

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

**А.А. МАРТЫНОВ**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ МЕХАТРОННЫХ И  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2019 г

УДК 62-83.681.513.3

М29 А.А. Мартынов.

Электрические и гидравлические приводы мехатронных и робототехнических устройств. / А.А. Мартынов. СПб.: ГУАП, 2019. - 110 с.: ил.

Рецензенты:

кандидат технических наук *М.В. Бураков*

кандидат технических наук *Р.Ш. Еникеев*

Учебное пособие содержит методические указания к проведению практических занятий и является неотъемлемой частью учебно-методического обеспечения изучаемой дисциплины и должны способствовать реализации трех основных функций практических занятий – познавательной, развивающей и воспитательной.

Учебное пособие «Основы теории и практики электромашино-вентильных систем» предназначено для студентов, изучающих курсы «Основы теории и практики электромашино-вентильных систем», «Электрические и гидравлические приводы мехатронных и робототехнических устройств», «Электрический привод», «Проектирование электрических приводов».

Учебное пособие «содержат методические материалы, необходимые для подготовки и проведения практических занятий по перечисленным выше курсам.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Практическое занятие является одной из основных форм организации учебного процесса, заключающейся в выполнении обучающимися под руководством преподавателя комплекса учебных заданий с целью усвоения научно-теоретических основ учебной дисциплины, приобретения умений и навыков, опыта творческой деятельности.

Целью практических занятий для обучающихся является формирование у студентов аналитического, творческого мышления путем приобретения навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине. Планируемые результаты при освоении обучающимися практических занятий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний, полученных в процессе лекционного обучения и самостоятельной работы;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками расчета и исследования электрических приводов;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения;
- обеспечение студентам условий для проверки уровня освоения полученных знаний;
- обеспечение преподавателю условий и возможностей контролировать уровень и эффективность самостоятельной работы студентов.

При проведении практических занятий основное внимание уделяется формированию у студентов конкретных умений и навыков, что и определяет содержание деятельности студентов на практических занятиях - решение задач, освоение и уточнение методик и методов расчета электрических приводов.

При подготовке к практическим занятиям студенты должны, используя конспекты лекций, методические указания, рекомендованную литературу по теме практического занятия, изучить методику решения задачи и подготовиться к ответу на контрольные вопросы.

Для удобства студентов в учебном пособии приведены справочные данные по стандартным электрическим машинам, необходимые при решении задач.

Каждый студент должен иметь индивидуальную рабочую тетрадь, в которую заносит результаты выполнения каждого пункта задания (схемы, диаграммы, графики, таблицы, результаты расчетов, ответы на вопросы пунктов задания и т.п.).

За 10 мин до окончания занятия преподаватель проверяет объем выполненной на занятии работы и отмечает результат в рабочем журнале. Оставшиеся невыполненными пункты задания практического занятия студент обязан доделать самостоятельно.

После проверки рабочей тетради преподаватель может проводить устный или письменный опрос студентов для контроля усвоения ими основных теоретических и практических знаний по теме занятия (студенты должны знать смысл полученных ими результатов и ответы на контрольные вопросы). По результатам проверки рабочей тетради и опроса выставляется оценка за практическое занятие.

В табл.1 приведены 19 тем практических занятий и их трудоемкость для дисциплин «Электрический привод», «Электрические и гидравлические приводы мехатронных и робототехнических устройств» и «Проектирование электрических приводов».

Таблица 1. Практические занятия и их трудоемкость

№ п/п	Темы практических занятий	Формы практических занятий	Трудоемкость, час
1	Расчет времени переходного процесса $t_{п.п}$ при увеличении скорости вращения двигателя постоянного тока от $\Omega_{нач}$ до $\Omega_{кон}$ при заданных параметрах двигателя постоянного тока	Решение задач	2
2	Расчет времени переходного процесса $t_{п.п}$ при снижении скорости вращения в $N$ раз при заданных параметрах двигателя постоянного тока	Решение задач	2
3	Расчет параметров электропривода постоянного тока при заданных параметрах двигателя постоянного тока	Решение задач	4
4	Расчет и построение кривых переходного процесса $\Omega(t)$ и $M(t)$ при линейной механической характеристике двигателя	Решение задач	4

5	Расчет естественной и искусственных механических характеристик ЭП постоянного тока при реостатном способе регулирования скорости вращения	Решение задач	4
6	Расчет добавочных сопротивлений цепи обмотки якоря при динамическом, рекуперативном торможении и торможении противовключением	Решение задач	2
7	Приведение момента инерции и статического момента сопротивления нагрузки грузоподъемного механизма к валу электродвигателя	Решение задач	2
8	Приведение момента инерции и статического момента сопротивления нагрузки тележки мостового крана к валу электродвигателя	Решение задач	2
9	Расчет параметров реостатного пуска двигателя постоянного тока	Решение задач	4
10	Расчет искусственных электромеханических характеристик электропривода постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем в цепи обмотки якоря	Решение задач	2
11	Расчет искусственных электромеханических характеристик электропривода постоянного тока с реверсивным широтно-импульсным преобразователем в цепи обмотки якоря	Решение задач	2
12	Расчет естественной и искусственных механических характеристик асинхронного двигателя	Решение задач	4
13	Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя	Решение задач	4

14	Расчет параметров электрического привода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению	Решение задач	2
15	Расчет параметров электрического привода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости	Решение задач	2
16	Расчет параметров электрического привода постоянного тока с положительной обратной связью по току якоря	Решение задач	2
17	Расчет параметров электрического привода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению и положительной обратной связью по току якоря	Решение задач	2
18	Расчет параметров электрического привода с отрицательной обратной связью по скорости и положительной обратной связью по току якоря	Решение задач	4
19	Расчет параметров электрического привода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и с отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой»	Решение задач	4

В роботах и мехатронных устройствах находят практическое применение все известные типы приводов - электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные. Примером последних являются сочетания гидравлического и пневматического, гидравлического и электрического приводов. Доля того или иного привода в роботах все время меняется. Сравним наиболее распространенные типы приводов.

Пневматический привод. Достоинства: простота устройства и эксплуатации при средней квалификации обслуживающего персонала, низкая стоимость, высокая надежность, высокое быстродействие. Недостатки: плохая управляемость, сложная реализация следящего режима из-за невысокой жесткости механической характеристики, низкий КПД, сложность обеспечения плавности переходных процессов. Область применения:

нерегулируемые приводы с цикловым управлением (захват) грузоподъемностью до 10... 15 кг, реже - до 20...30 кг.

Гидравлический привод. Достоинства: удовлетворительная жесткость механической характеристики, возможность реализации практически любых законов движения исполнительного механизма достаточно простыми средствами, высокое быстродействие, высокая удельная мощность на единицу массы при мощностях 1 кВт и выше, простота фиксации с помощью гидрозамка (при отключении питания). Недостатки: большая сложность, утечка масла, высокая стоимость, сложность обслуживания, требующая введения в штат электрика и гидравлика достаточно высокой квалификации. Область применения: роботы большой грузоподъемности (свыше 15 кг) с позиционным и контурным режимами управления.

Электрический привод. Достоинства: простота передачи энергии, позволяющая создавать компактные передвижные роботы, низкая стоимость, большая экономичность в эксплуатации, высокий КПД, хорошие возможности по унификации. Недостатки: низкие массогабаритные показатели из-за отсутствия в настоящее время в промышленном производстве малогабаритных быстродействующих электродвигателей и электромеханизмов, сложность фиксации привода при отсутствии питания. Область применения: роботы средней грузоподъемности (20...50 кг), легкие роботы с позиционным и контурным управлением, подвижные роботы с цикловым и простым позиционным управлением (в последнем случае они оказываются выгоднее гидравлических).

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 1.1. Краткие теоретические сведения по основам электропривода постоянного тока

Основная схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) представлена на рис.1, где приняты следующие обозначения:

$I, I_{\text{в}}$ , – соответственно токи в цепях обмоток якоря и возбуждения ОВ, А;

$E$  – ЭДС обмотки якоря, В;

$\Omega$  и  $M$  – соответственно угловая скорость (рад/с) и момент (Нм) двигателя;

$R_{\text{я}} = r_{\text{оя}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{ко}} + r_{\text{щ}}$  – сопротивление цепи обмотки якоря, состоящее из сопротивлений обмотки якоря, добавочных полюсов, компенсационной обмотки и щеточного контакта, Ом;

$R_{\text{ов}}$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$L_{\text{я}}, L_{\text{ов}}$  – соответственно индуктивности обмоток якоря и возбуждения, Гн.

На схеме показаны добавочные резисторы в цепях обмоток якоря  $R_{\text{д}}$  и возбуждения  $R_{\text{в}}$ , а также отдельные источники питания обмоток якоря и возбуждения с напряжениями соответственно  $U$  и  $U_{\text{в}}$ .

Уравнение равновесия напряжения цепи обмотки якоря, ЭДС якоря и электромагнитного момента для установившегося режима работы двигателя без учета реакции якоря и механических потерь имеют вид [1]:

$$U = E + IR_{\text{я.ц}}; \quad (1.1)$$

$$E = C_e \Phi \Omega; \quad (1.2)$$

$$M = C_m \Phi I; \quad (1.3)$$

$$\Phi = \text{const},$$

где  $R_{\text{я.ц}} = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$  – полное сопротивление цепи якоря, Ом;

$R_{\text{д}}$  – регулировочное сопротивление цепи обмотки якоря;

$\Phi$  – магнитный поток, Вб;

$U$  – подводимое к якорю напряжение, В;

$C_e = p_{\text{п}} N / (2\pi a)$  – конструктивный коэффициент двигателя;

$p_{\text{п}}$  – число пар полюсов;

$N$  – число активных проводников обмотки якоря;

$a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

В системе СИ коэффициенты  $C_m = C_e$ .

При условии  $\Phi = \text{const}$  произведения  $C_e \Phi$  и  $C_m \Phi$  также постоянны и могут быть обозначены постоянными коэффициентами  $k_e = C_e \Phi$  и  $k_m = C_m \Phi$ .

Коэффициент  $k_e = C_e \Phi$  принято называть *коэффициентом ЭДС двигателя*. Численно он равен ЭДС обмотки якоря двигателя, вращающегося со скоростью 1 рад/с при номинальном магнитном потоке.

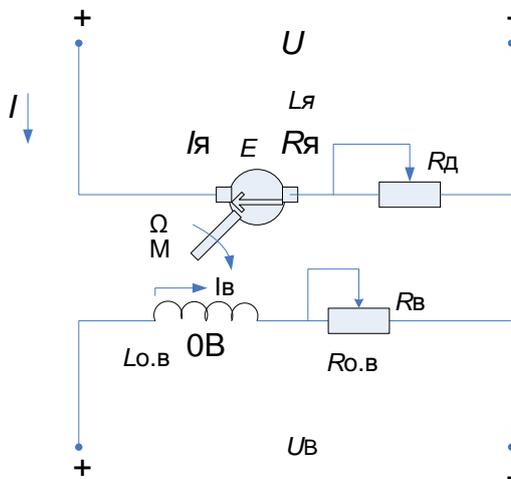
Коэффициент  $k_M = C_M \Phi$  принято называть *коэффициентом момента двигателя*. Численно он равен моменту, развиваемому двигателем при 1 А тока якоря и номинальном магнитном потоке.

Подставляя (1.2) в (1.1), получим формулу для электромеханической характеристики  $\Omega(I)$ :

$$\Omega = (U - IR_{я.ц}) / (C_e \Phi). \quad (1.4)$$

Формулу для механической характеристики  $\Omega(M)$  ДПТ НВ получим из (1.4) с использованием выражения (1.3):

$$\Omega = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{MR_{я.ц}}{(C_e \Phi)^2}. \quad (1.5)$$



**Рис. 1.1.** Схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

В соответствии с (1.4) и (1.5) электромеханическая и механическая характеристики ДПТ НВ представляют собой линейные зависимости угловой скорости (далее скорости) от тока и момента, вид которых для разных полярностей питающего якоря напряжения показан на рис.1.2. Здесь электромеханическая и механическая характеристики совмещены, что в соответствии с (1.3) справедливо в случае  $C_e \Phi = \text{const}$ .

Их характерными точками являются точка холостого хода, в которой  $\Omega = \Omega_0$ , а  $I = 0$ ,  $M = 0$ , и точка короткого замыкания, где  $\Omega = 0$ , а  $I = I_{кз}$  и  $M = M_{кз}$ . Отметим, что режим короткого замыкания для электрического двигателя соответствует неподвижному состоянию якоря при поданном на двигатель напряжении, а не замыканию его электрических цепей между собой или на корпус. Режим короткого замыкания называется также пусковым режимом, поскольку является начальным при включении (пуске) двигателя.

Уравнения (1.4) и (1.5) можно записать в сокращенной форме:

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega, \quad (1.6)$$

где  $\Omega_0$  – скорость идеального холостого хода двигателя;

$$\Omega_0 = U / (C_e \Phi); \quad (1.7)$$

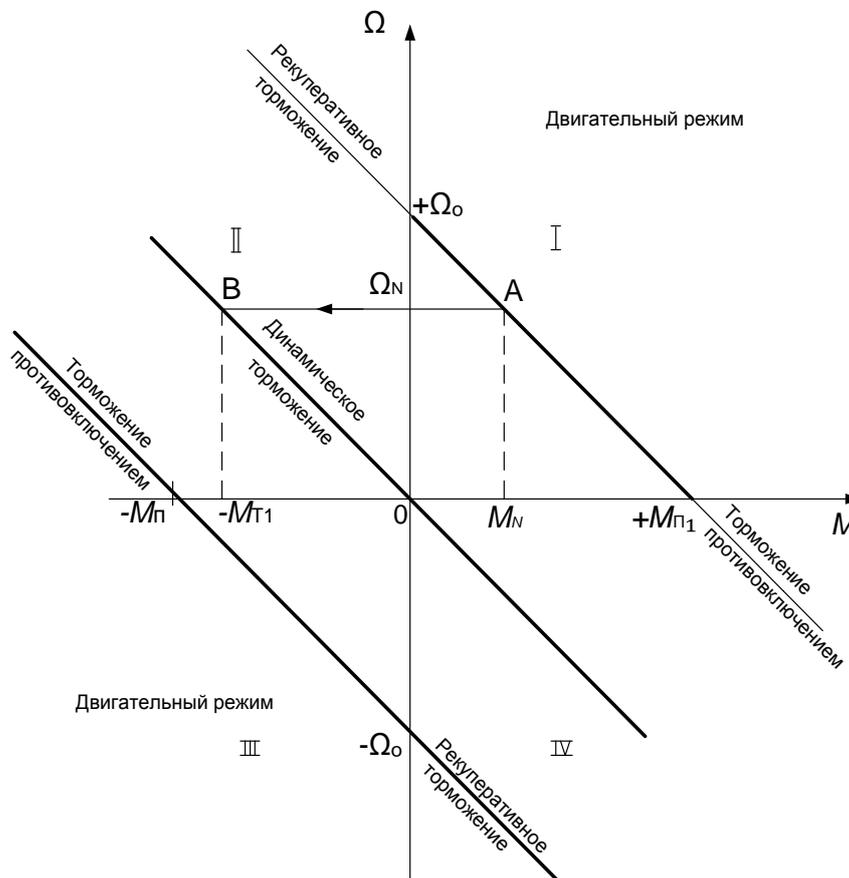
$\Delta\Omega$  – изменение (перепад) угловой скорости относительно скорости идеального холостого хода,

$$\Delta\Omega = IR_{я,ц} / (C_e \Phi) = MR_{я,ц} / (C_e \Phi)^2. \quad (1.8)$$

Выражения (1.4) и (1.5) позволяют определить основные способы реализации искусственных характеристик ДПТ НВ:

- изменение сопротивления добавочного резистора в цепи якоря ( $R_d$ );
- изменение магнитного потока  $\Phi$ ;
- изменение подводимого к якорю напряжения  $U$ .

Отметим, что значения входящих в эти выражения тока и момента определяются только механической нагрузкой двигателя  $M_c$  и не могут быть установлены произвольно.



**Рис.1.2.** Статические механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

## 1.2. Режимы торможения, холостого хода и короткого замыкания двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Режимы торможения, холостого хода и короткого замыкания двигателя постоянного тока независимого возбуждения относят к энергетическим режимам работы электрической машины [1].

