигатель- рабочая машина», если электродвигатель останавливается за счёт сил сопротивления от $\omega_{\text{раб}} = 153 \text{ рад/с}$. до нуля. Электродвигатель : АИРФ132М4; $J_{\text{дв}} = 0,027 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; рабочая машина - железный сплошной цилиндр, ось вращения которого проходит через центр тяжести. Радиус цилиндра $R = 0,4 \text{ м}$; длина цилиндра $l = 0,6 \text{ м}$; плотность железа $\gamma = 7,88 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент полезного действия и передаточное отношение редуктора $\eta_p = 0,9$; $i=35$. Вращающий момент рабочей машины относительно своей оси $M_M = 1323 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Решение :

1. Определяем массу цилиндра $m_{\text{ц}}$ по формуле:

$$m_{\text{ц}} = \pi R^2 \cdot l \cdot \gamma, \quad (4.63)$$

$$m_{\text{ц}} = 3,14 \cdot (0,4)^2 \cdot 0,6 \cdot 7,88 \cdot 10^3 = 2375 \text{ кг};$$

2. Определяем момент инерции цилиндра J_c , $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, относительно своей оси :

$$J_c = m_{\text{ц}} \cdot \rho^2 = m_{\text{ц}} \cdot \frac{R^2}{2}; \quad (4.64)$$

$$J_c = 2375 \cdot \frac{0,4^2}{2} = 190 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 ;$$

3. Определяем момент инерции рабочей машины приведённый к валу электродвигателя :

$$J_M = \frac{J_c}{i^2}; \quad (4.65)$$

$$J_M = 190 / 35^2 = 0,155 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 ;$$

4. Определяем момент инерции системы $J_{\text{сист.}}$, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, по формуле :

$$J_{\text{сист.}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}}; \quad (4.66)$$

$$J_{\text{сист.}} = 0,027 + 1,1 \cdot 0,027 + 0,155 = 0,2117 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

5. Определяем момент сопротивления рабочей машины $M_{\text{с.н.}}$, Н·м, приведённый к валу электродвигателя:

$$M_{\text{с.н.}} = \frac{M_{\text{м.}}}{i \cdot \eta_{\text{л}}}; \quad (4.67)$$

$$M_{\text{с.н.}} = \frac{1323}{35 \cdot 0,9} = 42 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

6. Определяем время торможения $t_{\text{тор.}}$, с, системы «электродвигатель-рабочая машина:

$$t_{\text{тор.}} = J_{\text{сист.}} \frac{\omega_{\text{рв}}}{M_{\text{с}}}; \quad (4.68)$$

$$t_{\text{тор.}} = 0,2117 \cdot \frac{153}{42} = 0,771 \text{ с}$$

4.6 Графоаналитический метод определения времени пуска системы «АД с к.з. ротором - вентилятор»

Графоаналитический метод (или метод пропорций) анализа переходных процессов электроприводов широко применяется во всех случаях, когда механические характеристики двигателя и рабочей машины нелинейны. Графоаналитический метод решения основного уравнения движения электропривода основан на том, что на небольшом участке приращения скорости вращения $\Delta\omega$ момент двигателя и момент сопротивлений принимаются постоянными, равными средним значениям на рассматриваемом участке.

Основное уравнение движения электропривода:

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} / J_{\text{сист}} = \Delta\omega / \Delta t; \quad (4.69)$$

Сущность этого метода заключается в следующем (рисунок 4.5) :

1. Задаёмся масштабами по оси моментов (μ_M , Н·м/мм), по оси скорости (μ_ω , рад/с·мм), по оси времени (μ_t , с/мм);
2. Строим естественную механическую характеристику АД с к.з. ротором по 4-м характерным точкам $M_{дв} = f(\omega)$;
3. Строим механическую характеристику вентилятора по уравнению :

$$M_c = 0,2 M_{с.н.} + 0,8 M_{с.н.} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 ; \quad (4.70)$$

где M_c - статический момент сопротивления вентилятора, Н·м;

$M_{с.н.}$ - момент сопротивления вентилятора при номинальной скорости вращения, Н·м;

ω_n - номинальная скорость вращения электродвигателя, рад/с;

Вычитая из графика момента двигателя график момента сопротивлений, получаем кривую динамического момента $M_{дин} = f(\omega)$ и разбиваем её на ряд участков, для которых динамический момент можно принять постоянным, т.е. не зависящим от скорости.

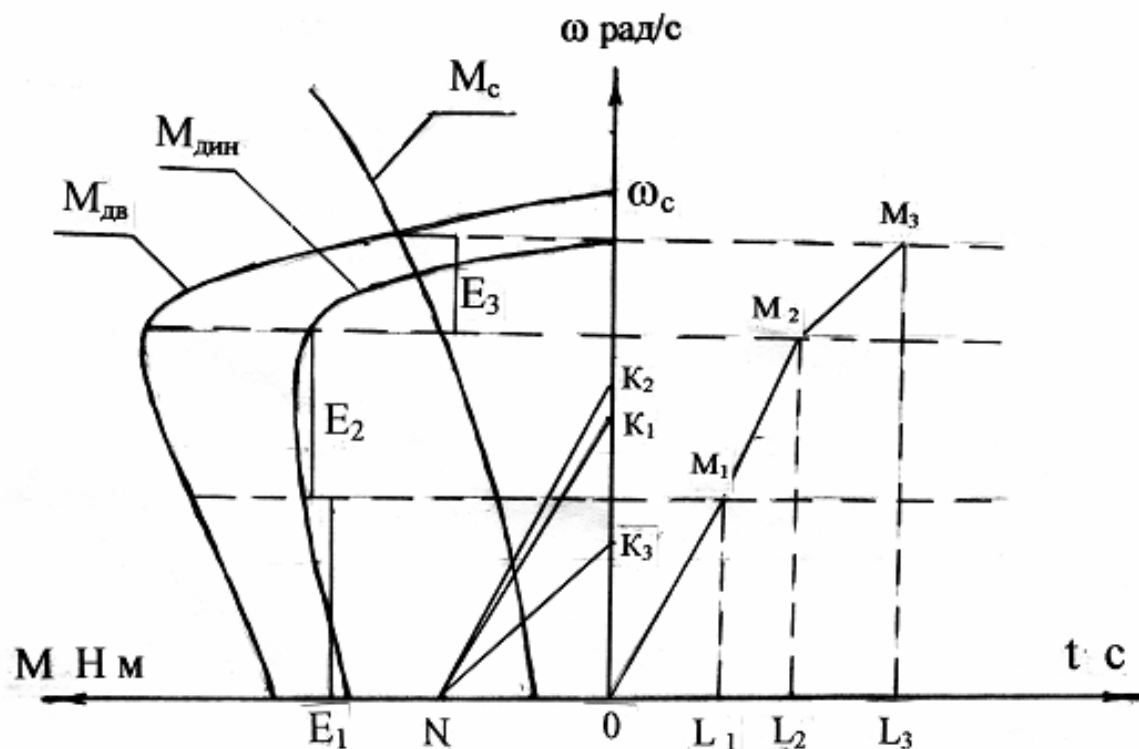


Рисунок 4.5 -Графоаналитический метод определения времени пуска системы «электродвигатель – вентилятор» до установившейся скорости вращения

При этом нужно стремиться к тому, чтобы площадки, лежащие вне кривой динамического момента, были примерно равны площадкам, лежащим внутри кривой. Далее по оси моментов откладываем отрезок ON , мм, - это в масштабе величина момента инерции системы $J_{\text{сист}}$,

$$ON = \frac{J_{\text{сист}}}{\mu_J}; \quad (4.71)$$

где $J_{\text{сист}}$ – момент инерции системы электродвигатель – вентилятор, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
 μ_J - масштаб момента инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{мм}$;

$$J_{\text{сист}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{вен}}; \quad (4.72)$$

где $J_{\text{дв}}$ – момент инерции электродвигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (задаётся в каталоге электродвигателя), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
 $J_{\text{вен}}$ – момент инерции вентилятора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$$J_{\text{вен}} = 1,2 \cdot J_{\text{дв}}; \quad (4.73)$$

Масштаб момента инерции, μ_J , $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{мм}$, определяется по формуле:

$$\mu_J = \frac{\mu_M \cdot \mu_t}{\mu_\omega}; \quad (4.74)$$

Значение динамического момента на первом участке (OE_1) переносим на ось скорости и получаем точку K_1 ($OE_1 = OK_1$). Соединяем точку K_1 с точкой N и из начала координат до конца первого участка проводим прямую OM_1 , параллельную NK_1 . Отрезок OL_1 в принятом масштабе представляет собой приращение времени на первом участке ($OL_1 = \Delta t_1$), а отрезок $M_1 L_1$ - приращение скорости ($M_1 L_1 = \Delta \omega_1$).

Для определения приращения времени на втором и последующих участках делаем аналогичные построения: перенося на ось скорости значение динамического момента на втором участке, полученную точку соединяем с точкой N, параллельно этой линии из конца первого участка (точка M₁) проводим линию, точка пересечения которой с линией конца второго участка и даёт приращение времени Δt_2 и т.д. Соединив расчётные точки, получаем ломаную кривую изменения скорости вращения во времени $\omega = f_1(t)$.