Электрическая машина обладает так называемым свойством обратимости, т.е. она может работать как двигателем, преобразуя электрическую энергию в механическую, так и генератором, осуществляя обратное преобразование энергии. При этом переход из одного режима в другой может происходить без изменения схемы включения. При работе двигателей в генераторном режиме на валу электрической машины создается тормозной момент, обеспечивающий интенсивное принудительное замедление (торможение) движения ЭП и, следовательно, расширяющий его возможности по управлению движением исполнительного органа (в частности, при его торможении и реверсе).

Энергетический режим работы электрической машины можно определить исходя из взаимных направлений двух переменных: электрических (ЭДС  $E$  и тока  $I$ ) или механических (момента  $M$  и скорости  $\Omega$ ). При одинаковых направлениях скорости и момента и разных направлениях тока и ЭДС имеет место двигательный режим работы, а при противоположных направлениях скорости и момента и одинаковых направлениях ЭДС и тока – генераторный. Граничными между двигательным и генераторным являются режимы холостого хода и короткого замыкания, в которых одна электрическая и одна механическая переменные равны нулю. При холостом ходе нулю равны ток и момент, а при коротком замыкании – ЭДС и скорость.

Рассмотрим режимы работы двигателя на различных участках его характеристик (см. рис. 1. 2) при положительной полярности напряжения  $U$ .

**Режим холостого хода** (точка  $A$ ). Двигатель не получает энергии ни из электрической сети (за исключением электроэнергии на возбуждение), ни с вала. В этом режиме  $I = 0$ ,  $E = U = C_e \Phi \Omega_0$ ,  $M = 0$ ,  $\Omega = \Omega_0$ . Эту точку механической характеристики иногда называют точкой «идеального холостого хода».

**Режим короткого замыкания** возникает при неподвижном роторе и наличии напряжения на обмотке якоря, при этом  $\Omega = 0$  и  $E = 0$ . В этом режиме  $I = I_{кз} = U/R_{я.ц}$ , а электрическая энергия, поступающая из сети, рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи. Механическая энергия с вала ДПТ не отдается, так как  $\Omega = 0$ . Такой режим возникает в момент пуска двигателя в ход. В первый момент времени после подачи напряжения на якорь двигателя якорь неподвижен и ЭДС обмотки якоря равна нулю. Режим прямого пуска двигателя от сети допускается только для микродвигателей. В таких двигателях сопротивление обмотки якоря относительно велико и пусковой ток не превышает  $(3-5)I_N$ . В машинах повышенной мощности сопротивления обмотки якоря мало и ток при пуске может в 10–20 раз превышать номинальный ток. Такой большой ток может повредить коллектор, щетки и обмотку якоря. Для ограничения величины пускового тока необходимо в цепь обмотки якоря включать пусковой реостат.

**Двигательный режим** (участок от  $+\Omega_0$  до  $M_n$  характеристики, приведенной на рис.1.2,) в диапазоне  $0 < \Omega < \Omega_0$ , т. е. в первом квадранте, где  $\Omega$  и  $M$  совпадают по направлению. В этом режиме  $E < U$ , ток  $I = (U - E)/R$  совпадает по направлению с напряжением  $U$  и не совпадает с ЭДС, электрическая энергия (ЭЭ) поступает из сети, а механическая энергия (МЭ) с вала двигателя передается исполнительному органу.

### **Способы торможения двигателей постоянного тока**

Во многих случаях возникает необходимость затормозить ЭП. Торможение можно осуществить различными механическими и электромеханическими тормозами. Однако в качестве тормоза может быть использован и сам двигатель, поскольку любая электрическая машина обладает свойством обратимости, т.е. одна и та же электрическая машина может работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. При смене двигательного режима на генераторный происходит изменение знака электромагнитного момента машины. При двигательном режиме работы знак момента совпадает со знаком (направлением) скорости вращения, а при генераторном – знак момента противоположен знаку скорости. Торможение самим двигателем повышает экономичность установки и упрощает ее. Существует три метода торможения электрических двигателей: динамическое, рекуперативное и торможение противовключением [1].

При динамическом торможении якорь электродвигателя отключают от питающей сети и замыкают на нагрузочное сопротивление (см. рис. 3).

Машина переходит в генераторный режим работы и превращает запасенную кинетическую энергии вращающихся частей ЭП в электрическую энергию, которая выделяется на сопротивлении обмотки якоря  $R_{я}$  и сопротивлении  $R_{д2}$ , включенным в цепь обмотки якоря,  $R_{я} + R_{д2} = R_{я.ц}$ .

Ток обмотки якоря в режиме динамического торможения протекает под воздействием ЭДС обмотки якоря. Поскольку ЭДС обмотки якоря имеет знак противоположный знаку напряжения, подаваемого на машину, ток якоря и электромагнитный момент изменяют свои знаки на противоположные. Момент становится тормозным, скорость двигателя уменьшается до нуля, двигатель останавливается.

На рис.1.2 показана характеристика динамического торможения ДПТ НВ, уравнения которой получают из (1.4) и (1.5) при  $U = 0$ :

$$\Omega = -IR_{я.ц} / (C_e \Phi). \quad (1.9)$$

$$\Omega = -MR_{я.ц} / (C_e \Phi)^2. \quad (1.10)$$

Из (1.9) и (1.10) видно, что характеристики  $\Omega(I)$  и  $\Omega(M)$  при  $U = 0$  являются линейными.

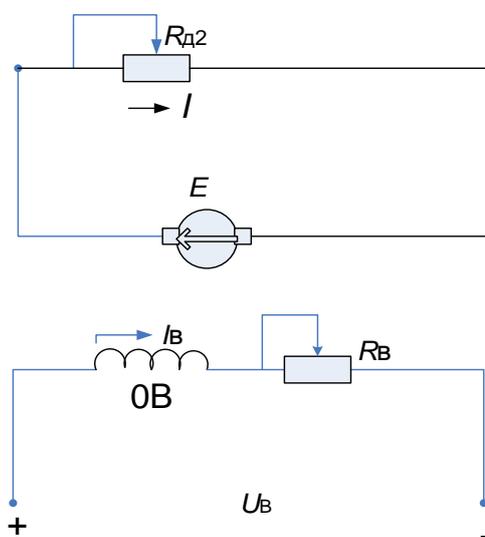
Прямая линия ВО на рис. 1.2 (во втором квадранте) представляет собой механическую характеристику двигателя постоянного тока в режиме динамического торможения. Эффективность торможения по мере снижения скорости вращения падает, так как величина тормозного момента двигателя

зависит от скорости. Динамическое торможение применяют в машинах с независимым электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением.

В двигателях с параллельным и последовательным возбуждением обмотка возбуждения в период динамического торможения должна получать независимое питание от сети, поскольку при работе машины в режиме самовозбуждения уменьшение скорости нарушает условие самовозбуждения и тормозной момент становится недостаточным для эффективного торможения.

Сопротивление добавочного резистора  $R_{д2}$  при динамическом торможении

$$R_{д2} = E/I_{доп} - R_{я} \approx U/I_{доп} - R_{я}. \quad (1.11)$$



**Рис.1.3.** Схема динамического торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

*Рекуперативное торможение* двигателя осуществляют путем отдачи электрической энергии в сеть постоянного тока, питающую двигатель. Двигатель получает механическую энергию от рабочей машины и отдает ее (рекуперировать) в виде электрической энергии в сеть. На этом участке  $\Omega > +\Omega_0$ , поэтому ЭДС обмотки якоря больше напряжения сети, ток и момент изменяют свои направления на противоположные.

Из (1.1) можно получить выражение для тока якоря

$$I = \frac{U - E}{R_{я.ц}}.$$

Из приведенного выражения для тока якоря видно, что при  $E > U$  ток якоря становится отрицательным, следовательно, и момент изменяет свой знак и становится тормозным. Механическая характеристика двигателя при рекуперативном торможении представляет собой продолжение статической механической характеристики двигательного режима ( $+\Omega_0, M_{п}$ ) во втором квадранте статических характеристик  $\Omega(M)$  (см. рис. 1.2). При рекуперативном торможении кинетическая энергия вращающихся масс ЭП расходуется не на

истирание механических тормозов, не на нагрев добавочных сопротивлений, как в случае динамического торможения, а отдается в сеть и может быть полезно использована другими приемниками электрической энергии. Поэтому рекуперативное торможение широко используется в ЭП, имеющих значительные инерционные массы. Двигатель с последовательным возбуждением, используемый в тяговых устройствах, нельзя непосредственно перевести в генераторный режим. Процесс рекуперации более просто осуществляется в машинах со смешанным возбуждением, благодаря чему они находят применение в тяговых ЭП.

*Торможение противовключением* применяют при необходимости быстрого торможения двигателя для производства реверса, т.е. разгону двигателя в направлении, противоположном начальному. Для этого полярность напряжения, приложенного к якорю, изменяют на противоположную. При таком переключении направления тока обмотки якоря и электромагнитного момента изменяются:

$$I_{\text{пр}} = \frac{-U - C_e \Phi \Omega}{R_{\text{я.ц}}};$$

$$M = -C_m \Phi I_{\text{пр}}.$$

В начальный период в якорной цепи напряжение и ЭДС обмотки якоря будут действовать согласовано, создавая очень большой ток обмотки якоря и тормозной момент.

Для ограничения толчков тока и момента при противовключении в якорную цепь вводят добавочное сопротивление  $R_{\text{дз}}$ . В этом случае при расчете тока якоря следует принимать суммарное сопротивление цепи обмотки якоря  $R_{\text{я.ц}} = R_{\text{я}} + R_{\text{дз}}$ . Величину  $R_{\text{дз}}$  следует выбирать такой, чтобы ток  $I_{\text{пр}}$  не превышал значения  $(2-2,5)I_N$ .

Режим противовключения наступает и в том случае, когда знак приложенного к якорю напряжения остается прежним, а изменяется направление вращения двигателя, т.е.  $\Omega < 0$ . Характеристика, соответствующая этому режиму, представляет собой продолжение характеристики двигательного режима ( $+ \Omega_0, M_{\text{п}}$ ) в четвертом квадранте (см. рис.2). Такой режим возможен в ЭП грузоподъемных механизмах. За счет изменения направления скорости ЭДС обмотки якоря также меняет свою полярность. Полярность ЭДС в этом режиме совпадает с полярностью напряжения сети. Ток в якоре совпадает по направлению с напряжением и ЭДС и определяется их суммарным действием, т.е.

$$I_{\text{пр}} = (U + E)/R_{\text{я.ц}}.$$

В результате электроэнергия, поступающая из сети и вырабатываемая самим двигателем за счет преобразования механической энергии рабочей машины, рассеивается в виде тепла в резисторах цепи якоря.

Сопротивление добавочного резистора  $R_{\text{дз}}$  при реверсе или торможении противовключением

$$R_{\text{дз}} = (U + E)/I_{\text{доп.пр}} - R_{\text{я}} \approx 2U/I_{\text{доп.пр}} - R_{\text{я}}, \quad (1.12)$$

где  $I_{\text{доп.пр}}$  – допустимое значение тока обмотки якоря при торможении противовключением.

В двигателях малой мощности, которые находят широкое применение в электроприводах роботов для быстрого торможения и надежного фиксирования вала двигателя при аварийном останове иногда применяют встроенные электромеханические тормоза. Тормозные колодки во время работы двигателя фиксируются электромагнитом, обмотка которого включена параллельно обмотки якоря двигателя. При отключении двигателя одновременно снимается питание двигателя и обмотки якоря, тормозные колодки пружиной прижимаются к вращающемуся диску, насаженному на вал двигателя, и двигатель тормозится.

Таким образом, торможение ЭП можно реализовать при трех разновидностях генераторного режима работы ДПТ НВ.

*Эффективность электромеханического преобразования энергии* двигателя оценивается коэффициентом полезного действия (КПД)  $\eta$ , который определяется отношением механической мощности на его валу  $P_2 = M\Omega$  к потребляемой из сети электрической мощности  $P_1 = UI$ .

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Delta P) / P_1 = 1 - \Delta P / P_1, \quad (1.13)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в двигателе.

В состав потерь мощности в двигателе  $\Delta P$  входят:

- электрические потери в цепи обмотки якоря,  $\Delta P_{\text{эл1}}$ ;
- механические потери на трение щеток о коллектор и трение в подшипниках  $\Delta P_{\text{мх}}$ ;
- потери в стали магнитопровода якоря  $\Delta P_{\text{ст}}$ .

### **1.3. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи якоря**

Этот способ применяется при невысоких требованиях к показателям качества регулирования скорости ЭП, отличаясь в то же время универсальностью и простотой реализации (см. рис. 1.1) [1].

Из (1.4) видно, что скорость  $\Omega_0$  не зависит от  $R_d$ , а наклон характеристик, как это следует из (1.8), тем больше, чем больше  $R_d$ . Этот краткий анализ позволяет изобразить семейство механических (электромеханических) характеристик ДПТ НВ в виде совокупности линий (рис. 1.4) различного наклона (жесткости), проходящих через одну и ту же точку на оси скорости с ординатой  $\Omega_0$ . Характеристика 1 соответствует случаю, когда  $R_d = 0$  и является естественной, искусственные характеристики 2 – 4 построены при наличии в цепи якоря резисторов с сопротивлениями соответственно  $R_{d1} < R_{d2} < R_{d3}$ .

Оценим данный способ регулирования скорости по основным показателям. Диапазон регулирования скорости небольшой (обычно 2, ..., 3). Причина этого заключается в снижении жесткости характеристик по мере увеличения  $R_d$ .

Направление регулирования скорости – вниз от естественной характеристики. Плавность регулирования скорости определяется характером изменения  $R_d$ . Если это сопротивление изменяется плавно, то данный способ обеспечивает плавное регулирование скорости. Чаше же рассматриваемый способ обеспечивает ступенчатое регулирование скорости. Стабильность скорости снижается по мере увеличения диапазона регулирования, так как уменьшается жесткость регулировочных характеристик.

Экономичность регулирования скорости оценим, сопоставив требуемые капитальные затраты на реализацию данного способа и стоимость потерь мощности при регулировании. Капитальные затраты на приобретение добавочных резисторов небольшие, так как их стоимость невелика. В то же время потери мощности и соответственно непроизводительный расход электрическим приводом электрической энергии и ее стоимость оказываются существенными. Покажем это, оценив потери мощности в цепи якоря – основную долю потерь в двигателе.

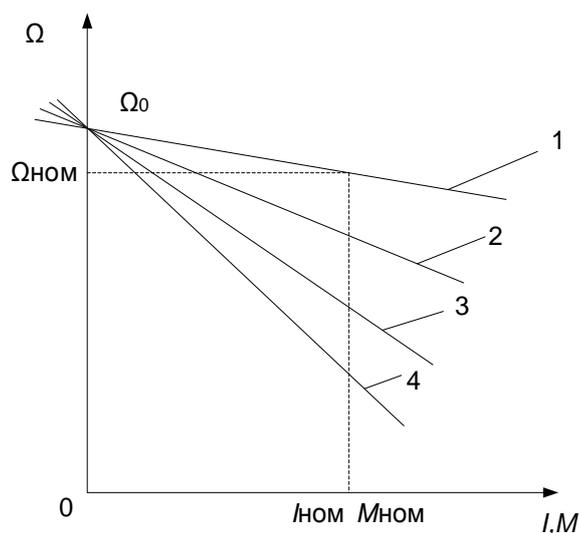
Пренебрегая механическими потерями мощности и потерями мощности в стали магнитопровода якоря можно определить электрические потери мощности в цепи обмотки якоря  $\Delta P_{эл1}$  как разность мощностей: потребляемой из сети  $P_1 = UI$  и полезной мощности, снимаемой с вала  $P_2 = M\Omega$ . С учетом соотношений (1.3) и (1.7) электрические потери цепи обмотки якоря можно определить по (1.14):

$$\Delta P_{эл1} = UI - M\Omega = C_e \Phi \Omega_0 I - C_e \Phi \Omega I = C_e \Phi \Omega_0 I (\Omega_0 - \Omega) / \Omega_0 = P_1 \delta, \quad (1.14)$$

где  $\delta = (\Omega_0 - \Omega) / \Omega_0 = \Delta \Omega / \Omega_0$  – относительный перепад скорости.

Из (1.14) видно, что при принятых выше допущениях относительно мощности механических потерь и потерь в стали уже при снижении скорости в два раза по сравнению со скоростью идеального холостого хода  $\Omega_0$ , т.е. при  $\delta = 0,5$  и при диапазоне регулирования скорости вращения равном 2, половина всей потребляемой из сети мощности  $P_1$  теряется в цепи обмотки якоря двигателя – КПД двигателя не превышает 50%. При дальнейшем увеличении диапазона регулирования КПД снижается в еще большей степени.

Допустимая нагрузка при работе двигателя на искусственных характеристиках определяется по предельно допустимому моменту, который он может развивать, не перегреваясь выше нормы.



**Рис.1.4.** Механические характеристики при различных значениях дополнительного сопротивления цепи обмотки якоря

Так как при данном способе регулирования магнитный поток не изменяется и равен номинальному, то при подстановке в (1.3)  $\Phi = \Phi_N$  и  $I = I_N$  получим:

$$M_{\text{доп}} = C_e \Phi_N I_N = M_N. \quad (1.15)$$

Выражение (1.15) показывает, что при рассматриваемом способе регулирования скорости ДПТ НВ может без перегрева работать на любой искусственной характеристике с моментом нагрузки, равным номинальному. Отметим, что способы регулирования скорости, при которых  $M_{\text{доп}} = M_N$ , в теории ЭП называются регулированием скорости при *постоянном моменте нагрузки*.

Сделанный вывод о характере допустимой нагрузки справедлив для ДПТ НВ, у которых охлаждение не ухудшается по мере снижения скорости. В тех же случаях, когда ДПТ НВ охлаждается с помощью вентилятора на своем валу, момент нагрузки при снижении скорости необходимо также уменьшить из-за ухудшения вентиляции двигателя.

Для регулирования скорости движения исполнительных органов рассмотренный способ используется при небольших диапазонах регулирования или кратковременной работе двигателя на пониженных скоростях.

#### 1.4. Расчет регулировочных резисторов в цепи обмотки якоря

В теории ЭП разработано несколько методов расчета регулировочных резисторов в цепи якоря, необходимых для регулирования скорости вращения двигателя. Рассмотрим два метода – метод пропорций и метод отрезков [1].

Допустим, что известна естественная электромеханическая или механическая характеристика  $I$  двигателя (рис.1.5) и его паспортные данные. Требуется рассчитать сопротивление резистора  $R_d$ , при включении которого в цепь якоря

желаемая искусственная характеристика 2 пройдет через точку  $A$  с заданными координатами  $(\Omega_{и}, I_{и})$  или  $(\Omega_{и}, M_{и})$ . Отметим, что эта реостатная характеристика может быть задана как по условиям регулирования скорости, так и для ограничения тока и момента двигателя в переходных процессах.

*Метод пропорций* основан на использовании формулы (1.8) для определения перепада скорости. Запишем отношение перепадов скорости при токе  $I_{и}$  и (или) моменте  $M_{и}$  на естественной  $\Delta\Omega_e$  и желаемой искусственной  $\Delta\Omega_{и}$  характеристиках:

$$\Delta\Omega_e/\Delta\Omega_{и} = I_{и}R_{я}/[I_{и}(R_{я} + R_{д})] = R_{я}/(R_{я} + R_{д}). \quad (1.16)$$

Откуда определяем  $R_{д}$  как искомую величину

$$R_{д} = R_{я}(\Delta\Omega_{и}/\Delta\Omega_e - 1). \quad (1.17)$$

Полученная формула позволяет рассчитать сопротивление добавочных резисторов при расположении заданной точки в любом квадранте.

*Метод отрезков* в отличие от метода пропорций не требует использования данных о собственном сопротивлении якоря двигателя  $R_{я}$ , которое не всегда указывается в паспорте, а позволяет определить его по известной естественной характеристике.

Для получения расчетной формулы этого метода запишем согласно (1.4) выражение для скорости ДПТ на заданной искусственной характеристике (см. рис.1.5) при номинальных значениях тока, момента, магнитного потока и напряжения:

$$\Omega_{и} = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} \left( 1 - \frac{I_N R}{U_N} \right), \quad (1.18)$$

или с учетом (1.7)

$$\Omega_{и} = \Omega_0 (1 - R/R_N), \quad (1.19)$$

где  $R_N = U_N/I_N$  – так называемое номинальное сопротивление, являющееся базовой величиной при расчетах, Ом.

Из (1.19) получим соотношение

$$R/R_N = (\Omega_0 - \Omega_{и})/\Omega_0 = \delta, \quad (1.20)$$

которое отражает важное свойство ДПТ НВ: относительный перепад скорости  $\delta = \Delta\Omega/\Omega_0$  равен относительному активному сопротивлению цепи якоря  $R/R_{ном}$ . Отметим, что это свойство характерно и для других типов двигателей (в частности, асинхронных).

Соотношение (1.20) удобно решать с помощью характеристик, приведенных на рис. 1.5, где  $a, b, c, d$  – характерные точки. Отметим также, что  $\Omega_0 - \Omega_{и} = \Delta\Omega = ac$ ,  $\Omega_0 = ad$ .

Тогда

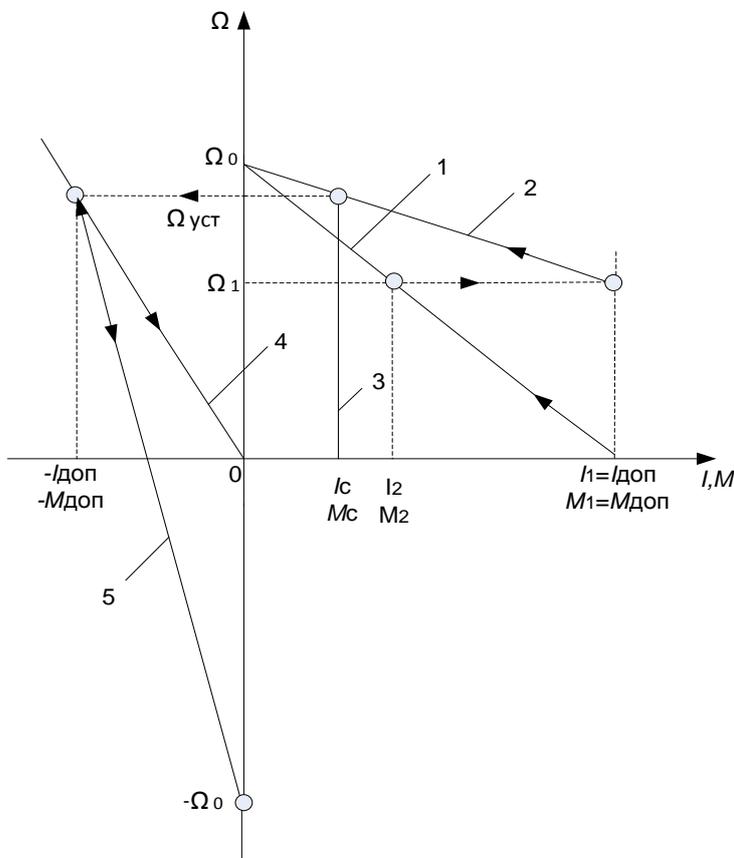
$$R_{я.ц} = R_N \Delta\Omega/\Omega_0 = R_N ac/(ad); \quad (1.21)$$

$$R_{д} = R_N bc/(ad); \quad (1.22)$$



По мере увеличения скорости и соответственно ЭДС двигателя ток в якоре снижается, и при скорости  $\Omega_1$  резистор может быть закорочен (выведен из цепи якоря). Двигатель переходит на работу по естественной характеристике 2, при этом броски тока и момента также не превышают заданного уровня. Завершается пуск двигателя после достижения им скорости  $\Omega_{уст}$ , определяемой точкой пересечения характеристик двигателя 2 и исполнительного органа 3.

Добавочное сопротивление  $R_{д2}$  в цепи обмотки якоря при динамическом торможении, реализуемом по схеме, приведенной на рис. 1.3, находится по заданным значениям  $I_{доп}$  или  $M_{доп}$ , определяемым темпом замедления ЭП или условиями коммутации двигателя (см. рис.1.6, характеристика 4). Расчет  $R_{д2}$  в цепи обмотки якоря при динамическом торможении производится по формуле (1.11), приведенной выше.



**Рис. 1.6.** Скоростные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением для определения скачка тока и моментов в переходных режимах

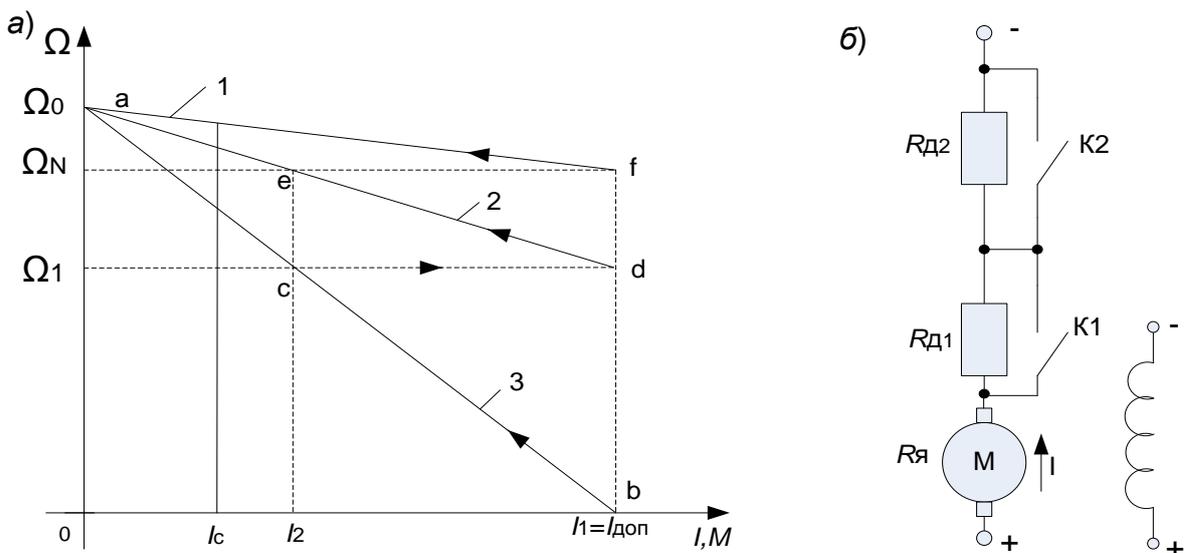
Реверс и торможение противовключением ДПТ НВ, осуществляемые изменением полярности напряжения якоря или обмотки возбуждения, происходят по характеристике 5 (см. рис. 1.6) при включении в цепь якоря резистора  $R_{д3}$ . Расчет  $R_{д3}$  в цепи обмотки якоря при торможении противовключением производится по формуле (1.12), приведенной выше.

Для осуществления динамического торможения двигатель включается по схеме, приведенной на рис. 1.3, и при этом он переходит с работы на характеристике 2 на работу по характеристике 4 (см. рис. 1.4).

Торможение противовключением или реверс двигателя осуществляется изменением полярности напряжения обмотки якоря или обмотки возбуждения (последнее применяется очень редко). При этом двигатель переходит с работы по характеристике 2 на работу по характеристике 5 (см. рис. 1.4).

В качестве ключей для указанных переключений и шунтирования резисторов обычно используются контакторы. Расчет сопротивлений резисторов, которые позволяют получать показанные на рис. 1.6 и рис. 1.7 характеристики, производится по формулам (1.17) и (1.22). Кроме того, могут использоваться формулы, позволяющие непосредственно находить сопротивления по заданным (допустимым) току и моменту при пуске, торможении и реверсе. Исходным в этом случае является максимально допустимый ток обмотки якоря  $I_{доп}$ , который определяется допустимым моментом  $M_{доп}$  или условиями пуска, реверса и торможения двигателя.

*Расчет добавочного резистора при пуске ЭД ПТ в одну ступень*



**Рис. 1.7.** Пусковая диаграмма двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (а) и схема включения пускового резистора при двухступенчатом пуске (б)

Сопротивление добавочного резистора  $R_{д1}$  при пуске в одну ступень (см. рис. 1.1) рассчитывается по (1.1) при  $E = 0$ :

$$R_{д1} = U/I_{доп} - R_я. \quad (1.26)$$

Чаще пуск производится в несколько ступеней.

## 1.6. Расчет резисторов пускового реостата при пуске в несколько ступеней

Число ступеней  $n$  добавочного резистора (или, что то же самое, число используемых искусственных характеристик) связано с пределами изменения тока в якоре  $I_1=I_{\text{доп}}$  и током переключения  $I_2$  (см. рис.1.7) следующим соотношением

$$n = \frac{\lg(I_2 / I_1)}{\lg(I_1 R_{\text{я}} / U)}. \quad (1.27)$$

Совокупность двух или более искусственных характеристик, используемых при пуске двигателя, называется *пусковой диаграммой*.

При расчете пусковой диаграммы необходимо задаться числом ступеней пускового резистора  $n$ , значением пускового тока  $I_1=(1,5-2,0)I_{\text{яN}}$ .

Рассмотрим двухступенчатый пуск (рис.1.7).

Пуск двигателя начинается по характеристике 3. При скорости  $\Omega_1$ , когда ток снизится до значения  $I_2$ , ключом К1 закорачивается ступень  $R_{\text{д1}}$  и двигатель продолжает свой разбег по характеристике 2. При скорости  $\Omega_2$  ключом закорачивается ступень  $R_{\text{д2}}$  и двигатель начинает работать на естественной характеристике 1.

Полное сопротивление цепи обмотки якоря при пуске

$$R_{\text{я.1}}=R_{\text{я}}+R_{\text{д1}}+R_{\text{д2}}=U_{\text{яN}}/I_1. \quad (1.28)$$

Значение тока переключения  $I_2$ :

$$I_2 = I_1 \sqrt[n]{\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{я1}}}} \quad (1.29)$$

При двухступенчатом пуске  $n=2$ :

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{я1}}}}$$

Сумма добавочных сопротивлений для двухступенчатого пуска:

$$R_{\text{д1}}+R_{\text{д2}}= R_{\text{я.1}}- R_{\text{я}}.$$

Полное сопротивление якорной цепи на  $i$ -ой ступени пускового резистора:

$$R_{\text{я}i} = R_{\text{я1}} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{i-1} \quad (1.30)$$

Очевидно, что на первой ступени ( $i=1$ )  $R_{\text{я.1}}= R_{\text{я1}}$ .

На второй ступени ( $i=2$ ):

$$R_{\text{я2}} = R_{\text{я1}} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{2-1} = R_{\text{я1}} \left( \frac{I_2}{I_1} \right).$$

Сопротивление  $i$ -ой ступени пускового реостата:

$$R_{\text{доб } i} = R_{\text{я}i} - R_{\text{я}}.$$

Таким образом, добавочное сопротивление пускового резистора на первой ступени:

$$R_{\text{доб } 1} = R_{\text{я}1} - R_{\text{я}} = R_{\text{д}1} + R_{\text{д}2}.$$

Добавочное сопротивление пускового резистора на второй ступени:

$$R_{\text{доб } 2} = R_{\text{я}2} - R_{\text{я}} = R_{\text{д}2}.$$

Аналогично выполняется расчет пусковых резисторов и для пуска двигателя в 3 ступени.

## 1.7. Расчетные схемы механической части электропривода.

Элементы, образующие механическую часть ЭП, связаны между собой и оказывают тем самым друг на друга соответствующее воздействие. Поэтому, анализируя механическое движение того или иного элемента, необходимо учитывать влияние на него других элементов кинематической схемы ЭП. Это достигается соответствующим пересчетом сил, моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается. Такой расчет в теории ЭП получил название операции приведения, а сами пересчитанные переменные и параметры называют приведенными.

Рассмотрим подробнее операцию приведения и получим соответствующие математические формулы на примере механической части ЭП подъемной лебедки, кинематическая схема которой приведена на рис.1.8, *a* [1]. Электродвигатель *1* вращательного движения с моментом инерции  $J_{\text{дв}}$  через одноступенчатый редуктор *4* с парой шестерен *5* и *6* приводит во вращение с угловой скоростью  $\Omega_6$  барабан *8* подъемной лебедки, который с помощью троса *9* и крюка *10* поднимает (или опускает) с линейной скоростью  $v_{\text{н.о}}$  груз *11* массой  $m$ . На схеме показаны также соединительные механические муфты *3* и *7*, первая из которых служит шкивом для механического тормоза *2*. Примем допущения, что все элементы приведенной кинематической схемы являются абсолютно жесткими и между ними отсутствуют зазоры.