Время пуска системы $t_{\text{пуск}}$, с, «электродвигатель-вентилятор» определяется

$$t_{\text{пуск}} = \sum \Delta t_i = \mu_t \cdot (OL_3). \quad (4.75)$$

Задача 4.7. Определить время пуска системы «АД с короткозамкнутым ротором-вентилятор», если дано: $M_{с.н.} = 0,8 \cdot M_H$; тип АД: АИР100L6; $P_H = 2,2$ кВт; $I_H = 5,58$ А; $n_c = 1000$ об/мин; $n_H = 945$ об/мин; $\eta_H = 81,5$ %; $\cos\varphi_H = 0,74$; $i = 6,0$; $\mu_{\text{п}} = 1,9$; $\mu_{\text{кр}} = 2,2$; $J_{\text{дв}} = 0,013$ кг·м²;

Решение :

1. Определяем синхронную скорость вращения ω_c , рад/с, электродвигателя :

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30}; \quad (4.76)$$

$$\omega_c = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105, \text{ рад/с};$$

2. Определяем номинальную скорость вращения ω_H , рад/с, электродвигателя :

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}; \quad (4.77)$$

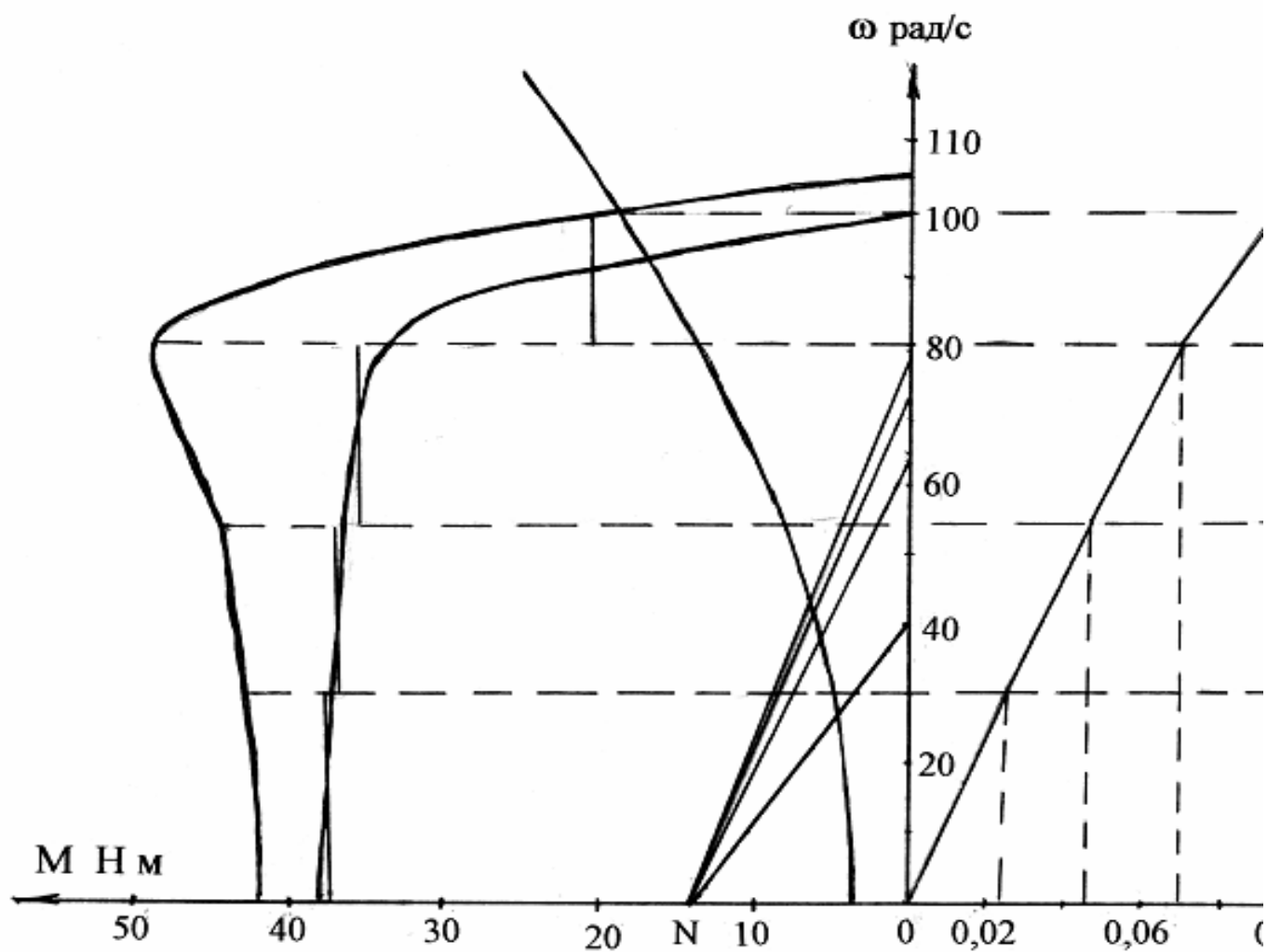


Рисунок 4.6 - Определение времени пуска системы
 «Электродвигатель типа АИР 100L6 – вентилятор»
 графоаналитическим методом

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 945}{30} = 98,9 \text{ рад/с};$$

3. Определяем номинальный момент M_H , Н·м, электродвигателя:

$$M_H = 1000 \frac{P_H}{\omega_H}; \quad (4.78)$$

$$M_H = 1000 \frac{2,2}{98,9} = 22,2 \text{ Н·м};$$

4. Определяем критический момент $M_{кр}$, Н·м, электродвигателя:

$$M_{кр} = \mu_{кр} \cdot M_H; \quad (4.79)$$

$$M_{кр} = 2,2 \cdot 22,2 = 48,8 \text{ Н·м};$$

5. Определяем номинальное скольжение S_H , о.е., электродвигателя:

$$S_H = \frac{n_c - n_H}{n_c}; \quad (4.80)$$

$$S_H = \frac{1000 - 945}{1000} = 0,055;$$

6. Определяем критическое скольжение $S_{кр}$, о.е., электродвигателя

$$S_{кр} = S_H (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1}); \quad (4.81)$$

$$S_{кр} = 0,055 (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,228$$

7. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{кр}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{кр} = \omega_c (1 - S_{кр}); \quad (4.82)$$

$$\omega_{кр} = 105 (1 - 0,228) = 81 \text{ рад/с};$$

8. Определяем пусковой момент $M_{пуск}$, Н·м, электродвигателя:

$$M_{пуск} = \mu_{п} \cdot M_{н}; \quad (4.83)$$

$$M_{пуск} = 1,9 \cdot 22,2 = 42,18 \text{ Н·м};$$

9. Строим естественную механическую характеристику электродвигателя по 4-м точкам (рисунок 4.6);

10. Определяем момент сопротивления номинальный $M_{с.н.}$, Н·м, вентилятора:

$$M_{с.н.} = 0,8 \cdot M_{н}; \quad (4.84)$$

$$M_{с.н.} = 0,8 \cdot 22,2 = 17,8 \text{ Н·м};$$

11. Задаёмся масштабами:

$$\mu_{\omega} = 1 \frac{\text{рад/с}}{\text{мм}}; \quad \mu_{M} = 0,5 \frac{\text{Н·м}}{\text{мм}}; \quad \mu_t = 0,002 \frac{\text{с}}{\text{мм}};$$

12. Строим механическую характеристику вентилятора:

$$M_c = 0,2 \cdot M_{с.н.} + 0,8 \cdot M_{с.н.} \left(\frac{\omega}{\omega_{н}} \right)^2; \quad (4.85)$$

Таблица 4.1 - Координаты точек механической характеристики вентилятора

| | | | | |
|----------|------|------|-------|-------|
| ω | 0 | 40 | 80 | 120 |
| M_c | 3,56 | 5,88 | 12,85 | 24,46 |

13. Разбиваем на 4 участка ось скорости вращения от 0 до $M = M_{с.н.}$, затем вычитаем из графика $M_{дв}$ график M_c , получаем кривую динамического момента $M_{дин.}$, заменяем график

динамического момента ступенчатым графиком ;

14. Определяем масштаб момента инерции μ_J , $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, по формуле:

$$\mu_J = \frac{\mu_M \cdot \mu_t}{\mu_\omega} ; \quad (4.86)$$

$$\mu_J = \frac{0,5 \cdot 0,002}{1} = 0,001 \frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2}{\text{мм}} ;$$

15. Определяем момент инерции системы $J_{\text{сист}}$, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$:

$$J_{\text{сист}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{вен}} ; \quad (4.87)$$

$$J_{\text{сист}} = 0,013 + 1,2 \cdot 0,013 = 0,0286 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 ;$$

16. Определяем величину отрезка ON , мм :

$$ON = \frac{J_{\text{сист}}}{\mu_J} ; \quad (4.88)$$

$$ON = \frac{0,0286}{0,001} = 28,6 \text{ мм} ;$$

17. Далее осуществляем построение (см. выше) ;

18. Замеряем расстояние $OL_4 = 48 \text{ мм}$;

19. Определяем время пуска :

$$t_{\text{пуск}} = \mu_t \cdot OL_4 ; \quad (4.89)$$

$$t_{\text{пуск}} = 0,002 \cdot 48 = 0,096 \text{ с} ;$$

Приложение А (справочное)

Некоторые часто встречающиеся числа

| | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|
| $\pi = 3,141593$ | $4\pi = 12,56637$ | $2/\pi = 0,63662$ |
| $\pi^2 = 9,86960$ | $\sqrt{\pi} = 1,77245$ | $e = 2,718282$ |
| $\sqrt{2} = 1,41421$ | $\sqrt{3} = 1,73205$ | $1^\circ = 0,017453$ |

Приложение Б (справочное)

Приставки к обозначениям единиц

| | | | |
|----------|-----------|------------|------------|
| Тера (Т) | 10^{12} | Санتي (с) | 10^{-2} |
| Гига (Г) | 10^9 | Милли (м) | 10^{-3} |
| Мега (М) | 10^6 | Микро (мк) | 10^{-6} |
| Кило (к) | 10^3 | Нано (н) | 10^{-9} |
| Деци (д) | 10^{-1} | Пико (п) | 10^{-12} |

Приложение В (справочное)