Операцию приведения можно выполнять относительно любого элемента, движение которого подлежит рассмотрению. Обычно в качестве такого элемента выбирают двигатель *1*, являющийся источником механического движения. В этом случае сущность операции приведения состоит в том, что реальная схема механической части ЭП (см. рис. 1.8, *a*) заменяется некоторой расчетной (эквивалентной) схемой, основой которой является двигатель *1* (см. рис.1.8, *б*), а остальные элементы этой схемы представляются некоторыми пока неизвестными приведенными моментом нагрузки (сопротивления)  $M_c$  и моментом инерции  $J$ . Такая расчетная схема получила название одномассовой схемы или жесткого приведенного механического звена. Математические соотношения, позволяющие определить  $M_c$  и  $J$  и тем самым перейти к расчетной схеме, определяются исходя из закона сохранения энергии.

## Приведенного момента инерции нагрузки грузоподъемного механизма к валу двигателя

Запишем выражения для определения кинетической энергии элементов в реальной (см. рис. 1.8, а) и расчетной (см. рис. 1.8, б) схемах и приравняем их друг к другу

$$J \frac{\Omega^2}{2} = J_{\text{дв}} \frac{\Omega^2}{2} + J_1 \frac{\Omega^2}{2} + J_2 \frac{\Omega_6^2}{2} + m \frac{v_{\text{и.о}}^2}{2}, \quad (1.31)$$

где  $J_1$  – суммарный момент инерции элементов, вращающихся со скоростью  $\Omega$  (кроме двигателя),  $J_2$  – момент инерции элементов, вращающихся со скоростью барабана  $\Omega_6$ .

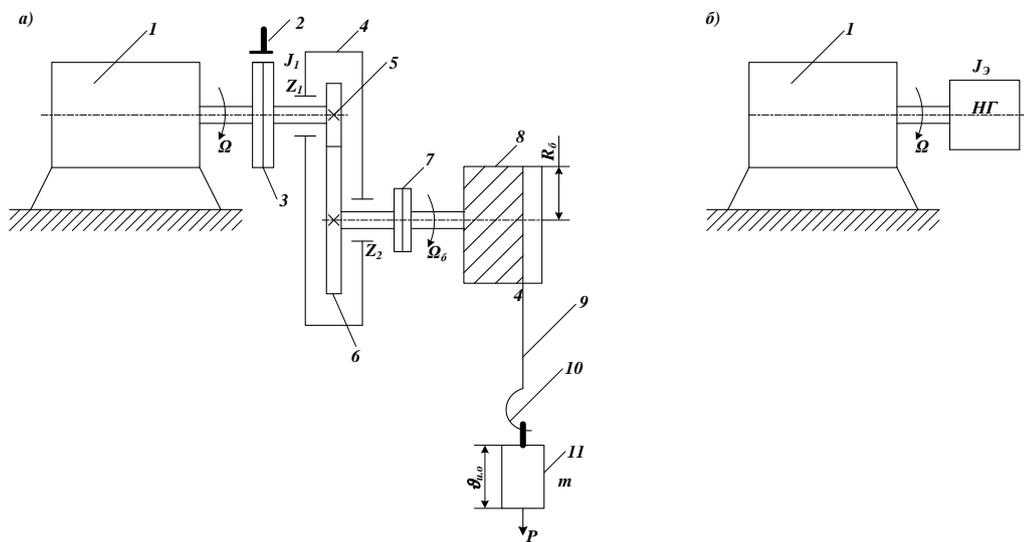


Рис. 1.8. Кинематическая схема электропривода лебедки

Умножая обе части формулы (1.31) на  $2/\Omega^2$ , получим

$$J = J_{\text{дв}} + J_1 + J_2 \frac{\Omega_6^2}{\Omega^2} + m \frac{v_{\text{и.о}}^2}{\Omega^2}, \quad (1.32)$$

Отметим, что в (1.32) отношение  $\Omega/\Omega_6=Z_2/Z_1=i_p$  – соответственно числа зубцов шестерен 6 и 5 является передаточным отношением редуктора, а отношение  $v_{\text{и.о}}/\Omega= \Omega_6 R_6 / \Omega= R_6 / i_p=r$  представляет собой так называемый радиус приведения ( $r$ ) кинематической схемы между исполнительным органом (крюком 10) и валом двигателя. С учетом этого окончательно получим

$$J = J_{\text{дв}} + J_1 + J_2/(i_p)^2 + m\rho^2. \quad (1.33)$$

Из (1.33) вытекает общее правило: для расчета  $J$  следует моменты инерции вращающихся элементов разделить на квадрат передаточного числа кинематической схемы между этими элементами и валом двигателя, а массы поступательно движущихся элементов умножить на квадрат радиуса приведения и полученные результаты расчета сложить с моментами инерции двигателя и элементов, вращающихся с его скоростью.

*Приведение статического момента нагрузки грузоподъемного механизма  $M_c$  к валу двигателя*

При подъеме груза к исполнительному органу от ЭП должна быть подведена механическая мощность

$$P_{\text{и.о}} = F_{\text{и.о}} v_{\text{и.о}} = mgv_{\text{и.о}},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $F_{\text{и.о}}$  – усилие, развиваемое исполнительным органом.

Учитывая с помощью КПД потери мощности в кинематической цепи, запишем баланс мощности нагрузки ЭП в реальной и расчетной схемах:

$$M_c \Omega = mgv_{\text{и.о}}/\eta, \quad (1.34)$$

где  $\eta$  – результирующий КПД кинематической схемы ЭП.

В рассматриваемом примере  $\eta = \eta_p \eta_b$ ,

где  $\eta_p$  и  $\eta_b$  – КПД соответственно редуктора 4 и барабана 8.

Разделив обе части (1.34) на  $\Omega$ , находим

$$M_c = mgv_{\text{и.о}}/(\eta\Omega) = F_{\text{и.о}}\rho/\eta. \quad (1.35)$$

Если исполнительный орган совершает не поступательное, а вращательное движение, то

$$M_c \Omega = M_{\text{и.о}} \Omega_{\text{и.о}}/\eta, \quad (1.36)$$

где  $M_{\text{и.о}}$ ,  $\Omega_{\text{и.о}}$  – соответственно момент нагрузки и скорость исполнительного органа, а приведенный момент нагрузки

$$M_c = M_{\text{и.о}}/(\eta i_p). \quad (1.37)$$

При спуске груза запасенная в нем потенциальная энергия передается к двигателю, частично расходуясь на преодоление потерь в кинематической схеме. В силу этого к двигателю поступает меньшая энергия и тогда при поступательном движении

$$M_c = F_{и.о} r \eta, \quad (1.38)$$

а при вращательном движении

$$M_c = M_{и.о} \eta / i_p. \quad (1.39)$$

Отметим, что приведенный момент нагрузки  $M_c$  также называют статическим моментом или моментом сопротивления.

При использовании в ЭП двигателя поступательного движения, пока еще редко применяемого, приведение осуществляется по тем же принципам.

Выполнение операции приведения и переход тем самым к расчетной схеме рис. 1.8, б позволяет раскрыть левую часть уравнения (1.35). В общем случае входящие в него моменты двигателя  $M$  и сопротивления  $M_c$  могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки:

$$\pm M \pm M_c = J d\Omega / dt. \quad (1.40)$$

Правило, по которому определяются эти знаки, следующее: если направление действия момента совпадает с направлением скорости, то такой момент считается положительным, и наоборот.

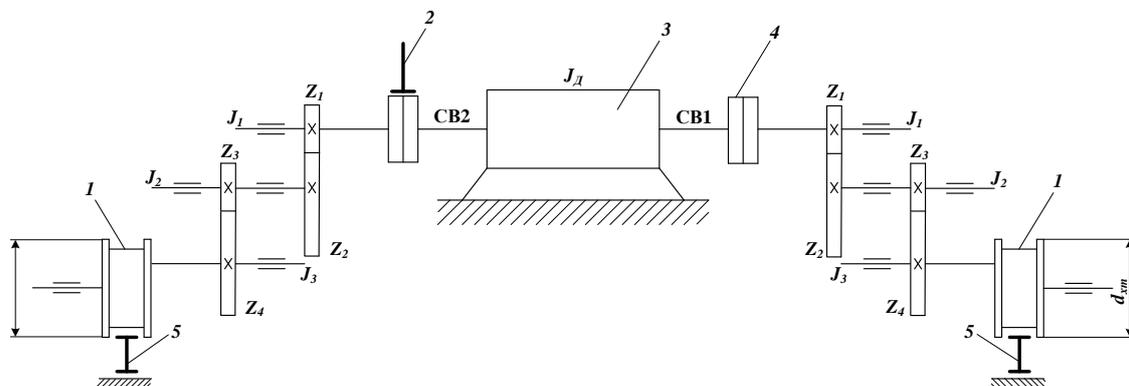
В наиболее типичном для ЭП случае двигатель создает движущий момент, а исполнительный орган – момент сопротивления движению. Тогда (1.40) принимает следующий вид:

$$M - M_c = J d\Omega / dt. \quad (1.41)$$

Левая часть уравнения (1.41), представляющая собой разность моментов двигателя и нагрузки и определяющая условия ускорения или замедления движения, в теории электропривода получила название динамического момента,  $M_{дин} = M - M_c$ .

*Приведение момента инерции и статического момента нагрузки тележки мостового крана к валу двигателя*

Кинематическая схема электропривода тележки мостового крана приведена на рис. 1.9.



**Рис.1.9.** Кинематическая схема электропривода тележки мостового крана: 1 – ходовые колеса; 2 – тормоз; 3 – двигатель; 4 – муфта; 5 – рельс

*Основные расчетные соотношения*

Момент инерции тележки мостового крана, приведенный к валу двигателя:

$$J = J_{\text{дв}} + 2 \left[ J_1 + \frac{J_2}{i_{p1}^2} + \frac{J_2}{i_{p1}^2 i_{p2}^2} \right] + m\rho^2, \quad (1.42)$$

где  $i_{p1}=Z_2/Z_1$ - передаточное отношение первой пары колес редуктора;

$i_{p2}=Z_3/Z_4$ - передаточное отношение второй пары колес редуктора;

$i_p = i_{p1} i_{p2}$  - передаточное отношение редуктора в целом;

$\rho=R_{\text{х.к}}/i_p=v_{\text{и.о}}/\Omega$  - радиус приведения барабана.

Статический момент нагрузки, приведенный к валу двигателя:

$$M_c = mgv_{\text{и.о}}/(\eta_p \Omega) = F_{\text{и.о}}\rho/\eta_p, \quad (1.43)$$

где  $\eta_p = \eta_1 \eta_2$ - КПД редуктора в целом;

$\eta_1$ - КПД первой пары колес редуктора;

$\eta_2$ - КПД второй пары колес редуктора.

## **1.8. Неустановившееся движение электропривода при постоянном динамическом моменте**

Неустановившееся движение ЭП имеет место, когда моменты двигателя и нагрузки отличаются друг от друга, т. е.  $M \neq M_c$ . В этом случае динамический момент  $M_{\text{дин}}$  не равен нулю и происходит увеличение или снижение скорости движения. Наиболее типичными примерами неустановившегося движения в ЭП являются пуск, торможение и реверс двигателя, его переходы с одной скорости на другую в процессе ее регулирования или изменения нагрузки на валу.

Неустановившееся движение возникает при переходе ЭП из установившегося движения с одними параметрами к установившемуся движению с другими параметрами (если, конечно, движение устойчивое). По этой причине неустановившееся движение называют также переходным процессом или переходным режимом ЭП.

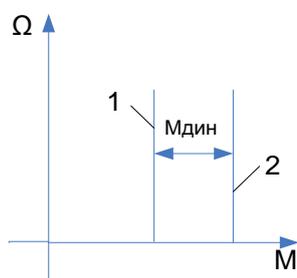
Целью рассмотрения неустановившегося движения является получение зависимостей механических переменных (координат) ЭП – моментов, скорости и угла поворота вала двигателя от времени. Рассмотрим переходные процессы в механической части ЭП, обусловленные инерционностью движущихся элементов. Иногда такие процессы называют механическими [1]. Искомые зависимости получим решением (интегрированием) дифференциального уравнения механического движения, а также

дифференциального уравнения  $\Omega = d\varphi/dt$ , связывающего угол поворота  $\varphi$  вала двигателя и его скорость  $\Omega$ .

Для решения этих уравнений необходимо знать законы изменения моментов двигателя и нагрузки, а также массы и моменты инерции движущихся элементов и начальные (нулевые) значения переменных.

В общем случае моменты двигателя и нагрузки, а иногда и момент инерции могут являться функциями времени, скорости и положения ИО (угла поворота вала двигателя).

Из всего многообразия возможных переходных процессов рассмотрим наиболее часто имеющие место случаи, когда моменты двигателя и нагрузки ЭП являются постоянными величинами, не зависящими от скорости или времени, а моменты инерции и массы движущихся элементов не изменяются в переходных процессах. Другие возможные переходные процессы см. в [1].



**Рис.1.10.** Механические характеристики двигателя (2) и исполнительного органа (1)

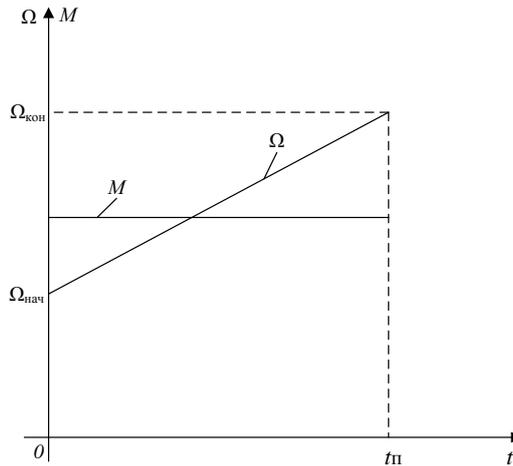
На рис. 1.10 приведены механические характеристики двигателя 2 и нагрузки (исполнительного органа) 1, при которых их моменты неизменны, т.е. динамический момент постоянен и положителен. Уравнение движения (1.37) в этом случае решается методом разделения переменных и ее решение имеет вид

$$\Omega = [(M - M_c) / J]t + C \quad (1.44)$$

Постоянная интегрирования  $C$  находится из начального условия переходного процесса: при  $t = 0$   $\Omega = \Omega_{нач}$ . Подставляя это условие в (1.44), получим  $C = \Omega_{нач}$ . Тогда окончательно (1.44) принимает вид

$$\Omega = [(M - M_c) / J]t + \Omega_{нач} \quad (1.45)$$

Полученная формула показывает, что при разбеге ЭП (см. рис. 1.11) скорость  $\Omega$  линейно зависит от времени. При  $(M - M_c) = M_{дин} > 0$  скорость увеличивается, а при  $(M - M_c) < 0$  – скорость снижается. Момент двигателя от времени не зависит, поэтому зависимость  $M_{дин}(t)$  изображается прямой линией.



**Рис.1.11.** График переходного процесса разбега электрического привода:  $M$  - динамический момент,  $\Omega$  - угловая скорость вращения

Время переходного процесса  $t_{п.п.}$ , за которое скорость изменится от некоторого начального  $\Omega_{нач}$  до конечного  $\Omega_{кон}$  уровня, определяется из (1.45) при подстановке в нее  $t = t_{п.п.}$  и  $\Omega = \Omega_{кон}$ :

$$t_{п.п.} = J(\Omega_{кон} - \Omega_{нач}) / (M - M_c). \quad (1.46)$$

### 1.9. Неустановившееся движение при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа

При линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа динамический момент ЭП также линейно зависит от скорости. Такие переходные процессы характерны для ЭП с двигателями постоянного тока независимого возбуждения, а также двигателями, характеристики которых могут быть частично или полностью представлены (аппроксимированы) прямыми линиями.

На рис.1.12, а показаны линейные механические характеристики двигателя 1 и исполнительного органа 2, построенные по следующим алгебраическим уравнениям:

$$\begin{aligned} M_{дв} &= M_{кз} - \beta\Omega; \\ M_{и.о} &= M_{с0} + \beta_c\Omega, \end{aligned} \quad (1.47)$$

где  $M_{кз}$  и  $M_{с0}$  — моменты двигателя и исполнительного органа при нулевой скорости.

Подставляя эти выражения в уравнение движения (1.41), получим

$$M_{дв} - M_c = M_{кз} - \beta\Omega - M_{с0} - \beta_c\Omega = J(d\Omega/dt). \quad (1.48)$$

В обычной для дифференциальных уравнений форме уравнение (1.48) будет иметь вид

$$T_M(d\Omega/dt) + \Omega = \Omega_{уст}, \quad (1.49)$$

где  $T_M = J/(\beta + \beta_c)$  – электромеханическая постоянная времени ЭП, с;

$\Omega_{уст} = (M_{кз} - M_{с0})/(\beta + \beta_c)$  – установившаяся скорость, соответствующая точке пересечения характеристик двигателя и исполнительного органа.

Выражение (1.49) по своей форме является линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка, решение которого  $\Omega(t)$  имеет вид

$$\Omega(t) = Ae^{-t/T_M} + \Omega_{уст} \quad (1.50)$$

Постоянный коэффициент  $A$  определяется из начальных условий переходного процесса: при  $t = 0$   $\Omega = \Omega_{нач}$ , т. е.  $A = \Omega_{нач} - \Omega_{уст}$ .

Тогда окончательно зависимость изменения скорости от времени будет иметь вид

$$\Omega(t) = (\Omega_{нач} - \Omega_{уст})e^{-t/T_M} + \Omega_{уст}. \quad (1.51)$$

Запишем момент двигателя в функции времени, исходя из (1.47)

$$M_{дв}(t) = M_{кз} - \beta\Omega(t). \quad (1.52)$$

С учетом того, что

$$\beta = \Delta M / \Delta \Omega = (M_{кз} - M_{уст}) / \Omega_{уст} = (M_{кз} - M_{нач}) / \Omega_{нач}$$

после подстановки  $\Omega_{нач}$  и  $\Omega_{уст}$  получим

$$M(t) = (M_{нач} - M_{уст})e^{-t/T_M} + M_{уст}. \quad (1.53)$$

В распространенном для ЭП случае, когда  $\beta_c = 0$  (характеристикой исполнительного органа является вертикальная прямая линия), входящие в (1.51) и (1.52) параметры будут иметь упрощенный вид

$$T_M = J/\beta = J\Omega_0/M_{кз};$$

$$\Omega_{уст} = (M_{кз} - M_c)/\beta.$$

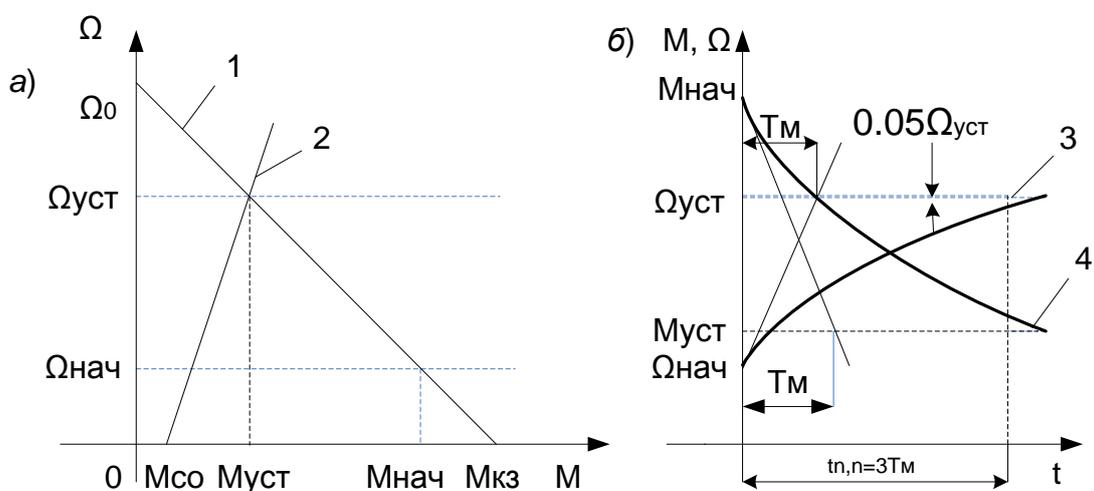
Время переходного процесса  $t_{п.п}$ , за которое скорость двигателя изменится от некоторого начального значения  $\Omega_{нач}$  до конечного  $\Omega_{кон}$ , определяется в этом случае логарифмированием (1.51):

$$\begin{aligned} t_{п.п} &= T_M \ln[(\Omega_{уст} - \Omega_{нач})/(\Omega_{уст} - \Omega_{кон})] = \\ &= T_M \ln[(M_{уст} - M_{нач})/(M_{уст} - M_{кон})]. \end{aligned} \quad (1.54)$$

Анализ полученных выражений (1.51) и (1.53) показывает, что скорость и момент двигателя изменяются во времени по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T_M$ . На рис. 1.12, б показаны графики переходного

процесса разбега:  $\Omega(t)$  – кривая 3 и  $M(t)$  – кривая 4, при увеличении скорости двигателя от  $\Omega_{\text{нач}}$  до  $\Omega_{\text{уст}}$ . Отметим, что начальные и установившиеся уровни скорости и момента определяются из рис. 1.12, а, отражая связь установившегося и переходного движений ЭП.

Как следует из (1.54), время достижения установившихся уровней скорости и момента (т.е. время переходного процесса) является бесконечно большим. Поэтому в технических расчетах используют так называемое **практическое время переходного процесса**, принимаемое обычно равным трем постоянным времени, т.е.  $t_{\text{п.п}} = 3T_M$ . За этот интервал времени скорость достигает 95% своего установившегося значения.



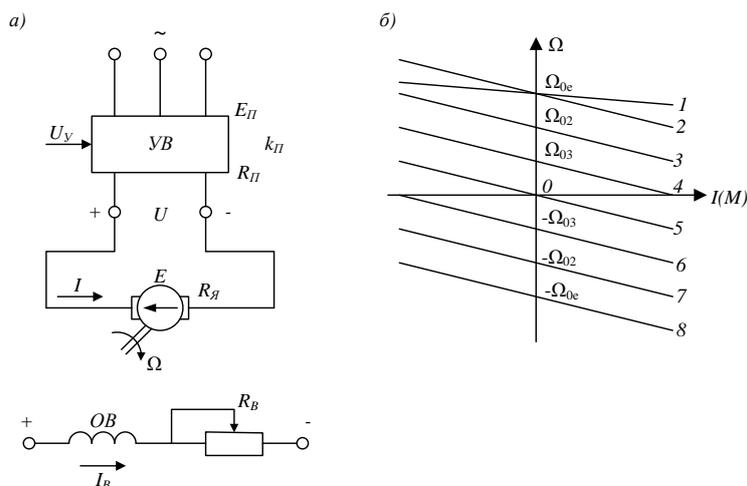
**Рис.1.12.** Линейные механические характеристики двигателя и исполнительного органа (а) и график переходного процесса разбега ЭП (б)

Постоянная времени  $T_M$  имеет определенное графическое и физическое выражение. На рис. 1.12, б она равна отрезку, отсекаемому касательной, проведенной к кривой переходного процесса в точке  $t = 0$  на горизонтальной прямой, соответствующей установившемуся значению переменной (скорости или момента). Количественно  $T_M$  равна времени разгона  $t$  двигателя без нагрузки ( $M_c = 0$ ) из неподвижного состояния ( $\Omega_{\text{нач}} = 0$ ) до скорости идеального холостого хода  $\Omega_0 = \Omega_{\text{уст}}$  под действием пускового момента  $M_{\text{кз}}$ . Действительно, из формулы (1.46) для указанных условий следует, что

$$t_{\text{п.п}} = t_p = J\Omega_0 / M_{\text{кз}} = T_M.$$

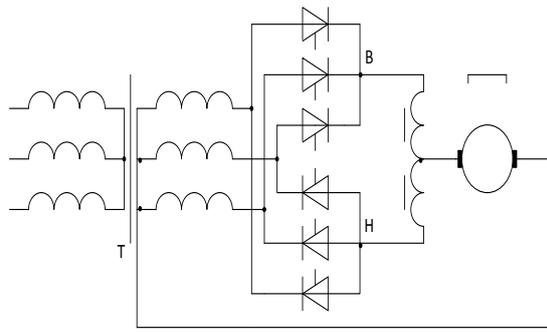
### 1.10. Характеристики электропривода постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем в цепи обмотки якоря

На рис.1.13 приведены схема и электромеханические характеристики ЭП постоянного тока с УВ в цепи обмотки якоря. Электромеханическая характеристика ЭП постоянного тока с УВ - это зависимость скорости вращения электродвигателя от тока якоря  $\Omega=f(I_{\text{я}})$  [1]:

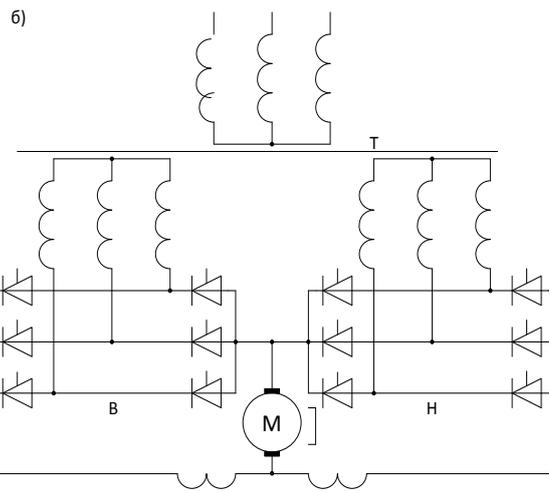
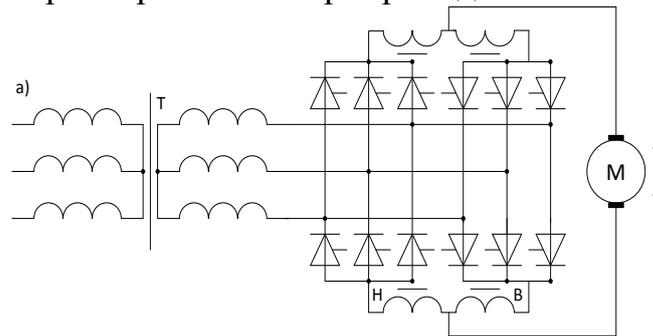


**Рис.1.13.** Схема (а) и механические характеристики (б) ЭП ПТ с управляемым выпрямителем в цепи обмотки якоря

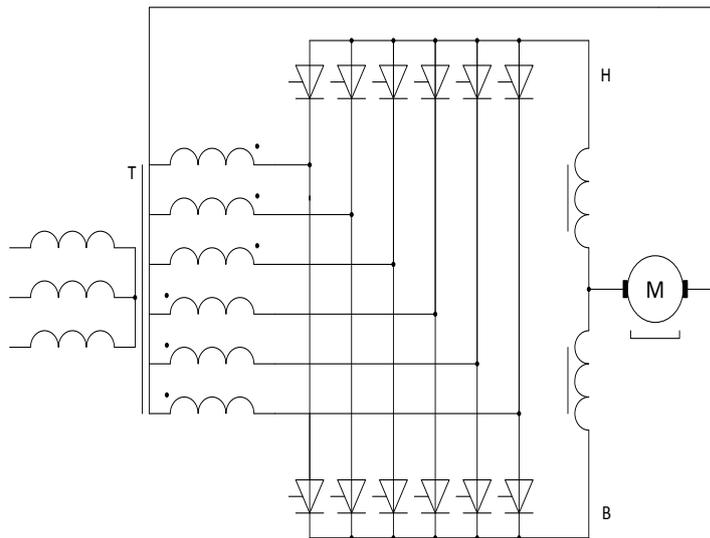
Наиболее распространенные схемы реверсивных тиристорных ЭП постоянного тока, питающихся от трехфазной сети переменного тока, приведены на рис. 1.14, рис.1.15 и рис.1.16 [2]. ЭП, схема которого приведена на рис. 1.14, выполнен по трехфазной однотактной встречно-параллельной схеме. Электроприводы, схемы которых приведены на рис.1.15, а и б, выполнены на основе трехфазных мостовых схем: а- по встречно – параллельной, б - по перекрестной схеме. Электропривод, схема которого приведена на рис.16, выполнен по встречно-параллельной шестифазной схеме.



**Рис.1.14.** Встречно – параллельная трехфазная одноконтная схема реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока



**Рис.1.15.** Встречно – параллельная (а) и перекрестная (б) трехфазные мостовые схемы реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока



**Рис.1.16.** Встречно – параллельная шестифазная схема реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока

**Электромеханическая характеристика ЭП постоянного тока с УВ** - это зависимость скорости вращения электродвигателя от тока якоря  $\Omega=f(I_{я})$  [1]. Для упрощения расчетов выполним расчет электромеханической только при учете падения напряжения на тиристорах преобразователя  $\Delta U_{в.пр}$  и параметров ЭД - активного сопротивления обмотки якоря характеристики  $R_{я}$ . Выберем отдельный способ управления реверсивного тиристорного преобразователя, при котором уравнивающий реактор в цепь постоянного тока преобразователя не включается.

$$\Omega = \frac{U_{d0} \cos \alpha - I_{я} R_{я} - k_{т} \Delta U_{в.пр}}{k_{е}}, \quad (1.55)$$

где

$k_{е}$  – коэффициент ЭДС двигателя постоянного тока.

$$k_{е} = \frac{U_{дN} - I_{дN} R_{я}}{\Omega_{дN}}$$

Напряжение холостого хода управляемого выпрямителя  $U_{d0}$  можно определить в первом приближении с учетом падений напряжения на элементах схемы [1]:

$$U_{d0} = U_{яN} + \Delta U_{RL} + \Delta U_{Rтр} + k_{т} \Delta U_{в.пр}, \quad (1.56)$$

где  $\Delta U_{RL}$  – падение напряжения на активном сопротивлении обмоток дросселей, включенных последовательно с обмоткой якоря;

$\Delta U_{Rтр}$  – падение напряжения на активном сопротивлении обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке;

$\Delta U_{в.пр}$  – падение напряжения на открытом тиристоре;

$k_{т}$  – коэффициент тактности выпрямителя. Для однотактных схем  $k_{т} = 1$ , а для мостовых схем  $k_{т} = 2$ .

Можно задаться следующими примерными значениями падений напряжения:

$$\Delta U_{RL} = (0,01-0,03) U_{яN};$$

$$\Delta U_{Rтр} = (0,02-0,04) U_{яN};$$

$\Delta U_{в.пр}=1,0-2,0$  В.

Семейство электромеханических характеристик нереверсивного ЭП постоянного тока с УВ при различных значениях угла регулирования  $\alpha$  приведено на рис.1.17. Наклон электромеханической характеристики объясняется падением напряжения на  $R_{я}$ . При различных значениях  $\alpha$  наклон электромеханических характеристик остается постоянным. При конечных значениях индуктивности цепи обмотки якоря и малых токах якоря наступает режим прерывистого тока, при котором происходит подъем электромеханических характеристик. Чем больше угол регулирования  $\alpha$ , тем больше зона прерывистых токов. На рис.1.17 эта зона показана пунктиром.

Для каждой из построенных электромеханических характеристик (для каждого заданного значения угла регулирования  $\alpha$ ) необходимо рассчитать значение граничного тока цепи обмотки якоря, при котором начинается режим прерывистого тока,  $I_{дгр}$ , только при учете индуктивности обмотки якоря  $L_{я}$

$$I_{дгр} = \frac{1}{\omega_1 L_{я}} E_{d0} \sin \alpha \left( 1 - \frac{\pi}{k_T m_2} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{k_T m_2} \right), \quad (1.57)$$

где  $\omega_1=2\pi f_c$  – круговая частота сети, питающей вентильный преобразователь;

$L_{я}$  – индуктивность цепи обмотки якоря;

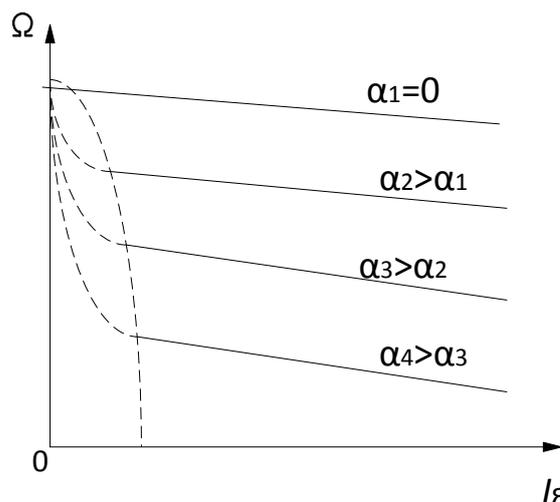
$L_{я} = L_{я} + L_{с.д}$ ;

$L_{с.д}$  – индуктивности сглаживающего дросселя, включенного в цепь обмотки якоря для подавления пульсаций тока якоря;

$f_c$  – частота сети, питающей выпрямитель.

Для трехфазного мостового и для шестифазного одноктного выпрямителя, для которых  $k_T m_2=6$ .