Единицы физических величин ГОСТ 8.417 – 81

| Наименование величины | Наименование | Обозначение | Выражение через единицы СИ |
|-------------------------------|-----------------|-------------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Длина | метр | м | м |
| Масса | килограмм | кг | кг |
| Время | секунда | с | с |
| Сила электрического тока | ампер | А | А |
| Термодинамическая температура | кельвин | К | К |
| Температура | градус Цельсия | °С | °С = К |
| Количество вещества | моль | моль | моль |
| Сила света | кандела | кд | кд |
| Плоский угол | радиан | рад | рад |
| Телесный угол | стерадиан | ср | ср |
| Площадь | квадратный метр | $м^2$ | $м^2$ |
| Объём | кубический метр | $м^3$ | $м^3$ |
| Скорость | метр в секунду | м/с | м/с |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------|--|
| Угловая скорость | радиан в секунду | рад/с | рад/с |
| Ускорение | метр на секунду в квадрате | м/с ² | м/с ² |
| Угловое ускорение | радиан на секунду в квадрате | рад/с ² | рад/с ² |
| Плотность | килограмм на кубический метр | кг/м ³ | кг/м ³ |
| Удельный объём | кубический метр на килограмм | м ³ /кг | м ³ /кг |
| Плотность электрического тока | ампер на квадратный метр | А/м ² | А/м ² |
| Напряжённость магнитного поля | ампер на метр | А/м | А/м |
| Яркость | кандела на квадратный метр | кд/м ² | кд/м ² |
| Частота | герц | Гц | с ⁻¹ |
| Сила, вес | ньютон | Н | м·кг·с ⁻² =Дж·м ⁻¹ |
| Давление | паскаль | Па | м ⁻¹ ·кг·с ⁻² |
| Энергия, работа | джоуль | Дж | м ² ·кг·с ⁻² |
| Мощность | ватт | Вт | м ² ·кг·с ⁻³ =Дж·с ⁻¹ |
| Количество электричества | кулон | Кл | с·А |
| Электрическое напряжение | вольт | В | м ² ·кг·с ⁻³ А ⁻¹ |
| Электрическая ёмкость | фарад | Ф | м ⁻² ·кг ⁻¹ с ⁴ А ² |
| Электрическое сопротивление | ом | Ом | м ² ·кг·с ⁻³ А ⁻² |
| Электрическая проводимость | сименс | См | м ⁻² ·кг ⁻¹ ·с ³ А ² |
| Магнитный поток | вебер | Вб | м ² ·кг·с ⁻² А ⁻¹ |
| Магнитная индукция | тесла | Тл | кг·с ⁻² А ⁻¹ |
| Индуктивность | генри | Гн | м ² ·кг·с ⁻² ·А ⁻² |
| Световой поток | люмен | лм | кд·ср |
| Освещённость | люкс | лк | м ⁻² ·кд·ср |
| Момент силы | ньютон-метр | Н·м | м ² ·кг·с ⁻² |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-----------------------------|-------------------|--|
| Поверхностное натяжение | ньютон на метр | Н/м | $\text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$ |
| Динамическая вязкость | паскаль-секунда | Па · с | $\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ |
| Напряжённость электрического поля | вольт на метр | В/м | $\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$ |
| Абсолютная диэлектрическая проницаемость | фарад на метр | Ф/м | $\text{м}^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$ |
| Абсолютная магнитная проницаемость | генри на метр | Гн/м | $\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$ |
| Удельная энергия | джоуль на килограмм | Дж/кг | $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ |
| Теплоёмкость | джоуль на кельвин | Дж/К | $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ |
| Удельная теплоёмкость | джоуль на килограмм-кельвин | Дж/(кг · К) | $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ |
| Поверхностная плотность потока энергии | ватт на квадратный метр | Вт/м ² | $\text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$ |
| Теплопроводность | ватт на метр-кельвин | Вт/(м · К) | $\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$ |
| Энергетическая сила света | ватт на стерадиан | Вт/ср | $\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{ср}^{-1}$ |

Приложение Г (справочное)

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|--------|-----|-----------------------|
| Масса | тонна | т | 10^3 кг |
| Время | минута | мин | 60 с |
| | час | ч | 3600 с |
| | сутки | сут | 86400 с |
| Объём | литр | л | 10^{-3} м^3 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------------------------------|---------------------|--|
| Плоский угол | градус | ...° | $(\pi/180)$ рад = $=1,7453 \cdot 10^{-2}$ рад |
| | минута | ...' | $(\pi/10800)$ рад = $=2,9088 \cdot 10^{-4}$ рад |
| | секунда | ...'' | $(\pi/6480)$ рад = $=4,8481 \cdot 10^{-6}$ рад |
| Оптическая сила | диоптрия | дптр | 1 м^{-1} |
| Площадь | гектар | га | $10^4 \cdot \text{м}^2$ |
| Полная мощность | вольт-ампер | В · А | |
| Реактивная мощность | вар | вар | |
| Длина | морская миля | миля | 1852 м |
| | дюйм | дм | 2,54 см |
| Масса | карат | кар | $2 \cdot 10^{-4}$ кг |
| | центнер | ц | 100 кг |
| Скорость | узел | уз | 0,514 м/с |
| Частота вращения | оборот в секунду | об/с | $1 \cdot \text{с}^{-1}$ |
| | оборот в минуту | об/мин | $1/60 \text{ с}^{-1} =$ $=0,016 \text{ с}^{-1}$ |
| Давление | миллиметр водяного столба | мм вод. ст. | 9,80665 Па |
| | миллиметр ртутного столба | мм рт. ст. | 133,322 Па |
| | атмосфера | ат. | $9,81 \cdot 10^4$ Па |
| Мощность | лошадиная сила | л.с. | 735,499 Вт |
| Угол поворота | оборот | об | 2π рад = 6,28 рад |
| Момент инерции (динамический момент инерции) | килограмм - квадратный метр | кг · м ² | кг · м ² |
| Яркость | нит | нт | 1 кд/м^2 |
| Плотность | килограмм на кубический метр | кг/м ³ | кг/м ³ |
| Магнитодвижущая сила | ампервиток | ав | 1 А |

Приложение Д
(справочное)

Основные технические данные электродвигателей серии АИР основного исполнения.

| № | Тип электродвигателя | Мощность P_H , кВт | Частота вращения n_H , об/мин | Ток статора I_H , А | КПД η_H , % | $\cos\varphi_H$ | $\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$ | $\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$ | $\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$ | Параметры схемы замещения, о.е | | Момент инерции ротора, $кг \cdot м^2$ | Масса, кг |
|--|----------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------|--|--------------|
| | | | | | | | | | | R_1 | R_2 | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Синхронная частота вращения 3000 об/мин | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | АИР50А2 | 0,09 | 2655 | 0,30 | 60,0 | 0,75 | 4,5 | 2,2 | 2,2 | 0,15 | 0,14 | 0,000025 | 2,5 |
| 2 | АИР50В2 | 0,12 | 2655 | 0,39 | 63,0 | 0,75 | 5,0 | 2,2 | 2,2 | 0,11 | 0,12 | 0,000028 | 2,8 |
| 3 | АИР56А2 | 0,18 | 2730 | 0,52 | 68,0 | 0,78 | 5,0 | 2,2 | 2,2 | 0,17 | 0,094 | 0,00042 | 3,4 |
| 4 | АИР56В2 | 0,25 | 2730 | 0,70 | 69,0 | 0,79 | 5,0 | 2,2 | 2,2 | 0,16 | 0,11 | 0,00047 | 3,9 |
| 5 | АИР63А2 | 0,37 | 2730 | 0,91 | 72,0 | 0,86 | 5,0 | 2,2 | 2,2 | 0,14 | 0,096 | 0,00075 | 4,7 |
| 6 | АИР63В2 | 0,55 | 2730 | 1,31 | 75,0 | 0,85 | 5,0 | 2,2 | 2,2 | 0,13 | 0,096 | 0,00095 | 5,5 |
| 7 | АИР71А2 | 0,75 | 2820 | 1,75 | 79,0 | 0,80 | 6,0 | 2,6 | 2,7 | 0,12 | 0,064 | 0,00095 | 8,6 |
| 8 | АИР71В2 | 1,1 | 2805 | 2,55 | 79,5 | 0,80 | 6,0 | 2,2 | 2,4 | 0,13 | 0,069 | 0,0011 | 9,3 |
| 9 | АИР80А2 | 1,5 | 2850 | 3,3 | 81,0 | 0,85 | 6,5 | 2,2 | 2,6 | 0,084 | 0,049 | 0,0018 | 12,4 |
| 10 | АИР80В2 | 2,2 | 2850 | 4,6 | 83,0 | 0,87 | 6,4 | 2,1 | 2,6 | 0,076 | 0,049 | 0,0021 | 15,0 |
| 11 | АИР90L2 | 3,0 | 2850 | 6,1 | 84,5 | 0,88 | 7,0 | 2,0 | 2,2 | 0,072 | 0,047 | 0,0035 | 19,0 |
| 12 | АИР100S2 | 4,0 | 2850 | 7,9 | 87,0 | 0,88 | 7,5 | 2,0 | 2,4 | 0,054 | 0,036 | 0,0055 | 25,5 |
| 13 | АИР100L2 | 5,5 | 2850 | 10,7 | 88,0 | 0,89 | 7,5 | 2,1 | 2,4 | 0,050 | 0,036 | 0,0070 | 31,0 |
| 14 | АИР112M2 | 7,5 | 2895 | 14,7 | 88,0 | 0,88 | 7,5 | 2,0 | 2,2 | 0,046 | 0,048 | 0,010 | 49,0 |

| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|----------|------|------|-------|------|------|-----|-----|-----|-------|-------|----------|------|
| 15 | АИР132М2 | 11,0 | 2910 | 21,1 | 88,0 | 0,90 | 7,5 | 1,6 | 2,2 | 0,040 | 0,025 | 0,023 | 77,5 |
| 16 | АИР160S2 | 15,0 | 2910 | 28,5 | 90,0 | 0,89 | 7,0 | 1,8 | 2,7 | 0,052 | 0,022 | 0,043 | 100 |
| 17 | АИР160М2 | 18,5 | 2910 | 34,5 | 90,5 | 0,90 | 7,0 | 2,0 | 2,7 | 0,019 | 0,022 | 0,048 | 110 |
| 18 | АИР180S2 | 22,0 | 2920 | 41,5 | 90,5 | 0,89 | 7,0 | 2,0 | 2,7 | 0,030 | 0,020 | 0,063 | 160 |
| 19 | АИР180М2 | 30,0 | 2925 | 55,4 | 91,5 | 0,90 | 7,5 | 2,2 | 3,0 | 0,030 | 0,018 | 0,076 | 180 |
| 20 | АИР200М2 | 37,0 | 2940 | 71,0 | 91,0 | 0,87 | 7,0 | 1,6 | 2,8 | 0,029 | 0,021 | 0,12 | 220 |
| 21 | АИР200L2 | 45,0 | 2940 | 84,5 | 92,0 | 0,88 | 7,5 | 1,8 | 2,8 | 0,027 | 0,020 | 0,13 | 240 |
| 22 | АИР225М2 | 55,0 | 2940 | 99,3 | 92,5 | 0,91 | 7,5 | 1,8 | 2,6 | 0,026 | 0,019 | 0,20 | 320 |
| 23 | АИР250S2 | 75,0 | 2940 | 134,6 | 93,0 | 0,91 | 7,5 | 1,8 | 3,0 | 0,021 | 0,015 | 0,47 | 425 |
| 24 | АИР250М2 | 90,0 | 2940 | 160,0 | 93,0 | 0,92 | 7,5 | 1,8 | 3,0 | 0,016 | 0,016 | 0,52 | 455 |
| Синхронная частота вращения 1500 об/мин. | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | АИР50А4 | 0,06 | 1335 | 0,27 | 53,0 | 0,63 | 4,5 | 2,3 | 2,2 | 0,16 | 0,22 | 0,000032 | 2,6 |
| 26 | АИР50В4 | 0,09 | 1335 | 0,37 | 57,0 | 0,65 | 4,5 | 2,3 | 2,2 | 0,13 | 0,21 | 0,000038 | 3,0 |
| 27 | АИР56А4 | 0,12 | 1350 | 0,44 | 63,0 | 0,66 | 5,0 | 2,3 | 2,2 | 0,18 | 0,15 | 0,000070 | 3,4 |
| 28 | АИР56В4 | 0,18 | 1350 | 0,63 | 64,0 | 0,68 | 5,0 | 2,3 | 2,2 | 0,18 | 0,16 | 0,000081 | 3,9 |
| 29 | АИР63А4 | 0,25 | 1320 | 0,83 | 68,0 | 0,67 | 5,0 | 2,3 | 2,2 | 0,15 | 0,14 | 0,0012 | 4,7 |
| 30 | АИР63В4 | 0,37 | 1320 | 1,18 | 68,0 | 0,70 | 5,0 | 2,3 | 2,2 | 0,17 | 0,14 | 0,0015 | 5,6 |
| 31 | АИР71А4 | 0,55 | 1350 | 1,61 | 75,0 | 0,73 | 5,0 | 2,3 | 2,4 | 0,13 | 0,11 | 0,0013 | 8,3 |
| 32 | АИР71В4 | 0,75 | 1350 | 1,90 | 75,0 | 0,80 | 5,0 | 2,5 | 2,6 | 0,11 | 0,11 | 0,0015 | 9,4 |
| 33 | АИР80А4 | 1,1 | 1395 | 2,75 | 76,5 | 0,77 | 5,0 | 2,2 | 2,4 | 0,12 | 0,068 | 0,0034 | 11,9 |
| 34 | АИР80В4 | 1,5 | 1395 | 3,52 | 78,5 | 0,80 | 5,3 | 2,2 | 2,4 | 0,12 | 0,061 | 0,0035 | 13,5 |
| 35 | АИР90L4 | 2,2 | 1395 | 4,98 | 81,0 | 0,81 | 6,5 | 2,2 | 2,4 | 0,098 | 0,060 | 0,0056 | 18,6 |
| 36 | АИР100S4 | 3,0 | 1410 | 6,70 | 82,0 | 0,82 | 7,0 | 2,0 | 2,2 | 0,078 | 0,053 | 0,0085 | 23,0 |
| 37 | АИР100L4 | 4,0 | 1410 | 8,52 | 85,0 | 0,84 | 6,0 | 2,1 | 2,4 | 0,067 | 0,053 | 0,011 | 28,5 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----|----------|------|------|-------|------|------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|------|
| 38 | АИР112М4 | 5,5 | 1430 | 11,3 | 86,0 | 0,86 | 6,0 | 2,0 | 2,5 | 0,054 | 0,041 | 0,016 | 49,0 |
| 39 | АИР132S4 | 7,5 | 1440 | 15,1 | 87,5 | 0,86 | 7,5 | 2,0 | 2,5 | 0,048 | 0,033 | 0,027 | 70,0 |
| 40 | АИР132М4 | 11,0 | 1450 | 22,2 | 88,5 | 0,85 | 7,5 | 2,2 | 3,1 | 0,043 | 0,042 | 0,048 | 83,5 |
| 41 | АИР160S4 | 15,0 | 1455 | 28,5 | 90,0 | 0,89 | 7,0 | 1,9 | 2,9 | 0,047 | 0,025 | 0,080 | 100 |
| 42 | АИР160М4 | 18,5 | 1455 | 34,9 | 90,5 | 0,89 | 7,0 | 1,9 | 2,9 | 0,012 | 0,024 | 0,10 | 145 |
| 43 | АИР180S4 | 22,0 | 1465 | 42,5 | 90,5 | 0,87 | 7,0 | 1,7 | 2,7 | 0,041 | 0,021 | 0,16 | 170 |
| 44 | АИР180М4 | 30,0 | 1470 | 57,0 | 92,0 | 0,87 | 7,0 | 1,7 | 2,7 | 0,034 | 0,018 | 0,20 | 190 |
| 45 | АИР200М4 | 37,0 | 1470 | 68,3 | 92,5 | 0,89 | 7,5 | 1,7 | 2,7 | 0,039 | 0,018 | 0,27 | 245 |
| 46 | АИР200L4 | 45,0 | 1470 | 83,1 | 92,5 | 0,89 | 7,5 | 1,7 | 2,7 | 0,034 | 0,017 | 0,32 | 270 |
| 47 | АИР225М4 | 55,0 | 1470 | 101 | 93,0 | 0,89 | 7,0 | 1,7 | 2,6 | 0,027 | 0,015 | 0,50 | 335 |
| 48 | АИР250S4 | 75,0 | 1480 | 137,8 | 94,0 | 0,88 | 7,5 | 1,7 | 2,5 | 0,025 | 0,014 | 1,0 | 450 |
| 49 | АИР250М4 | 90,0 | 1480 | 163,0 | 94,0 | 0,89 | 7,5 | 1,5 | 2,5 | 0,024 | 0,014 | 1,2 | 480 |
| 50 | АИР280S4 | 110 | 1470 | 196 | 94,0 | 0,91 | 6,5 | 1,6 | 2,2 | 0,023 | 0,019 | 2,1 | 695 |
| 51 | АИР280М4 | 132 | 1470 | 230 | 94,5 | 0,93 | 6,5 | 1,6 | 2,4 | 0,021 | 0,018 | 2,4 | 760 |
| 52 | АИР315S4 | 160 | 1470 | 286 | 94,5 | 0,91 | 5,5 | 1,4 | 2,0 | 0,018 | 0,017 | 3,0 | 875 |
| 53 | АИР315М4 | 200 | 1470 | 352 | 95,0 | 0,92 | 5,5 | 1,6 | 2,2 | 0,014 | 0,014 | 3,5 | 1000 |
| 54 | АИР355S4 | 250 | 1470 | 437 | 94,5 | 0,92 | 7,0 | 1,5 | 2,3 | 0,013 | 0,013 | 6,0 | 1260 |
| 55 | АИР355М4 | 315 | 1470 | 544 | 94,7 | 0,93 | 7,0 | 1,6 | 3,0 | 0,012 | 0,014 | 7,0 | 1460 |