Наибольшее значение граничный ток принимает при угле управления  $\alpha=90^\circ$ .



**Рис.1.17.** Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока при питании обмотки якоря от нереверсивного управляемого выпрямителя

Индуктивность обмотки якоря,  $L_{я}$ , обычно приведена в справочных данных на электрический двигатель. В том случае, когда эта информация

отсутствует индуктивность цепи обмотки якоря можно определить по приближенной формуле:

$$L_{я} = k_L U_{яN} / (p_{п} I_{яN} \Omega_N) \text{ Гн}, \quad (1.58)$$

где  $k_L = 0,4$ ;

$U_{яN}, I_{яN}$  – номинальные значения напряжения и тока якоря, соответственно;

$p_{п}$  – число пар полюсов двигателя;

$\Omega_N$  – номинальное значение угловой скорости вращения двигателя.

### **1.11. Характеристики электропривода постоянного тока с реверсивным широтно-импульсным преобразователем в цепи обмотки якоря**

На рис. 1.18 приведены схема реверсивного ШИП (*а*) и временные диаграммы, поясняющие симметричный (*б*) и несимметричный способы управления (*в*) [2]. При симметричном способе управления и непрерывном токе якоря выражение электромеханической характеристики электропривода имеет вид:

$$\Omega = \Omega_0 (2D - 1) - I_{я} \frac{R_{я}}{k_e}. \quad (1.59)$$

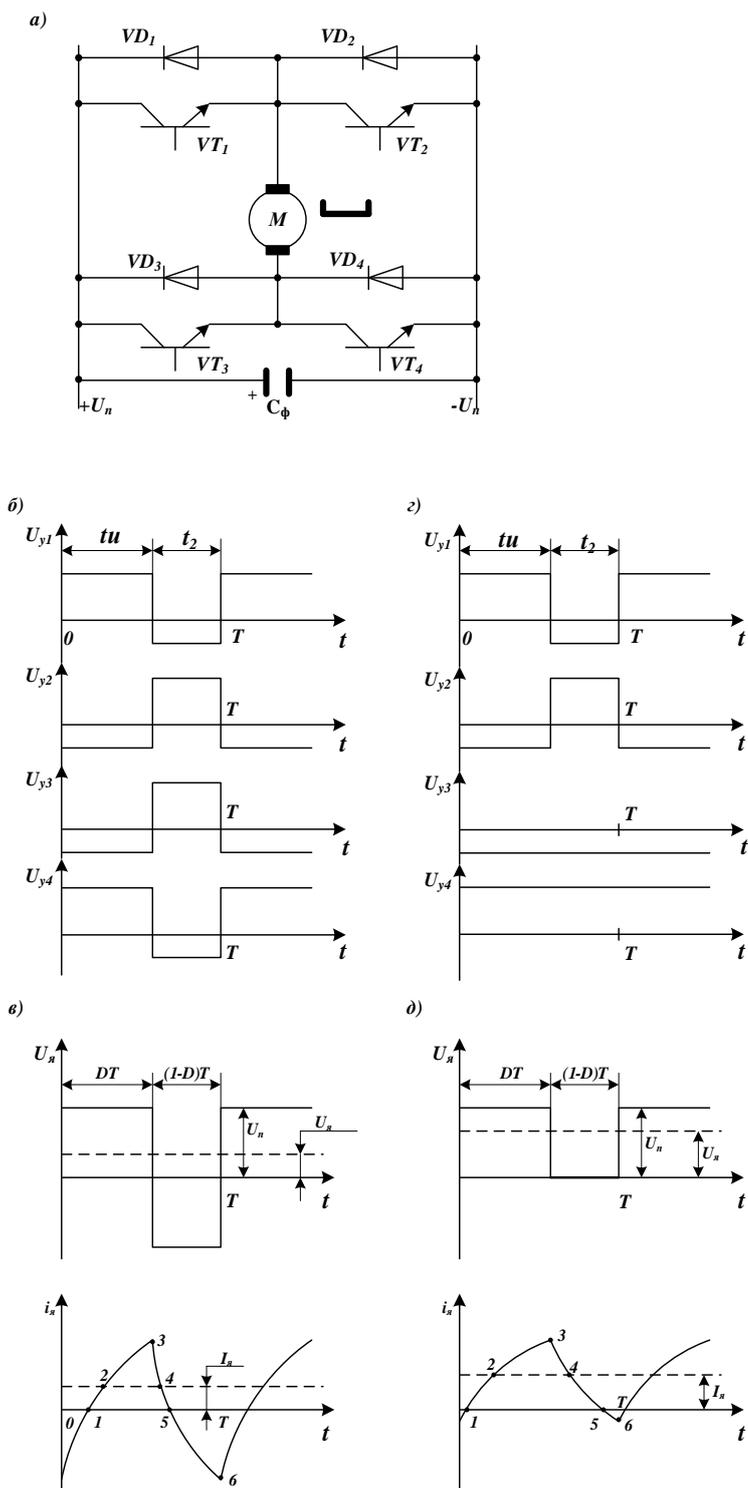
где  $\Omega_0 = U_{п} / k_e$  – угловая скорость вращения двигателя в режиме холостого хода;

$U_{п}$  – напряжение источника питания ШИП;

$R_{я}$  – активное сопротивление обмотки якоря;

$k_e = C_e \Phi$  – коэффициент ЭДС двигателя;

$C_e$  – конструктивный коэффициент двигателя;



**Рис.1.18.** Схема ШИП (а) и временные диаграммы, поясняющие симметричный (б) и несимметричный способы управления (в)

$D=t_w/T$ - коэффициент заполнения импульса;

$t_w$  - длительности импульса;

$T$  - период следования импульсов.

Выражение электромеханической характеристики электропривода при несимметричном способе управления и непрерывном токе якоря:

$$\Omega = \Omega_0 D - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{я}}}{k_{\text{е}}} \quad (1.60)$$

В зоне прерывистого тока цепи обмотки якоря электромеханические характеристики теряют линейность и жесткость.

Прерывистость тока якоря появляется при токах  $I_{\text{я}} < I_{\text{гр}}$ .

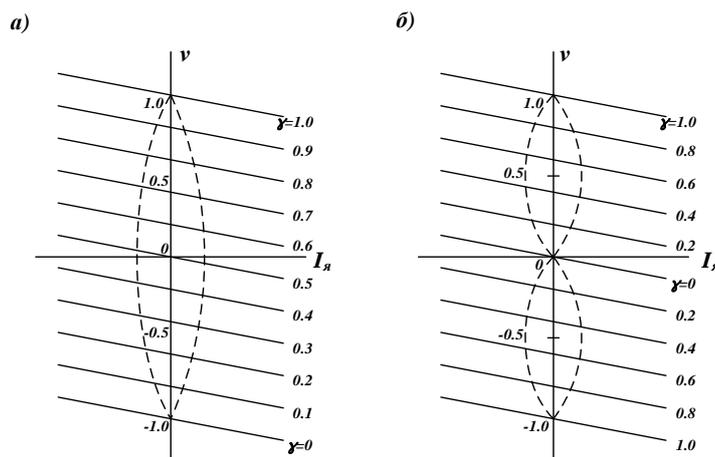
Граничная величина среднего значения тока якоря, при котором наступает режим прерывистого тока при несимметричном способе управления:

$$I_{\text{гр}} = \frac{U_{\text{п}}(1-D)D}{2L_{\text{я}}f_{\text{п}}} \quad (1.61)$$

Граничная величина среднего значения тока якоря, при котором наступает режим прерывистого тока при симметричном способе управления:

$$I_{\text{гр}} = \frac{U_{\text{п}}(1-D)D}{L_{\text{я}}f_{\text{п}}} \quad (1.62)$$

Вид электромеханических характеристик при симметричном и несимметричном способах управления приведен на рис.1.18, а и б, соответственно. Зона прерывистого тока якоря обозначена штриховыми линиями.



**Рис.1.19.** Электромеханические характеристики электропривода с широтно-импульсным преобразователем при симметричном способе управления (а) и несимметричном способе управления (б)

Эквивалентная индуктивность цепи обмотки якоря  $L_{\text{я}}$  включает две индуктивности – собственно индуктивность обмотки якоря  $L_{\text{я}}$  и индуктивность сглаживающего дросселя  $L_{\text{с.д}}$ :

$$L_{\text{я}} = L_{\text{я}} + L_{\text{с.д}}$$

**1.12. Тема практического занятия №1. Расчет времени переходного процесса  $t_{\text{п.п}}$  при увеличении скорости вращения двигателя постоянного тока от  $\Omega_{\text{нач}}$  до  $\Omega_{\text{кон}}$  при заданных параметрах двигателя постоянного тока**

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 2, определите время переходного процесса  $t_{п.п.}$ , за которое скорость ЭП изменится от  $\Omega_{нач}$  до  $\Omega_{кон}$  при заданных значениях:

- момента, развиваемого электродвигателем  $M_d$ ;
- момента сопротивления нагрузки  $M_c$ ;
- момента инерции нагрузки  $J_3$ .

Нарисуйте график механического переходного процесса.

Таблица 2. Варианты задач практического занятия №1 и исходные данные

№ вар	$\Omega_{нач}$	$\Omega_{кон}$	$M_d$	$M_c$	$J_3$
	рад/с	рад/с	Нм	Нм	кгм <sup>2</sup>
1	50	100	150	100	2,0
2	0	50	150	100	2,0
3	0	100	150	100	1
4	0	80	100	20	1
5	20	120	200	100	2
6	20	120	200	0	10
7	50	150	150	50	4
8	20	220	100	50	1
9	0	200	150	50	3
10	30	180	250	200	1
11	10	210	170	70	2,5
12	15	115	250	100	1,5
13	25	175	120	20	4,0
14	35	85	50	10	2,4
15	40	100	110	50	8,0
16	50	70	20	10	1,5
17	60	80	30	10	5
18	70	90	40	20	2,5
19	80	100	50	40	2
20	90	110	60	40	1
21	100	130	75	60	2
22	110	130	85	65	3
23	120	150	90	75	2
24	110	150	100	60	6
25	100	160	110	90	2
26	90	160	130	60	1
27	80	170	150	105	2
28	70	170	170	120	2,5
29	60	180	180	120	2
30	50	180	190	60	1
31	40	170	200	70	2
32	30	170	210	140	2

**1.13. Тема практического занятия №2. Расчет времени переходного процесса  $t_{п.п}$  при снижении скорости вращения в  $N$  раз при заданных параметрах двигателя постоянного тока**

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 3, определите время переходного процесса  $t_{п.п.}$ , за которое скорость ЭП снизится в  $N$  раз при заданных значениях:

- начального значения скорости  $\Omega_{нач}$ , рад/с.;
- момента, развиваемого электродвигателем  $M_d$ , Нм;
- момента сопротивления нагрузки  $M_c$ , Нм;
- момента инерции электропривода  $J_э$ ;

$N = \Omega_{нач} / \Omega_{кон}$  – диапазон снижения скорости вращения ЭП.

Нарисуйте график механического переходного процесса.

Таблица 3. Варианты задач практического занятия №2 и исходные данные

№ вар	$N = \Omega_{нач} / \Omega_{кон}$	$\Omega_{нач}$	$M_d$	$M_c$	$J_э$
		рад/с	Нм	Нм	кгм <sup>2</sup>
1	2	300	100	150	2,0
2	3	300	100	200	2,0
3	4	400	100	250	1
4	6	300	150	250	2
5	5	250	50	100	2
6	5	350	100	200	5
7	4	400	100	150	4
8	4	200	100	200	3
9	3	300	150	250	3
10	3	400	250	350	3
11	4	300	50	150	4
12	4	100	70	170	4
13	3	150	100	200	3
14	3	250	100	300	6
15	3	350	150	250	6
16	3	400	200	300	3
17	3	400	50	250	3
18	3,5	350	50	250	4
19	4	400	100	300	2
20	4	500	50	300	4
21	5	450	50	200	5
22	5	450	50	100	5
23	5	350	50	225	5
24	5	300	100	150	3
25	5	200	100	200	3
26	6	600	150	250	3
27	6	600	100	300	3
28	6	600	100	350	3
29	6	600	50	150	5

30	6	600	50	250	5
31	6	600	150	450	6
32	6	600	150	500	7

*Основное расчетное соотношение:*

Время переходного процесса при снижении скорости вращения от  $\Omega_{\text{нач}}$  до  $\Omega_{\text{кон}}$

$$t_{\text{п.п}} = \frac{J_{\text{э}} \Omega_{\text{нач}} (1 - N)}{(M_{\text{д}} - M_{\text{с}}) N}.$$

**1.14. Тема практического занятия №3. Расчет параметров электропривода постоянного тока при заданных параметрах двигателя постоянного тока**

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 4, определите:

- номинальный момент двигателя постоянного тока  $M_N$ , Нм;
- ток якоря при прямом пуске двигателя постоянного тока в ход  $I_{я.п.}$ , А;
- коэффициент момента двигателя постоянного тока  $k_M$ , Нм/А;
- момент двигателя при прямом пуске  $M_{п.}$ , Нм;
- значение сопротивления  $R_{я.п.}$ , включение которого в цепь обмотки якоря, обеспечит величину пускового тока равную двойному значению номинального тока якоря;
- электромеханическую постоянную времени ЭП постоянного тока  $T_M$ , с;
- электромагнитную постоянную времени ЭП постоянного тока  $T_\omega$ , с;
- время переходного процесса прямого пуска ЭП постоянного тока  $t_{п.п.}$ , с.

Таблица 4. Варианты задач практического занятия №3

№ вар	Исходные данные						
	$P_{дв N}$ Вт	$U_{я}$ В	$I_{я}$ А	$R_{я}$ Ом	$\Omega$ рад/с	$J_p$ кгм <sup>2</sup>	$L_{я}$ Гн
1	100	110	2	5,5	100	0,001	0,055
2	150	60	4	1,5	150	0,002	0,03
3	200	110	2,5	5	200	0,003	0,05
4	250	110	3	5	100	0,004	0,1
5	300	220	2	10	150	0,005	0,2
6	110	110	1,5	5	220	0,006	0,1
7	140	60	3	3	280	0,007	0,03
8	180	80	3	4	180	0,008	0,04
9	220	110	3	5	220	0,009	0,05
10	240	220	1,5	10	240	0,001	0,1
11	250	60	5	1,5	250	0,002	0,015
12	270	80	4	2	270	0,003	0,02
13	280	100	3,5	5	280	0,004	0,05
14	300	110	3,5	5	300	0,005	0,08
15	320	140	3,0	7	320	0,006	0,07
16	370	160	2,5	5	185	0,007	0,05
17	380	180	2,5	6	190	0,008	0,06
18	400	200	2,5	10	200	0,009	0,1
19	420	220	2,5	11	210	0,01	0,11
20	440	60	9,0	1	220	0,02	0,01
21	460	80	8,0	2	115	0,03	0,02
22	480	100	5,5	2	120	0,04	0,02
23	500	110	5,0	2	100	0,05	0,02
24	520	120	5,0	3	130	0,06	0,06
25	540	150	4,0	3	180	0,07	0,06
26	560	160	4,0	4	140	0,08	0,08
27	580	180	4,0	6	145	0,09	0,06

28	600	200	4,0	5	150	0,01	0,1
29	620	220	4,0	5	155	0,02	0,1
30	640	200	4,0	5	160	0,03	0,05
31	660	180	5,0	3	110	0,04	0,06
32	680	160	8,0	4	170	0,05	0,8

*Основные расчетные соотношения:*

$$M_N = P_N / \Omega_N; \quad I_{я.п} = U_{яN} / R_{я}; \quad k_M = M_N / I_{яN} = k_e; \quad M_{п} = k_M I_{я.п};$$

$$R_{я.п} = U_{яN} / (2 I_{яN}) - R_{я}; \quad T_M = J R_{я.ц} / k_M^2; \quad T_{\omega} = L_{я} / R_{я.ц}; \quad t_{п.п} = 3 T_M \cdot R_{я.ц} = R_{я} + R_{я.п}.$$

**1.15. Тема практического занятия №4. Расчет и построение кривых переходного процесса  $\Omega(t)$  и  $M(t)$  при линейной механической характеристике двигателя**

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 5, выполнить расчет и построение кривых переходного процесса  $\Omega(t)$  и  $M(t)$  при линейной механической характеристике двигателя и следующих исходных данных:  $\Omega_{нач} = \text{рад/с}$ ;  $\Omega_{уст} = \text{рад/с}$ ;  $M_{нач} = M_{к.з} = \text{Нм}$ ;  $\Omega_0 = \text{рад/с}$ ;  $M_{уст} = M_c = \text{Нм}$ ;  $J = 0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Оценить практическое время переходного процесса,  $t_{п.п.}$ .

Таблица 5. Варианты задач практического занятия №4 и исходные данные

№ вар	$\Omega_{нач}$	$\Omega_{уст}$	$\Omega_0$	$M_{нач}=M_{кз}$	$M_{уст} = M_c$	$J_э$
	рад/с	рад/с	рад/с	Нм	Нм	кгм <sup>2</sup>
1	0	150	200	150	40	0,1
2	0	155	200	150	35	0,2
3	0	160	220	150	30	0,3
4	0	165	220	150	25	0,4
5	0	170	220	150	25	0,5
6	50	175	220	140	20	0,6
7	50	180	220	140	25	0,5
8	50	175	220	140	25	0,4
9	50	170	220	140	30	0,3
10	50	165	220	140	35	0,2
11	40	160	210	130	40	0,1
12	40	155	210	130	35	0,2
13	40	150	200	130	30	0,3
14	40	145	200	130	25	0,4
15	40	140	190	140	20	0,5
16	30	130	180	140	20	0,6
17	30	140	190	140	25	0,5
18	30	145	190	140	25	0,4
19	30	150	200	140	30	0,3
20	30	155	200	150	30	0,2
21	50	160	210	150	35	0,1
22	50	165	210	150	40	0,2
23	50	170	220	150	35	0,3
24	50	180	220	150	35	0,4
25	50	175	220	140	30	0,5
26	60	170	220	140	30	0,4
27	60	165	220	140	35	0,3
28	60	160	210	140	35	0,2
29	60	155	200	140	40	0,1
30	60	150	200	130	40	0,2
31	20	145	190	130	45	0,3
32	20	140	190	130	45	0,4

### Основные расчетные соотношения

$$\Omega(t) = (\Omega_{\text{нач}} - \Omega_{\text{уст}})e^{-t/T_M} + \Omega_{\text{уст}}.$$

$$M(t) = (M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}})e^{-t/T_M} + M_{\text{уст}}.$$

$$T_M = J/\beta = J\Omega_0/M_{\text{кз}};$$

$$t_{\text{п.п}} = T_M \ln[(\Omega_{\text{уст}} - \Omega_{\text{нач}})/(\Omega_{\text{уст}} - \Omega_{\text{кон}})] = T_M \ln[(M_{\text{уст}} - M_{\text{нач}})/(M_{\text{уст}} - M_{\text{кон}})].$$

**1.16. Тема практического занятия №5. Расчет естественной и искусственных механических характеристик ЭП постоянного тока при реостатном способе регулирования скорости вращения**

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 6, необходимо рассчитать и построить:

- естественную механическую характеристику;
- искусственную механическую характеристику с заданным перепадом скорости  $\Delta\Omega_{и1}^*$ ;
- искусственную механическую характеристику с заданным перепадом скорости  $\Delta\Omega_{и2}^*$ ;

При расчете каждой искусственной механической характеристики необходимо рассчитать значение добавочного сопротивления цепи обмотки ротора  $R_{доб.}$ , обеспечивающего заданный перепад скорости  $\Delta\Omega_{и}^* = \Delta\Omega_{и}/\Omega_N$  при номинальном моменте нагрузки  $M_N$ .

Параметры двигателя постоянного тока приведены в Приложении.

Таблица 6. Варианты задач практического занятия №5 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0	ДСП Я-04
$\Delta\Omega_{и1}^*$	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4
$\Delta\Omega_{и2}^*$	0,6	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7

Продолжение таблицы 6

№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип ЭД	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3	МИ-21-4	МИ-22-1
$\Delta\Omega_{и1}^*$	0,4	0,3	0,3	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,5
$\Delta\Omega_{и2}^*$	0,7	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8

Продолжение таблицы 6

№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5
$\Delta\Omega_{и1}^*$	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,3	0,3
$\Delta\Omega_{и2}^*$	0,7	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8

Продолжение таблицы 6

№ вар	31	32	13
Тип ЭД	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
$\Delta\Omega_{и1}^*$	0,3	0,4	0,5
$\Delta\Omega_{и2}^*$	0,5	0,6	0,7

Основные расчетные соотношения:

Естественная механическая характеристика:

$$\Omega = U_{я}/(C_e\Phi) - R_{я}M/(C_e\Phi \cdot C_M\Phi) = \Omega_0 + \Delta\Omega_e.$$

Искусственная механическая характеристика:

$$\Omega = U_{я}/(C_e\Phi) - (R_{я} + R_{доб})M / (C_e\Phi \cdot C_M\Phi) = \Omega_0 + \Delta\Omega_{и}.$$

$$\Omega_N = U/(C_e\Phi) - R_{я}M_N / (C_e\Phi \cdot C_M\Phi) = \Omega_0 + \Delta\Omega_N.$$

$$\Delta\Omega_{и} = \Omega_N \cdot \Delta\Omega_{и}^* = (R_{я} + R_{доб})M / (C_e\Phi \cdot C_M\Phi).$$

Откуда

$$R_{доб} = \Omega_N \cdot \Delta\Omega_{и}^* (C_e\Phi \cdot C_M\Phi) / M - R_{я}.$$

Или

$$R_{доб} = R_{я}(\Delta\Omega_{и} / \Delta\Omega_e - 1).$$

### 1.17. Тема практического занятия №6. Расчет добавочный сопротивлений цепи обмотки якоря при динамическом, рекуперативном торможении и торможении противовключением

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 7, необходимо рассчитать добавочные сопротивления цепи обмотки якоря, обеспечивающие заданное значение тока якоря  $I_{\text{доп.т}}^* = I_{\text{доп.т}}/I_{\text{яN}}$  при динамическом, рекуперативном торможении и торможении противовключением и построить электромеханические характеристики для этих видов торможения.

Параметры двигателя постоянного тока приведены в Приложении.

Таблица 7. Варианты задач практического занятия №6 и исходные данные

№вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0	ДСП Я-04
$I_{\text{доп.т}}^*$ , о.е.	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5

Продолжение таблицы 7

№вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип ЭД	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3	МИ-21-4	МИ-22-1
$I_{\text{доп.т}}^*$ , о.е.	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5

Продолжение таблицы 7

№вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5
$I_{\text{доп.т}}^*$ , о.е.	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5

Продолжение таблицы 7

№ вар	31	32	33
Тип ЭД	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
$I_{\text{доп.т}}^*$ , о.е.	1,5	2,0	2,5

Основные расчетные соотношения:

$$I_{\text{доп.т}} = I_{\text{доп.т}}^* \cdot I_{\text{яN}}$$

Динамическое торможение:

$$R_{д2} = E/I_{доп.т} - R_{я} \approx U/I_{доп.т} - R_{я}.$$

Электромеханическая характеристика при  $0 < \Omega < \Omega_N$ :

$$I_{я} = -\frac{E_{я}}{R_{я} + R_{д2}} = -\frac{C_e \Phi}{R_{я} + R_{д2}} \Omega;$$

Торможение противовключением:

$$R_{д3} = (U+E)/I_{доп.т} - R_{я} \approx 2U/I_{доп.т} - R_{я},$$

Электромеханическая характеристика при  $0 < \Omega < \Omega_N$ :

$$I_{я} = -\frac{U_{я} + E_{я}}{R_{я} + R_{д3}} = -\frac{U_{я} + C_e \Phi \Omega}{R_{я} + R_{д3}};$$

Рекуперативное торможение при  $\Omega_0 < \Omega < \Omega_{пред}$ , где  $\Omega_{пред} = 1,25 \Omega_N$ .

$$U < E_{я}.$$

Электромеханическая характеристика

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я.ц}} = \frac{U - C_e \Phi \Omega}{R_{я.ц}}.$$

$$-I_{яN} < I_{я} < 0.$$

**1.18. Тема практического занятия №7. Приведение момента инерции и статического момента сопротивления грузоподъемного механизма к валу электродвигателя**

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 8, и заданной кинематической схемы механической части ЭП грузоподъемного механизма, приведенной на рис.1.8, необходимо определить момент инерции  $J$  и момент сопротивления нагрузки  $M_c$ , приведенный к валу электродвигателя, при следующих исходных данных:

- скорость перемещения груза  $v_{\text{но}} = \quad$  м/с;
  - радиус барабана лебедки  $R_6 = \quad$  м;
  - масса груза  $m_{\text{гр}} = \quad$  кг;
  - момент инерции ротора двигателя и  $J_{\text{дв}} = \quad$  кг•м<sup>2</sup>;
  - момент инерции вала с шестерней 5, вращающегося со скоростью  $\Omega$   $J_1 = \quad$  кг•м<sup>2</sup>;
  - момент инерции вала с шестерней 6 и барабана, вращающихся со скоростью барабана  $\Omega_6$ ,  $J_2 = \quad$  кг•м<sup>2</sup>.
- Число зубцов шестерен колеса 5  $Z_1 = \quad$  и колеса 6  $Z_2 = \quad$  ;
- КПД редуктора принять равным  $\eta_p = 0,97$ , а КПД барабана принять равным  $\eta_6 = 0,96$ .

Таблица 8. Варианты задач практического занятия №7 и исходные данные

№ вар	$v_{\text{но}}$	$m_{\text{гр}}$	$J_{\text{дв}}$	$J_1$	$J_2$	$Z_1$	$Z_2$	$R_6$
	м/с	кг	кгм <sup>2</sup>	кгм <sup>2</sup>	кгм <sup>2</sup>			м
1	0,8	850	0,10	0,015	0,010	20	80	0,20
2	0,2	800	0,11	0,016	0,011	22	88	0,25
3	0,3	750	0,12	0,017	0,012	21	63	0,30
4	0,4	700	0,13	0,018	0,013	22	66	0,35
5	0,5	650	0,14	0,019	0,014	23	92	0,30
6	0,6	600	0,15	0,020	0,015	24	96	0,25
7	0,7	550	0,16	0,019	0,014	23	92	0,20
8	0,8	500	0,17	0,018	0,013	22	88	0,25
9	0,9	450	0,18	0,017	0,012	21	84	0,30
10	1,0	400	0,19	0,016	0,011	20	80	0,35
11	0,9	450	0,20	0,015	0,010	20	60	0,30
12	0,8	500	0,19	0,014	0,011	19	57	0,25
13	0,7	550	0,18	0,013	0,012	18	54	0,20
14	0,6	600	0,17	0,014	0,013	19	76	0,25
15	0,5	650	0,16	0,015	0,014	20	100	0,30
16	0,4	700	0,15	0,016	0,015	24	96	0,35
17	0,3	750	0,14	0,017	0,014	23	92	0,30
18	0,2	800	0,13	0,018	0,013	22	88	0,25
19	0,3	850	0,12	0,019	0,012	21	84	0,20
20	0,4	900	0,11	0,020	0,011	20	80	0,25
21	0,5	850	0,10	0,019	0,010	20	79	0,30
22	0,6	800	0,11	0,018	0,011	19	76	0,35
23	0,7	750	0,12	0,017	0,015	18	72	0,30

24	0,8	700	0,13	0,016	0,012	19	76	0,25
25	0,9	650	0,14	0,015	0,013	24	96	0,20
26	1,0	600	0,15	0,014	0,014	23	92	0,25
27	0,9	550	0,16	0,013	0,015	22	88	0,30
28	0,8	500	0,17	0,014	0,014	21	84	0,35
29	0,7	450	0,18	0,015	0,013	20	80	0,30
30	0,6	400	0,19	0,016	0,012	20	100	0,25
31	0,5	800	0,20	0,017	0,011	19	76	0,20
32	0,4	750	0,21	0,018	0,010	18	72	0,25

*Основные расчетные соотношения:*

Момент инерции, приведенный к валу двигателя

$$J = J_{\text{дв}} + J_1 + J_2/(i_p)^2 + m\rho^2,$$

где  $i_p = \Omega/\Omega_6 = Z_2/Z_1$  – передаточное отношение редуктора,

$\rho = v_{\text{и.о}}/\Omega = \Omega_6 R_6/\Omega = R_6/i_p$  – радиус приведения кинематической схемы между исполнительным органом (крюком *10*) и валом двигателя.

Момент сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя

$$M_c = mgv_{\text{и.о}}/(\eta\Omega) = F_{\text{и.о}}\rho/\eta,$$

где  $\eta = \eta_p\eta_6$  – результирующий КПД кинематической схемы ЭП;

$F_{\text{и.о}} = mg$  – усилие, развиваемое исполнительным органом.

$g$  – ускорение свободного падения.

### **1.19. Тема практического занятия №8. Приведение момента инерции и статического момента сопротивления тележки мостового крана к валу электродвигателя**

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 9, и кинематической схемы механической части ЭП тележки мостового крана, изображенной на рис.1.9, необходимо определить момент инерции  $J$  и статический момент нагрузки  $M_c$ , приведенные к валу двигателя, при следующих исходных данных:

- скорость перемещения тележки  $v_{ио} =$  м/с;
- диаметр ходовых колес ХК  $d_{х.к} =$  м;
- общая масса тележки с грузом  $m_T =$  кг;
- сила сопротивления движению тележки  $F_{и.о} =$  Н;
- моменты инерции ротора двигателя и валов с шестернями колес:  
 $J_{дв} =$  кг•м<sup>2</sup>;  $J_1 =$  кг•м<sup>2</sup>;  $J_2 =$  кг•м<sup>2</sup>;  $J_3 =$  кг•м<sup>2</sup>.

Число зубцов шестерен колес:

$$Z_1 = ; Z_2 = ;$$

$$Z_3 = ; Z_4 = ;$$

- КПД одной шестеренчатой пары принять равным  $\eta_p = 0,97$ .

Таблица 9. Варианты задач практического занятия №8 и исходные данные

№ вар	Исходные данные											
	$v_{ио}$ м/с	$d_{х.к}$ м	$m_T$ кг	$F_{и.о}$ Н*10 <sup>4</sup>	$J_{дв}$ кгм <sup>2</sup>	$J_1$ кгм <sup>2</sup>	$J_2$ кгм <sup>2</sup>	$J_3$ кгм <sup>2</sup>	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
1	0,8	0,6	8500	12	0,10	0,15	0,010	0,05	20	79	16	84
2	0,2	0,5	8000	11	0,11	0,16	0,011	0,06	20	80	16	80
3	0,3	0,4	7500	10	0,12	0,17	0,012	0,07	21	84	15	75
4	0,4	0,7	7000	9	0,13	0,18	0,013	0,08	22	88	14	70
5	0,5	0,6	6500	8	0,14	0,19	0,014	0,09	23	92	15	75
6	0,6	0,5	6000	7	0,15	0,20	0,015	0,08	24	96	16	80
7	0,7	0,4	5500	8	0,16	0,19	0,014	0,07	23	92	16	84
8	0,8	0,5	5000	9	0,17	0,18	0,013	0,06	22	88	16	80
9	0,9	0,6	4500	10	0,18	0,17	0,012	0,05	21	84	15	75
10	1,0	0,7	4000	11	0,19	0,16	0,011	0,04	20	80	14	70
11	0,9	0,6	4500	12	0,20	0,15	0,010	0,03	20	79	15	75
12	0,8	0,5	5000	13	0,19	0,14	0,011	0,04	19	76	16	80
13	0,7	0,4	5500	14	0,18	0,13	0,012	0,05	18	72	16	84
14	0,6	0,5	6000	13	0,17	0,14	0,013	0,06	19	76	16	80
15	0,5	0,6	6500	12	0,16	0,15	0,014	0,07	20	80	16	80
16	0,4	0,7	7000	11	0,15	0,16	0,015	0,08	24	96	15	75
17	0,3	0,6	7500	10	0,14	0,17	0,014	0,09	23	92	14	70
18	0,2	0,5	8000	9	0,13	0,18	0,013	0,08	22	88	15	75
19	0,3	0,4	8500	8	0,12	0,19	0,012	0,07	21	84	16	80
20	0,4	0,5	9000	7	0,11	0,20	0,011	0,06	20	80	16	84
21	0,5	0,6	8500	8	0,10	0,19	0,010	0,05	20	79	16	80
22	0,6	0,7	8000	9	0,11	0,18	0,011	0,04	19	76	15	75
23	0,7	0,6	7500	10	0,12	0,17	0,015	0,03	18	72	14	70
24	0,8	0,5	7000	11	0,13	0,16	0,012	0,04	19	76	15	75

25	0,9	0,4	6500	12	0,14	0,15	0,013	0,05	24	96	16	80
26	1,0	0,5	6000	13	0,15	0,14	0,014	0,06	23	92	16	84
27	0,9	0,6	5500	14	0,16	0,13	0,015	0,07	22	88	16	80
28	0,8	0,7	5000	13	0,17	0,14	0,014	0,08	21	84	15	75
29	0,7	0,6	4500	12	0,18	0,15	0,013	0,09	20	80	14	70
30	0,6	0,5	4000	11	0,19	0,16	0,012	0,08	20	79	15	75
31	0,5	0,4	8000	10	0,20	0,17	0,011	0,07	19	76	16	80
32	0,4	0,5	7500	9	0,21	0,18	0,010	0,06	18	72	16	84

*Основные расчетные соотношения:*

Момент инерции тележки мостового крана, приведенный к валу двигателя:

$$J = J_{\text{дв}} + 2 \left[ J_1 + \frac{J_2}{i_{p1}^2} + \frac{J_2}{i_{p1}^2 i_{p2}^2} \right] + m\rho^2,$$

где  $i_{p1}=Z_2/Z_1$ - передаточное отношение первой пары колес редуктора;

$i_{p2}=Z_3/Z_4$ - передаточное отношение второй пары колес редуктора;

$i_p= i_{p1} i_{p2}$  - передаточное отношение редуктора в целом;

$\rho=R_{\text{х.к}}/i_p$ - радиус приведения барабана.