Синхронная частота вращения 1000 об/мин

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|---------|------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|--------|------|
| 56 | АИР63А6 | 0,18 | 860 | 0,79 | 56,0 | 0,62 | 4,0 | 2,0 | 2,2 | 0,24 | 0,22 | 0,0019 | 4,55 |
| 57 | АИР63В6 | 0,25 | 860 | 1,04 | 59,0 | 0,62 | 4,0 | 2,0 | 2,2 | 0,18 | 0,21 | 0,0023 | 5,40 |
| 58 | АИР71А6 | 0,37 | 915 | 1,31 | 66,0 | 0,63 | 4,5 | 2,1 | 2,3 | 0,17 | 0,15 | 0,0019 | 8,1 |
| 59 | АИР71В6 | 0,55 | 915 | 1,74 | 69,0 | 0,68 | 4,5 | 1,9 | 2,2 | 0,16 | 0,15 | 0,0022 | 9,7 |
| 60 | АИР80А6 | 0,75 | 920 | 2,26 | 71,0 | 0,71 | 4,0 | 2,1 | 2,2 | 0,16 | 0,12 | 0,0033 | 12,3 |
| 61 | АИР80В6 | 1,1 | 920 | 3,05 | 75,0 | 0,74 | 4,5 | 2,2 | 2,3 | 0,12 | 0,11 | 0,0048 | 15,3 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|-----------|------|-----|------|-------|------|-----|-----|-----|-------|-------|--------|------|
| 62 | АИР90L6 | 1,5 | 925 | 4,16 | 76,0 | 0,72 | 6,0 | 2,0 | 2,2 | 0,11 | 0,088 | 0,0073 | 19,0 |
| 63 | АИР100L6 | 2,2 | 945 | 5,58 | 81,5 | 0,74 | 6,0 | 1,9 | 2,2 | 0,09 | 0,067 | 0,013 | 26,5 |
| 64 | АИР112МА6 | 3,0 | 950 | 7,4 | 81,5 | 0,76 | 6,0 | 2,0 | 2,2 | 0,085 | 0,063 | 0,017 | 43,0 |
| 65 | АИР112МВ6 | 4,0 | 950 | 9,1 | 82,5 | 0,81 | 6,0 | 2,0 | 2,2 | 0,077 | 0,062 | 0,021 | 48,0 |
| 66 | АИР132S6 | 5,5 | 960 | 12,3 | 85,0 | 0,80 | 7,0 | 2,0 | 2,2 | 0,067 | 0,041 | 0,038 | 68,5 |
| 67 | АИР132М6 | 7,5 | 960 | 16,5 | 85,5 | 0,81 | 7,0 | 2,0 | 2,2 | 0,060 | 0,040 | 0,055 | 81,5 |
| 68 | АИР160S6 | 11,0 | 970 | 22,9 | 88,0 | 0,83 | 6,5 | 2,0 | 2,7 | 0,073 | 0,030 | 0,12 | 125 |
| 69 | АИР160М6 | 15,0 | 970 | 30,5 | 88,0 | 0,85 | 6,5 | 2,0 | 2,7 | 0,062 | 0,028 | 0,15 | 155 |
| 70 | АИР180М6 | 18,5 | 980 | 36,9 | 89,5 | 0,85 | 6,5 | 1,8 | 2,4 | 0,056 | 0,026 | 0,24 | 180 |
| 71 | АИР200М6 | 22,0 | 980 | 44,8 | 90,0 | 0,83 | 6,5 | 1,6 | 2,4 | 0,050 | 0,024 | 0,41 | 225 |
| 72 | АИР200L6 | 30,0 | 975 | 59,6 | 90,0 | 0,85 | 6,5 | 1,6 | 2,4 | 0,046 | 0,022 | 0,46 | 250 |
| 73 | АИР225М6 | 37,0 | 980 | 72,7 | 91,0 | 0,85 | 6,5 | 1,5 | 2,3 | 0,042 | 0,019 | 0,64 | 305 |
| 74 | АИР250S6 | 45,0 | 980 | 87,0 | 92,5 | 0,85 | 6,5 | 1,5 | 2,3 | 0,037 | 0,015 | 1,1 | 390 |
| 75 | АИР250М6 | 55,0 | 980 | 105 | 92,59 | 0,86 | 6,5 | 1,5 | 2,3 | 0,034 | 0,014 | 1,2 | 430 |
| 76 | АИР280S6 | 75,0 | 980 | 137 | 93,0 | 0,90 | 6,5 | 1,3 | 2,2 | 0,032 | 0,021 | 2,8 | 645 |
| 77 | АИР280М6 | 90,0 | 980 | 164 | 93,5 | 0,90 | 6,5 | 1,4 | 2,4 | 0,030 | 0,019 | 3,3 | 700 |
| 78 | АИР315S6 | 110 | 980 | 200 | 93,5 | 0,90 | 6,0 | 1,4 | 2,3 | 0,026 | 0,018 | 4,0 | 850 |
| 79 | АИР315М6 | 132 | 980 | 239 | 94,0 | 0,90 | 6,5 | 1,4 | 2,3 | 0,023 | 0,018 | 4,5 | 990 |
| 80 | АИР355S6 | 160 | 980 | 288 | 94,0 | 0,90 | 6,5 | 1,7 | 2,3 | 0,020 | 0,015 | 7,3 | 1130 |
| 81 | АИР355М6 | 200 | 980 | 358 | 94,5 | 0,90 | 6,5 | 1,7 | 2,0 | 0,018 | 0,014 | 8,8 | 1280 |
| Синхронная частота вращения 750 об/мин | | | | | | | | | | | | | |
| 82 | АИР71В8 | 0,25 | 690 | 1,04 | 61,0 | 0,60 | 4,0 | 1,8 | 1,9 | 0,22 | 0,23 | 0,0021 | 8,9 |
| 83 | АИР80А8 | 0,37 | 700 | 1,53 | 63,5 | 0,59 | 3,5 | 2,0 | 2,3 | 0,19 | 0,16 | 0,0036 | 12,1 |
| 84 | АИР80В8 | 0,55 | 700 | 2,07 | 65,0 | 0,60 | 3,5 | 2,0 | 2,1 | 0,17 | 0,15 | 0,0047 | 13,0 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|-----------|------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-------|-------|--------|------|
| 85 | АИР90LA8 | 0,75 | 705 | 2,08 | 75,0 | 0,73 | 4,0 | 1,4 | 2,0 | 0,14 | 0,11 | 0,0075 | 18,5 |
| 86 | АИР90LB8 | 1,1 | 700 | 3,02 | 77,0 | 0,72 | 3,5 | 1,4 | 2,0 | 0,13 | 0,11 | 0,0096 | 22,0 |
| 87 | АИР100L8 | 1,5 | 705 | 3,95 | 76,0 | 0,75 | 3,7 | 1,6 | 2,0 | 0,11 | 0,093 | 0,012 | 23,5 |
| 88 | АИР112МА8 | 2,2 | 710 | 6,16 | 76,5 | 0,71 | 6,0 | 1,8 | 2,2 | 0,093 | 0,083 | 0,017 | 43,5 |
| 89 | АИР112МВ8 | 3,0 | 700 | 7,8 | 79,0 | 0,74 | 6,0 | 1,8 | 2,2 | 0,080 | 0,083 | 0,025 | 48,5 |
| 90 | АИР132S8 | 4,0 | 720 | 10,5 | 83,0 | 0,70 | 6,0 | 1,8 | 2,2 | 0,068 | 0,058 | 0,042 | 68,5 |
| 91 | АИР132М8 | 5,5 | 715 | 13,6 | 83,0 | 0,74 | 6,0 | 1,8 | 2,2 | 0,070 | 0,061 | 0,057 | 82,0 |
| 92 | АИР160S8 | 7,5 | 730 | 17,5 | 87,0 | 0,75 | 5,5 | 1,6 | 2,4 | 0,075 | 0,032 | 0,12 | 125 |
| 93 | АИР160М8 | 11,0 | 730 | 25,5 | 87,5 | 0,75 | 6,0 | 1,6 | 2,4 | 0,066 | 0,031 | 0,15 | 155 |
| 94 | АИР180М8 | 15,0 | 730 | 31,3 | 89,0 | 0,82 | 5,5 | 1,6 | 2,2 | 0,064 | 0,030 | 0,25 | 180 |
| 95 | АИР200М8 | 18,5 | 730 | 39,0 | 89,0 | 0,81 | 6,0 | 1,6 | 2,3 | 0,057 | 0,026 | 0,41 | 225 |
| 96 | АИР200L8 | 22,0 | 730 | 45,9 | 90,0 | 0,81 | 6,0 | 1,6 | 2,3 | 0,062 | 0,029 | 0,46 | 250 |
| 97 | АИР225М8 | 30,0 | 730 | 62,2 | 90,5 | 0,81 | 6,0 | 1,4 | 2,3 | 0,045 | 0,022 | 0,69 | 305 |
| 98 | АИР250S8 | 37,0 | 735 | 77,9 | 92,5 | 0,78 | 6,0 | 1,5 | 2,3 | 0,047 | 0,017 | 1,2 | 400 |
| 99 | АИР250М8 | 45,0 | 735 | 93,6 | 92,5 | 0,79 | 6,0 | 1,4 | 2,2 | 0,037 | 0,016 | 1,3 | 430 |
| 100 | АИР280S8 | 55,0 | 730 | 106 | 92,5 | 0,86 | 6,0 | 1,3 | 2,2 | 0,035 | 0,022 | 3,2 | 650 |
| 101 | АИР280М8 | 75,0 | 730 | 141 | 93,0 | 0,87 | 6,0 | 1,4 | 2,2 | 0,028 | 0,021 | 4,0 | 735 |
| 102 | АИР315S8 | 90,0 | 740 | 173 | 93,5 | 0,85 | 6,0 | 1,2 | 2,2 | 0,023 | 0,019 | 4,6 | 875 |
| 103 | АИР315М8 | 110 | 740 | 209 | 93,5 | 0,85 | 6,0 | 1,1 | 2,2 | 0,023 | 0,019 | 5,6 | 1010 |
| 104 | АИР355S8 | 132 | 735 | 252 | 93,5 | 0,85 | 6,0 | 1,6 | 2,0 | 0,023 | 0,017 | 9,0 | 1170 |
| 105 | АИР355М8 | 160 | 735 | 306 | 93,5 | 0,85 | 6,0 | 1,6 | 2,0 | 0,020 | 0,017 | 10,0 | 1270 |
| Синхронная частота вращения 600 об/мин | | | | | | | | | | | | | |
| 106 | АИР250S10 | 22,0 | 580 | 45,8 | 89,0 | 0,82 | 5,0 | 1,2 | 2,2 | 0,050 | 0,019 | 1,4 | 370 |
| 107 | АИР250М10 | 30,0 | 580 | 61,7 | 89,0 | 0,83 | 5,5 | 1,2 | 2,2 | 0,056 | 0,023 | 1,6 | 410 |
| 108 | АИР280S10 | 32,0 | 580 | 78,2 | 91,5 | 0,79 | 6,0 | 1,3 | 2,3 | 0,031 | 0,027 | 3,7 | 605 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|-----------|-------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-------|-------|------|------|
| 109 | АИР280М10 | 45,0 | 580 | 94,8 | 92,0 | 0,79 | 6,0 | 1,4 | 2,1 | 0,037 | 0,031 | 4,0 | 660 |
| 110 | АИР315S10 | 55,0 | 585 | 115 | 92,5 | 0,79 | 6,5 | 1,2 | 1,9 | 0,028 | 0,026 | 5,2 | 785 |
| 111 | АИР315М10 | 75,0 | 585 | 155 | 92,5 | 0,80 | 6,0 | 1,2 | 1,9 | 0,029 | 0,027 | 6,0 | 865 |
| 112 | АИР355S10 | 90,0 | 590 | 178 | 92,5 | 0,83 | 6,0 | 1,1 | 1,9 | 0,028 | 0,021 | 9,3 | 1080 |
| 113 | АИР355М10 | 110,0 | 590 | 217 | 93,0 | 0,83 | 6,0 | 1,1 | 1,9 | 0,024 | 0,021 | 11 | 1190 |
| Синхронная частота вращения 500 об/мин | | | | | | | | | | | | | |
| 114 | АИР315S12 | 45,0 | 480 | 101 | 91,0 | 0,75 | 6,0 | 1,1 | 1,8 | 0,037 | 0,023 | 5,3 | 785 |
| 115 | АИР315М12 | 55,0 | 480 | 123 | 91,5 | 0,75 | 6,0 | 1,1 | 1,8 | 0,033 | 0,032 | 6,2 | 865 |
| 116 | АИР355S12 | 75,0 | 490 | 164 | 91,0 | 0,76 | 6,0 | 1,1 | 1,9 | 0,026 | 0,021 | 9,3 | 1080 |
| 117 | АИР355М12 | 90,0 | 490 | 196 | 92,0 | 0,76 | 6,0 | 1,1 | 1,9 | 0,024 | 0,020 | 10,0 | 1190 |

Примечание : Электродвигатели габаритов (50 ÷ 132) имеют класс нагревостойкости **В** ;

Электродвигатели габаритов (160 ÷ 355) имеют класс нагревостойкости **Ф** .

Приложение Е
(справочное)

Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором; степень защиты IP54 (IP44).

| № | Тип электродвигателя | P _н , кВт | Энергетические показатели | | I _{2н} , А | E _{2н} , В | Механическая характеристика | | Параметры схемы замещения, о.е | |
|--|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | | | КПД, % | cos φ _н | | | μ _к | S _н , % | R ₁ | R ₂ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Синхронная частота вращения 1500 об/мин | | | | | | | | | | |
| 1 | АИРФ100S4 | 2,2 | 75 | 0,70 | 22,5 | 84 | 2,2 | 5,2 | 0,058 | 0,054 |
| 2 | АИРФ100L4 | 3,0 | 77 | 0,78 | 21,2 | 91 | 2,5 | 5,8 | 0,052 | 0,082 |
| 3 | АИРФ112M4 | 4,0 | 80 | 0,80 | 24 | 126 | 2,5 | 4,6 | 0,052 | 0,012 |
| 4 | АИРФ132S4 | 5,5 | 82 | 0,82 | 28 | 138 | 2,5 | 3,6 | 0,040 | 0,016 |
| 5 | АИРФ132M4 | 7,5 | 85 | 0,78 | 64 | 185 | 2,5 | 3,5 | 0,032 | 0,029 |
| 6 | АИРФ160S4 | 11 | 86 | 0,86 | 22 | 305 | 2,5 | 4,4 | 0,038 | 0,051 |
| 7 | АИРФ160M4 | 15 | 88 | 0,87 | 29 | 300 | 2,5 | 3,7 | 0,032 | 0,042 |
| 8 | АИРФ180M4 | 18,5 | 89 | 0,88 | 38 | 295 | 2,5 | 2,9 | 0,022 | 0,034 |
| 9 | АИРФ200M4 | 22 | 89,5 | 0,87 | 45 | 340 | 2,5 | 2,5 | 0,024 | 0,026 |
| 10 | АИРФ200L4 | 30 | 90 | 0,87 | 55 | 350 | 2,5 | 2,5 | 0,026 | 0,030 |
| 11 | АИРФ225M4 | 37 | 90,5 | 0,87 | 160 | 160 | 2,5 | 3,5 | 0,023 | 0,027 |
| 12 | АИРФ250S4 | 45 | 91 | 0,88 | 170 | 230 | 2,5 | 3,0 | 0,020 | 0,030 |
| 13 | АИРФ250S4 | 55 | 91,5 | 0,90 | 170 | 200 | 2,5 | 2,3 | 0,017 | 0,025 |
| 14 | АИРФ250M4 | 75 | 92 | 0,86 | 170 | 250 | 2,5 | 2,5 | 0,015 | 0,021 |
| 15 | АИРФ280S4 | 90 | 92,5 | 0,84 | 210 | 250 | 2,2 | 4,2 | 0,022 | 0,014 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--|-----------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-------|-------|
| 16 | АИРФ280М4 | 110 | 92,5 | 0,81 | 223 | 260 | 2,2 | 3,8 | 0,022 | 0,017 |
| 17 | АИРФ315S4 | 132 | 93 | 0,82 | 242 | 280 | 2,2 | 3,8 | 0,020 | 0,018 |
| 18 | АИРФ315М4 | 160 | 93 | 0,87 | 257 | 310 | 2,2 | 3,6 | 0,017 | 0,016 |
| 19 | АИРФ355S4 | 200 | 93,5 | 0,87 | 330 | 300 | 2,2 | 3,5 | 0,014 | 0,012 |
| 20 | АИРФ355М4 | 250 | 93,5 | 0,87 | 400 | 370 | 2,2 | 3,5 | 0,013 | 0,010 |
| Синхронная частота вращения 1000 об/мин | | | | | | | | | | |
| 21 | АИРФ100L6 | 1,5 | 65 | 0,80 | 12,8 | 118 | 2,5 | 5,8 | 0,088 | 0,072 |
| 22 | АИРФ112М6 | 2,2 | 70 | 0,87 | 14,2 | 135 | 2,5 | 5,2 | 0,067 | 0,012 |
| 23 | АИРФ112М6 | 3,0 | 72 | 0,87 | 12,2 | 186 | 2,5 | 4,8 | 0,085 | 0,062 |
| 24 | АИРФ132S6 | 4,0 | 78 | 0,88 | 16,1 | 262 | 2,5 | 4,6 | 0,074 | 0,061 |
| 25 | АИРФ132М6 | 5,5 | 81 | 0,88 | 17,4 | 282 | 2,5 | 4,4 | 0,068 | 0,041 |
| 26 | АИРФ160S6 | 7,5 | 85 | 0,77 | 18 | 300 | 2,5 | 5,1 | 0,054 | 0,068 |
| 27 | АИРФ160М6 | 11 | 86 | 0,76 | 20 | 310 | 2,5 | 4,3 | 0,043 | 0,058 |
| 28 | АИРФ180М6 | 15 | 87,5 | 0,80 | 25 | 325 | 2,2 | 4,4 | 0,035 | 0,057 |
| 29 | АИРФ200М6 | 18,5 | 88 | 0,81 | 35 | 360 | 2,5 | 3,5 | 0,030 | 0,038 |
| 30 | АИРФ200L6 | 22 | 88,5 | 0,80 | 45 | 330 | 2,5 | 3,5 | 0,032 | 0,041 |
| 31 | АИРФ225М6 | 30 | 89 | 0,85 | 150 | 140 | 2,5 | 3,5 | 0,029 | 0,030 |
| 32 | АИРФ250S6 | 37 | 89,5 | 0,84 | 165 | 150 | 2,5 | 3,5 | 0,026 | 0,024 |
| 33 | АИРФ250S6 | 45 | 90 | 0,87 | 160 | 180 | 2,5 | 2,5 | 0,029 | 0,024 |
| 34 | АИРФ250М6 | 55 | 90,5 | 0,87 | 182 | 191 | 2,5 | 3,5 | 0,023 | 0,026 |
| 35 | АИРФ280S6 | 75 | 91 | 0,86 | 200 | 210 | 2,2 | 3,6 | 0,031 | 0,038 |
| 36 | АИРФ280М6 | 90 | 91,5 | 0,88 | 270 | 230 | 2,2 | 3,6 | 0,034 | 0,031 |
| 37 | АИРФ315S6 | 110 | 92 | 0,87 | 292 | 291 | 2,2 | 3,6 | 0,036 | 0,039 |
| 38 | АИРФ315М6 | 132 | 92,5 | 0,88 | 300 | 268 | 2,2 | 3,6 | 0,026 | 0,018 |
| 39 | АИРФ355S6 | 160 | 93 | 0,82 | 346 | 290 | 2,2 | 3,6 | 0,024 | 0,026 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 40 | АИРФ355М6 | 200 | 93,5 | 0,88 | 400 | 302 | 2,2 | 2,8 | 0,026 | 0,028 |
| Синхронная частота вращения 750 об/мин | | | | | | | | | | |
| 41 | АИРФ160S8 | 5,5 | 80 | 0,70 | 14 | 300 | 2,2 | 6,4 | 0,060 | 0,094 |
| 42 | АИРФ160M8 | 7,5 | 82 | 0,70 | 16 | 290 | 2,2 | 5,5 | 0,053 | 0,079 |
| 43 | АИРФ180M8 | 11 | 85 | 0,72 | 25 | 270 | 2,2 | 4,4 | 0,041 | 0,062 |
| 44 | АИРФ200M8 | 15 | 86 | 0,70 | 28 | 360 | 2,2 | 3,5 | 0,040 | 0,048 |
| 45 | АИРФ200L8 | 18,5 | 86,5 | 0,73 | 40 | 300 | 2,2 | 3,5 | 0,038 | 0,046 |
| 46 | АИРФ225M8 | 22 | 87 | 0,82 | 140 | 102 | 2,2 | 4,5 | 0,039 | 0,043 |
| 47 | АИРФ250S8 | 30 | 88 | 0,81 | 155 | 125 | 2,2 | 4,0 | 0,033 | 0,034 |
| 48 | АИРФ250S8 | 37 | 89 | 0,80 | 155 | 148 | 2,2 | 3,5 | 0,031 | 0,031 |
| 49 | АИРФ250M8 | 45 | 89,5 | 0,78 | 178 | 162 | 2,2 | 5,0 | 0,035 | 0,061 |
| 50 | АИРФ280S8 | 55 | 90 | 0,79 | 180 | 185 | 2,2 | 4,5 | 0,036 | 0,053 |
| 51 | АИРФ280M8 | 75 | 90,5 | 0,80 | 221 | 217 | 2,2 | 4,5 | 0,036 | 0,052 |
| 52 | АИРФ315S8 | 90 | 91 | 0,81 | 223 | 260 | 2,2 | 4,2 | 0,034 | 0,045 |
| 53 | АИРФ315M8 | 110 | 91,5 | 0,81 | 242 | 283 | 2,2 | 3,8 | 0,031 | 0,044 |
| 54 | АИРФ355S8 | 132 | 92 | 0,81 | 257 | 330 | 2,2 | 3,6 | 0,031 | 0,052 |
| 55 | АИРФ355M8 | 160 | 92,5 | 0,87 | 330 | 310 | 2,2 | 3,5 | 0,034 | 0,050 |
| Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором; степень защиты IP23. | | | | | | | | | | |
| Синхронная частота вращения 1500 об/мин. | | | | | | | | | | |
| 56 | АИРНФ200M4 | 37 | 88,5 | 0,88 | 62 | 360 | 2,5 | 3,0 | 0,029 | 0,035 |
| 57 | АИРНФ200L4 | 45 | 89 | 0,88 | 75 | 375 | 2,5 | 3,5 | 0,029 | 0,036 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--|------------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 58 | АИРНФ225М4 | 55 | 89,5 | 0,87 | 200 | 170 | 2,5 | 3,6 | 0,031 | 0,035 |
| 59 | АИРНФ250S4 | 75 | 90 | 0,88 | 250 | 180 | 2,5 | 4,5 | 0,028 | 0,039 |
| 60 | АИРНФ250S4 | 90 | 90,5 | 0,87 | 260 | 220 | 2,5 | 4,0 | 0,021 | 0,031 |
| 61 | АИРНФ250М4 | 110 | 91 | 0,90 | 260 | 250 | 2,5 | 3,5 | 0,022 | 0,031 |
| 62 | АИРНФ280S4 | 132 | 91,5 | 0,88 | 330 | 251 | 2,5 | 2,9 | 0,028 | 0,031 |
| 63 | АИРНФ280М4 | 160 | 92 | 0,88 | 330 | 300 | 2,2 | 2,6 | 0,024 | 0,028 |
| 64 | АИРНФ315S4 | 200 | 92,5 | 0,89 | 396 | 312 | 2,2 | 2,5 | 0,022 | 0,026 |
| 65 | АИРНФ315М4 | 250 | 93 | 0,90 | 425 | 360 | 2,2 | 2,5 | 0,022 | 0,025 |
| 66 | АИРНФ355S4 | 315 | 93,5 | 0,90 | 460 | 420 | 2,2 | 2,2 | 0,020 | 0,022 |
| 67 | АИРНФ355М4 | 400 | 94 | 0,90 | 485 | 505 | 2,2 | 2,0 | 0,019 | 0,020 |
| Синхронная частота вращения 1000 об/мин | | | | | | | | | | |
| 68 | АИНФ200М6 | 22 | 87,5 | 0,81 | 37 | 380 | 2,2 | 3,5 | 0,032 | 0,043 |
| 69 | АИРНФ200L6 | 30 | 88 | 0,82 | 46 | 375 | 2,2 | 4,0 | 0,032 | 0,042 |
| 70 | АИРНФ225М6 | 37 | 88,5 | 0,86 | 180 | 140 | 2,2 | 4,0 | 0,032 | 0,038 |
| 71 | АИРНФ250S6 | 45 | 89 | 0,86 | 200 | 155 | 2,2 | 4,0 | 0,028 | 0,032 |
| 72 | АИРНФ250S6 | 55 | 89,5 | 0,88 | 185 | 190 | 2,2 | 3,5 | 0,024 | 0,027 |
| 73 | АИРНФ250М6 | 75 | 90 | 0,85 | 200 | 250 | 2,2 | 3,0 | 0,022 | 0,025 |
| 74 | АИРНФ280S6 | 90 | 90,5 | 0,88 | 277 | 202 | 2,2 | 3,6 | 0,033 | 0,038 |
| 75 | АИРНФ280М6 | 110 | 91 | 0,87 | 297 | 230 | 2,2 | 3,6 | 0,034 | 0,038 |
| 76 | АИРНФ315S6 | 132 | 91,5 | 0,88 | 320 | 257 | 2,2 | 3,0 | 0,026 | 0,029 |
| 77 | АИРНФ315М6 | 160 | 92 | 0,88 | 352 | 291 | 2,2 | 3,0 | 0,024 | 0,024 |
| 78 | АИРНФ355L6 | 200 | 92,5 | 0,88 | 411 | 304 | 2,2 | 2,5 | 0,025 | 0,027 |
| 79 | АИРНФ355М6 | 250 | 93 | 0,89 | 401 | 380 | 2,2 | 2,5 | 0,022 | 0,023 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| Синхронная частота вращения 750 об/мин | | | | | | | | | | |
| 80 | АИРНФ200М8 | 18,5 | 85 | 0,78 | 30 | 380 | 2,2 | 4,5 | 0,046 | 0,054 |
| 81 | АИРНФ200S8 | 22 | 86 | 0,79 | 40 | 330 | 2,2 | 4,5 | 0,042 | 0,066 |
| 82 | АИРНФ225М8 | 30 | 86,5 | 0,80 | 165 | 120 | 2,2 | 4,1 | 0,043 | 0,046 |
| 83 | АИРНФ250S8 | 37 | 87,5 | 0,80 | 190 | 115 | 2,2 | 5,5 | 0,044 | 0,047 |
| 84 | АИРНФ250S8 | 45 | 88,5 | 0,82 | 190 | 140 | 2,2 | 4,0 | 0,036 | 0,040 |
| 85 | АИРНФ250М8 | 55 | 89,5 | 0,83 | 185 | 190 | 2,2 | 3,5 | 0,029 | 0,031 |
| 86 | АИРНФ280L8 | 75 | 90 | 0,84 | 257 | 190 | 2,2 | 4,0 | 0,031 | 0,040 |
| 87 | АИРНФ280М8 | 90 | 90,5 | 0,84 | 267 | 214 | 2,2 | 4,0 | 0,031 | 0,040 |
| 88 | АИРНФ315S8 | 110 | 91 | 0,84 | 311 | 225 | 2,2 | 3,5 | 0,030 | 0,032 |
| 89 | АИРНФ315М8 | 132 | 91,5 | 0,84 | 364 | 247 | 2,2 | 3,5 | 0,031 | 0,031 |
| 90 | АИРНФ355S8 | 160 | 92 | 0,86 | 353 | 285 | 2,2 | 2,7 | 0,024 | 0,026 |
| 91 | АИРНФ355М8 | 200 | 92,5 | 0,86 | 359 | 350 | 2,2 | 2,7 | 0,022 | 0,025 |

Приложение Ж (справочное)

Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии 4П

| № | Тип электродвигателя | P_n , кВт | I_n , А | К.П.Д., % |
|---|----------------------|-------------|-----------|-----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $U_n = 220 \text{ В} ; n_n = 3000 \text{ об/мин}$ | | | | |
| 1 | 4ПО80А2 | 0,37 | 2,9 | 61,5 |
| 2 | 4ПО80А2 | 0,75 | 4,3 | 72,0 |
| 3 | 4ПО80В1 | 1,1 | 5,9 | 72,0 |
| 4 | 4ПО100S1 | 1,6 | 9,0 | 75,0 |
| 5 | 4ПО100S2 | 2,2 | 12,5 | 79,0 |
| 6 | 4ПО100L1 | 3,0 | 17,5 | 80,0 |
| 7 | 4ПО112М2 | 5,5 | 24,5 | 83,0 |
| $U_n = 220 \text{ В} ; n_n = 2200 \text{ об/мин}$ | | | | |
| 8 | 4ПО80А2 | 0,25 | 1,8 | 58,0 |
| 9 | 4ПО80А2 | 0,55 | 2,8 | 70,0 |
| 10 | 4ПО80В1 | 0,75 | 4,2 | 67,0 |
| 11 | 4ПО100S1 | 1,1 | 5,1 | 74,0 |
| 12 | 4ПО100S2 | 1,5 | 8,5 | 76,0 |
| 13 | 4ПО100L1 | 2,2 | 11,7 | 76,0 |
| 14 | 4ПО112М2 | 4,0 | 21,4 | 79,0 |
| $U_n = 220 \text{ В} ; n_n = 1500 \text{ об/мин}$ | | | | |
| 15 | 4ПО80А2 | 0,37 | 2,1 | 61,5 |
| 16 | 4ПО80В2 | 0,55 | 2,9 | 66,0 |
| 17 | 4ПО100S1 | 0,75 | 4,3 | 70,0 |
| 18 | 4ПО100S2 | 1,1 | 5,9 | 75,0 |
| 19 | 4ПО100L1 | 1,5 | 8,7 | 74,0 |
| 20 | 4ПО112М1 | 2,2 | 12,0 | 74,0 |
| 21 | 4ПО112М2 | 3,0 | 18,4 | 74,0 |
| $U_n = 220 \text{ В} ; n_n = 1000 \text{ об/мин}$ | | | | |
| 22 | 4ПО80А2 | 0,25 | 1,4 | 58,0 |
| 23 | 4ПО80В1 | 0,37 | 2,1 | 65,0 |
| 24 | 4ПО100S1 | 0,55 | 2,85 | 65,0 |
| 25 | 4ПО100S2 | 0,75 | 4,25 | 66,0 |
| 26 | 4ПО100L1 | 1,1 | 5,25 | 68,0 |
| 27 | 4ПО112М1 | 1,5 | 9,3 | 71,0 |
| 28 | 4ПО112М2 | 2,2 | 13,3 | 70,0 |
| $U_n = 220 \text{ В} ; n_n = 750 \text{ об/мин}$ | | | | |
| 29 | 4ПО100S1 | 0,37 | 1,95 | 60,5 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|------------|------|------|------|
| 30 | 4ПО100S2 | 0,55 | 2,9 | 60,0 |
| 31 | 4ПО100L1 | 0,75 | 4,2 | 67,0 |
| 32 | 4ПО112M2 | 1,5 | 9,75 | 66,0 |
| U_н =220 В ; П_н = 3000 об/мин | | | | |
| 33 | 4ПНМ132L04 | 3,5 | 16,5 | 74,0 |
| 34 | 4ПНМ112L04 | 5,3 | 21,2 | 83,0 |
| 35 | 4ПНМ160L04 | 6,3 | 26,9 | 82,0 |
| 36 | 4ПНМ200S04 | 9,0 | 36,1 | 86,0 |
| 37 | 4ПНМ132M04 | 10,6 | 44,8 | 84,0 |
| 38 | 4ПНМ180L04 | 11,0 | 47,8 | 83,0 |
| 39 | 4ПФМ200M04 | 22,0 | 78,4 | 85,5 |
| 40 | 4ПФМ200S | 45,0 | 216 | 86,0 |
| 41 | 4ПН225M | 48,0 | 218 | 87,3 |
| 42 | 4ПФМ225M | 55,0 | 287 | 87,6 |
| 43 | 4ПФМ225L | 63,0 | 324 | 88,7 |
| U_н = 220 В ; П_н = 2500 об/мин | | | | |
| 44 | 4ПНМ112L04 | 0,8 | 3,9 | 59,0 |
| 45 | 4ПНМ160L04 | 4,0 | 19,1 | 76,0 |
| 46 | 4ПНМ180L04 | 5,6 | 29,4 | 79,0 |
| 47 | 4ПНМ180S04 | 7,1 | 33,6 | 80,0 |
| 48 | 4ПН225S | 16,0 | 76,0 | 80,5 |
| 49 | 4ПН225M | 20,0 | 94,6 | 83,0 |
| 50 | 4ПН225S | 22,0 | 112 | 83,5 |
| 51 | 4ПН225L | 32,0 | 158 | 85,0 |
| 52 | 4ПН250L | 40,0 | 202 | 85,0 |
| 53 | 4ПН250M | 48,0 | 210 | 85,5 |
| 54 | 4ПФМ250M | 55,0 | 274 | 87,6 |
| 55 | 4ПФМ250S | 75,0 | 371 | 88,5 |
| 56 | 4ПФМ250L | 90,0 | 486 | 88,7 |
| U_н =220 В ; П_н = 1500 об/мин | | | | |
| 57 | 4ПНМ112M04 | 2,5 | 11,5 | 73,0 |
| 58 | 4ПНМ132M04 | 4,0 | 22,2 | 79,0 |
| 59 | 4ПНМ132L04 | 5,5 | 29,4 | 80,0 |
| 60 | 4ПОМ200S | 14,0 | 73,5 | 88,0 |
| 61 | 4ПНМ180L04 | 15,0 | 84,6 | 86,0 |
| 62 | 4ПОМ200M | 17,0 | 92,4 | 89,0 |
| 63 | 4ПНМ200L04 | 18,5 | 102 | 86,0 |
| 64 | 4ПНМ225L04 | 22,0 | 128 | 87,5 |
| 65 | 4ПНМ225M | 30,0 | 164 | 88,5 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|------------|------|------|------|
| 66 | 4ПН280S | 34,0 | 178 | 84,5 |
| 67 | 4ПН225S | 37,0 | 188 | 86,5 |
| 68 | 4ПФМ225S | 45,0 | 217 | 86,8 |
| 69 | 4ПФМ225М | 55,0 | 287 | 87,6 |
| 70 | 4ПН250S | 60,0 | 356 | 87,1 |
| 71 | 4ПФМ225L | 63,0 | 370 | 88,7 |
| 72 | 4ПФМ250S | 67,0 | 382 | 88,2 |
| 73 | 4ПН250М | 71,0 | 380 | 89,5 |
| 74 | 4ПФМ250М | 80,0 | 405 | 88,5 |
| 75 | 4ПН280S | 110 | 508 | 89,0 |
| 76 | 4ПФМ280S | 125 | 632 | 87,0 |
| 77 | 4ПФМ280М | 140 | 784 | 88,4 |
| U_H = 220 В ; n_H = 1000 об/мин | | | | |
| 78 | 4ПНМ132М04 | 2,5 | 1,6 | 71,0 |
| 79 | 4ПНМ132L04 | 3,15 | 2,3 | 74,0 |
| 80 | 4ПНМ180L04 | 11,0 | 61,4 | 83,0 |
| 81 | 4ПНМ200L04 | 16,0 | 78,0 | 86,0 |
| 82 | 4ПФМ200М | 22,0 | 132 | 85,5 |
| 83 | 4ПФМ225S | 26,5 | 146 | 83,0 |
| 84 | 4ПФМ225L | 45,0 | 219 | 85,0 |
| 85 | 4ПН250М | 48,0 | 236 | 85,5 |
| 86 | 4ПФМ250М | 55,0 | 286 | 87,5 |
| 87 | 4ПН280S | 75,0 | 385 | 88,5 |
| 88 | 4ПФМ280S | 90,0 | 480 | 88,0 |
| 89 | 4ПФМ280L | 125 | 532 | 88,5 |
| U_H = 220 В ; n_H = 750 об/мин | | | | |
| 90 | 4ПНМ160М04 | 3,0 | 18,2 | 75,0 |
| 91 | 4ПОМ200S | 6,0 | 39,5 | 81,5 |
| 92 | 4ПНМ180L04 | 7,1 | 48,2 | 80,0 |
| 93 | 4ПН225S | 16,0 | 63,0 | 80,5 |
| 94 | 4ПФМ200М | 18,5 | 104 | 82,5 |
| 95 | 4ПФМ225S | 21,0 | 131 | 80,1 |
| 96 | 4ПФМ225L | 22,0 | 136 | 82,0 |
| 97 | 4ПФМ225М | 27,0 | 164 | 82,0 |
| 98 | 4ПН250М | 32,0 | 174 | 84,0 |
| 99 | 4ПФМ250L | 33,5 | 180 | 82,3 |
| 100 | 4ПФМ250М | 42,0 | 222 | 84,5 |
| 101 | 4ПН280S | 45,0 | 245 | 87,0 |
| 102 | 4ПН280М | 55,0 | 286 | 87,5 |
| 103 | 4ПФМ280М | 71,0 | 346 | 88,0 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------|-----|------|
| U_н = 220 В ; П_н = 600 об/мин | | | | |
| 104 | 4ПН225S | 12,5 | 78 | 79,5 |
| 105 | 4ПН225М | 15,0 | 94 | 79,0 |
| 106 | 4ПФМ225S | 18,0 | 106 | 78,0 |
| 107 | 4ПФМ225М | 20,0 | 128 | 79,0 |
| 108 | 4ПН225250М | 24,0 | 134 | 82,0 |
| 109 | 4ПФМ225L | 26,5 | 140 | 79,5 |
| 110 | 4ПН280S | 34,0 | 172 | 84,5 |
| 111 | 4ПН280М | 37,0 | 184 | 85,5 |
| 112 | 4ПФМ280S | 45,0 | 223 | 87,5 |
| 113 | 4ПФМ280М | 55,0 | 287 | 87,5 |
| U_н = 220 В ; П_н = 500 об/мин | | | | |
| 114 | 4ПН225S | 8,5 | 48 | 77,0 |
| 115 | 4ПФМ225L | 20,0 | 106 | 75,0 |
| 116 | 4ПФМ250L | 36,0 | 174 | 85,0 |
| 117 | 4ПФМ280L | 55,0 | 288 | 88,0 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бастрон А.В. и др. Электропривод. Лабораторный практикум.- Красноярск.: КрасГАУ, 2005.- 228 с.
2. ГОСТ 8.417-81. Единицы физических величин : М.: Изд-во стандартов, 1981,- 40 с.
3. ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам : - Минск.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.- 36 с.
4. Двигатели постоянного тока серии 4П /Сводный отраслевой каталог Информэлектро. – М.: Информэлектро, 1993.- 28 с.
5. Епифанов А.П. Основы электропривода.- СПб.: Лань, 2008.-191 с.
6. Епифанов А.П., Гушинский А.Г., Малайчук Л.М. Электропривод в сельском хозяйстве.- Сп.б.: Лань, 2010. – 223 с.
7. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод. Энерго- и ресурсосбережение.- М.: Академия, 2008. – 202 с.
8. Коломиец А.П. и др. Электропривод и электрооборудование.- М.: КолосС, 2008.-328 с.
9. Левин А.А. Самоучитель работы на компьютере.-5 изд.- М.: Нолидж, 1999.-617 с.
10. Москаленко В.В. Электрический привод. -М.: Академия, 2007.- - 361 с.
11. Онищенко Г.Б. Электрический привод.-М.:Академия, 2008.-288 с.
12. Рычкова Л.П. Электропривод. Примеры решения типовых задач : Учебное пособие рекомендованное УМО.- Иркутск.: ИрГСХА, 2004.- 102 с.
13. Рычкова Л.П. Электропривод. Учебно пособие предназначенное для выполнения контрольной работы студентами энергетического факультета 5 курса заочного обучения специальности 110302.65.- - ИрГСХА, 2009.- 86 с.
14. Рычкова Л.П., Боннет В.В. Электропривод сельскохозяйственных машин. Курсовая работа. Учебное пособие рекомендованное УМО.- ИрГСХА, 2011.- 138 с.
15. Унифицированная серия асинхронных двигателей ИНТЕР-ЭЛЕКТРО./ Под редакцией доктора технических наук В.И. Радина.- М.: Энергоатомиздат, 1990. – 67 с.
16. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электрического привода.- М.: КолосС, 2007.-252 с.
17. Шичков Л.П. Электрический привод.- М.: КолосС, 2006. – 279 с.