Статический момент нагрузки, приведенный к валу двигателя:

$$M_c = mgv_{\text{и.о}}/(\eta_p \Omega) = F_{\text{и.о}}\rho/\eta_p,$$

где  $\eta_p=\eta_1\eta_2$ - КПД редуктора в целом;

$\eta_1$ - КПД первой пары колес редуктора;

$\eta_2$ - КПД второй пары колес редуктора.

## 1.20. Тема практического занятия №9. Расчет параметров реостатного пуска двигателя постоянного тока

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 10, необходимо

- рассчитать пусковые сопротивления цепи обмотки якоря  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$  и  $R_{д3}$  трехступенчатого реостатного пуска электродвигателя при заданном значении пускового тока  $I^*_1= I_1/I_{яN}$ ;

Параметры двигателя постоянного тока приведены в Приложении.

Таблица 10. Варианты задач практического занятия №9 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	55	6	7	8	9	10
Тип ЭД	ДИ- 12-1	ДИ- 12-2	ДИ- 12-3	ДИ- 13-1	ДИ- 13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0	ДСП Я-04
$I_{1,0.e.}^*$	1,5	1,4	1,3	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55

Продолжение таблицы 10

№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип ЭД	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я- 1,5	ДМП Я- 0,37	ДМП Я- 0,62	МИ- 21-1	МИ- 21-2	МИ- 21-3	МИ- 21-4	МИ- 22-1
$I_{1,0.e.}^*$	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95	2,0	1,5

Продолжение таблицы 10

№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД	МИ- 22-2	МИ- 22-3	МИ- 22-4	МИ- 22-5	МИ- 22-6	МИ- 31-1	МИ- 31-2	МИ- 31-3	МИ- 31-4	МИ- 31-5
$I_{1,0.e.}^*$	1,4	1,3	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,4

Продолжение таблицы 10

№ вар	31	32	33
Тип ЭД	МИ- 31-6	МИ- 12-1	МИ- 12-3
$I_{1,0.e.}^*$	1,4	1,3	1,5

*Основные расчетные соотношения:*

Значение тока переключения  $I_2$ :

$$I_2 = I_1 \sqrt[n]{\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{я1}}}}$$

При трехступенчатом пуске  $n=3$ :

$$I_2 = I_1 \sqrt[3]{\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{я1}}}}$$

Сумма добавочных сопротивлений для двухступенчатого пуска:

$$R_{д1} + R_{д2} + R_{д3} = R_{я.1} - R_{я.}$$

Полное сопротивление якорной цепи на  $i$ -ой ступени пускового резистора:

$$R_{яi} = R_{я1} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{i-1}$$

Очевидно, что на первой ступени ( $i=1$ )  $R_{я.1} = R_{я.1}$ .

На второй ступени ( $i=2$ ):

$$R_{я2} = R_{я1} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{2-1} = R_{я1} \left( \frac{I_2}{I_1} \right).$$

На третьей ступени ( $i=3$ ):

$$R_{я3} = R_{я1} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{3-1} = R_{я1} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2.$$

Сопротивление  $i$ -ой ступени пускового реостата:

$$R_{доб i} = R_{яi} - R_{я.}$$

Таким образом, добавочное сопротивление пускового резистора на первой ступени:

$$R_{доб 1} = R_{я1} - R_{я.} = R_{д1} + R_{д2} + R_{д3}.$$

Добавочное сопротивление пускового резистора на второй ступени:

$$R_{доб 2} = R_{я2} - R_{я.} = R_{д2} + R_{д3}.$$

Добавочное сопротивление пускового резистора на третьей ступени:

$$R_{доб 3} = R_{я3} - R_{я.} = R_{д3}.$$

Или  $R_{доб 3} = R_{доб 2} - R_{д2} = R_{д3}.$

### **1.21. Тема практического занятия №10. Расчет искусственных электромеханических характеристик ЭП постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем в цепи обмотки якоря**

На рис.1.13, рис.1.14 и рис.1.15 приведены схемы реверсивных тиристорных преобразователей ЭП постоянного тока.

Вид электромеханических характеристик ЭП постоянного тока с УВ в цепи обмотки якоря приведен на рис.1.16.

### Задание

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 11, и заданного варианта схемы реверсивного тиристорного преобразователя:

-нарисовать и привести в отчете заданную схему реверсивного тиристорного ЭП постоянного тока;

-выполнить расчет и построить электромеханические характеристики с обозначением зоны прерывистого тока якоря для двух значений эквивалентной индуктивности цепи обмотки якоря:  $L_{\sigma 1}=L_{\text{я}}$  и  $L_{\sigma 2}=L_{\text{я}}+L_{\text{с.д.}}$

Величину  $L_{\text{с.д.}}$  определить из условия сокращения зоны прерывистого тока в  $N$  раз.

Параметры двигателя приведены в Приложении.

Таблица 11. Варианты задач практического занятия №10 и исходные данные

№ вар		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип ЭД		ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0	ДСП Я-04
Схема выпрямителя	$k_T$	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1
	$m_2$	3	3	6	3	3	6	3	3	6	3
$N$		3,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	3,0

Продолжение таблицы 11

№ вар		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип ЭД		ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я1,5	ДМП Я0,37	ДМП Я0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3	МИ-21-4	МИ-22-1
Схема выпрямителя	$k_T$	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1
	$m_2$	3	3	3	6	3	3	6	3	3	6
$N$		2,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5

Продолжение таблицы 11

№ вар		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД		МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5
Схема выпрямителя	$k_T$	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1
	$m_2$	3	3	3	6	3	3	6	3	3	6
$N$		2,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5

Продолжение таблицы 11

№ вар		31	32	33
Тип ЭД		МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
Схема выпрямителя	$k_T$	2	1	2
	$m_2$	3	3	3
$N$		2,0	3,0	3,0

*Основные расчетные соотношения:*  
 приведены выше – формулы (1.55), (1.56) и (1.57).

## **1.22. Тема практического занятия №11. Расчет искусственных электромеханических характеристик ЭП ПТ с реверсивным широтно-импульсным преобразователем в цепи обмотки якоря**

На рис.1.17 приведены схема реверсивного ШИП (*а*) и временные диаграммы, поясняющие симметричный (*б*) и несимметричный способы управления (*в*) [2].

Вид электромеханических характеристик реверсивного ЭП постоянного тока с ШИП при симметричном способе управления приведен на рис. 1.18, *а*, при несимметричном способе управления - приведен на рис. 1.18, *б*.

Расчетные соотношения, необходимые для расчета электромеханических характеристик, приведены выше – формулы (1.59), (1.60), (1.61) и (1.62).

### Задание

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 12, и заданного способа управления реверсивного ШИП:

-нарисовать и привести в отчете заданную схему реверсивного ЭП постоянного тока с ШИП;

-выполнить расчет и построить электромеханические характеристики с обозначением зоны прерывистого тока якоря для двух значений эквивалентной индуктивности цепи обмотки якоря:  $L_{\varepsilon 1}=L_{\text{я}}$  и  $L_{\varepsilon 2}=L_{\text{я}}+L_{\text{с.д.}}$

Величину  $L_{\text{с.д.}}$  определить из условия сокращения зоны прерывистого тока в  $N$  раз.

Параметры двигателя постоянного тока приведены в Приложении.

Таблица 12. Варианты задач практического занятия №11 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я1,0	ДПЦ Я3,0	ДСП Я-04
Способ управления	Сим-метр	Не сим м								
$N$	3,0	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	3,0

Продолжение таблицы 12

№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип ЭД	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3	МИ-21-4	МИ-22-1
Способ Управления	Сим-метр	Не симм	Сим-метр	Не симм	Сим-метр	Не симм	Сим-метр	Не симм	Сим-метр	Не симм
$N$	2,0	2,5	3,0	2,5	2,0	3,0	2,5	2,0	2,5	3,0

Продолжение таблицы 12

№ вар	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5
Способ управл.	Сим-метр	Не симм								
$N$	2,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5

Продолжение таблицы 12

№ вар	31	32	33
Тип ЭД	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
Способ управл.	Не симм	Сим-метр	Не симм
$N$	2,0	3,0	3,0

*Основные расчетные соотношения:*

приведены выше – формулы (1.59), (1.60), (1.61) и (1.62).

## **2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **2.1. Краткие сведения по основам асинхронного электропривода**

Трехфазный АД имеет обмотку статора, подключаемую к трехфазной сети переменного тока с напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$  и обмотку ротора. Обмотка ротора может быть выполнена аналогично обмотки статора из проводников с выводами на три контактных кольца. Такая конструкция соответствует АД с фазным ротором что позволяет включать в роторную цепь различные электротехнические элементы, например, резисторы для регулирования скорости, тока и момента ЭП, и создавать специальные схемы включения АД [2]. Большинство АД выполняется с короткозамкнутой обмоткой ротора, без внешних выводов

В асинхронном двигателе (АД) электрическая мощность  $P_1$ , потребляемая от сети переменного тока, преобразуется в механическую мощность  $P_2$ , отдаваемую нагрузке на валу двигателя. Под действием приложенного к обмотке статора АД переменного напряжения  $U_1$  по ней протекает ток  $I_1$ , реактивная составляющая которого  $I_\mu$  создает вращающийся магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток наводит в короткозамкнутой обмотке ротора ЭДС  $E_2$ , под воздействием которой по обмотке протекает ток  $I_2$ .

В результате взаимодействия тока обмотки ротора  $I_2$  с магнитным потоком  $\Phi$  создается вращающий момент, направленный в сторону вращения магнитного поля:

$$M = C_m \Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (2.1)$$

где  $C_m$  – постоянный коэффициент, зависящий от параметров АД;  
 $\psi_2$  – фазовый сдвиг между векторами ЭДС  $E_2$  и током обмотки ротора  $I_2$ .  
 Угловая скорость вращения ротора АД  $\Omega$  определяется по формуле

$$\Omega = \omega_1 (1 - s), \quad (2.2)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1 / p_n$  – угловая скорость вращения магнитного поля, созданного током  $I_\mu$ ;

$s = (\omega_1 - \Omega) / \omega_1$  – скольжение АД; (2.3)

$f_1$  – частота питающего напряжения;

$p_n$  – число пар полюсов АД.

Электромагнитная мощность  $P_{эм}$ , передаваемая через воздушный зазор со статора на ротор, равна потребляемой мощности  $P_1$  за вычетом потерь в стали магнитопровода  $\Delta P_c$  и электрических потерь в обмотке статора  $\Delta P_1$ :

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_c - \Delta P_1. \quad (2.4)$$

Механическая мощность  $P_2$ , отдаваемая двигателем нагрузке, равна разности между электромагнитной мощностью  $P_{эм}$  и мощностью потерь в обмотке ротора  $\Delta P_2$  и механических потерь  $\Delta P_{мех}$ :

$$P_2 = P_{эм} - \Delta P_2 - \Delta P_{мех}. \quad (2.5)$$

Если пренебречь механическими потерями, то мощность  $P_2$  можно определить через электромагнитную мощность:

$$P_2 = (1 - s) P_{эм}. \quad (2.6)$$

Электрические потери мощности в цепи обмотки ротора  $\Delta P_2$ , которые часто называют потерями скольжения, без учета механических потерь представляют собой разность электромагнитной  $P_{эм} = M\omega_1$  и полезной механической мощности  $P_2 = M\Omega$ , т. е.

$$\Delta P_2 = P_{эм} - P_2 = M\omega_1 - M\Omega = M\omega_1 s = P_{эм} s. \quad (2.7)$$

Потери мощности в роторе, выраженные через электрические параметры ротора, определяются как

$$\Delta P_2 = 3(I_2')^2 R_2'. \quad (2.8)$$

где  $I_2'$  – ток обмотки ротора, приведенный к параметрам обмотки статора;

$R'_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к параметрам обмотки статора.

Приравняв (2.7) и (2.8), получим

$$M = 3(I_2')^2 R'_2 / (\omega_1 s). \quad (2.9)$$

Отсюда видно, что электромагнитный момент прямо пропорционален потерям в обмотке ротора, которые зависят от величины скольжения.

Определим коэффициент полезного действия АД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(1-s)P_{эм}}{P_{эм} + \Delta P_{ст} + \Delta P_1}. \quad (2.10)$$

Из (2.10) следует очевидное неравенство

$$\eta < (1-s).$$

Таким образом, КПД АД будет наибольшим только при малых значениях скольжения.

Характер зависимости КПД АД от нагрузки аналогичен соответствующим зависимостям для электрических машин других типов. Максимум КПД АД малой и средней мощности составляет 0,7 – 0,9, для машин большой мощности он равен 0,94 – 0,96.

Для построения электромеханической характеристики АД проанализируем характерные точки этой характеристики и ее асимптоты, придавая скольжению  $s$  и скорости  $\Omega$  различные значения в пределах  $\pm\infty$ :

$s = 0, \Omega = \omega_1, I_2' = 0$  – точка идеального холостого хода;

$s = 1, \Omega = 0, I_2' = I_{кз} = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + x_k^2}$  – точка короткого замыкания;

$s_1 = -R'_2/R_1, \Omega = \omega_1(1+s_1), I_2' = I_{max} = U_{\phi}/x_k$  – точка максимального значения тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений;

$R_1 + R'_2 = R_k$  – активное сопротивление короткого замыкания АД;

$x_1 + x'_2 = x_k$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания АД.

При  $s \rightarrow \pm\infty, \Omega \rightarrow \pm\infty, I_2' \rightarrow I_{\infty} = U_{\phi} / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}$  – асимптотическое значение тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

При  $0 < s < 1$  ток обмотки ротора, приведенный к параметрам обмотки статора определяется по формуле:

$$I_2' = U_{\phi} / \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_k^2}. \quad (2.11)$$

Подставив в (2.9) значение тока  $I_2'$  из (2.11), получим формулу электромагнитного момента трехфазного АД:

$$M = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\omega_1 s \left[ \left( R_1 + R_2' / s \right)^2 + x_{\kappa}^2 \right]}; \quad (2.12)$$

На рис.2.1 показана электромеханическая характеристика АД, причем по вертикальной оси указаны соответствующие друг другу скорость и скольжение АД, связанные соотношением (2.2).

Исследовав полученную зависимость  $M(s)$  на экстремум, т. е. взяв производную  $dM/ds$  и приравняв ее нулю, обнаружим наличие двух экстремальных точек момента и скольжения:

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_1 \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_{\kappa}^2} \right)}; \quad (2.13)$$

$$s_{\kappa} = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + x_{\kappa}^2}. \quad (2.14)$$

Причем знак «плюс» здесь относится к области скольжения  $s > 0$ , а знак «минус» – к области  $s < 0$ . Значения момента  $M_{\kappa}$  и скольжения  $s_{\kappa}$  АД, соответствующие экстремальным точкам, получили название критических.

На рис.2.2 приведена механическая характеристика АД. Отметим, что она соответствует определенному чередованию фаз питающего напряжения сети  $U_1$  на зажимах статора АД. При изменении порядка чередования двух фаз АД направление вращения поля статора изменится на противоположное, что заставит ротор вращаться в противоположную сторону. При этом механическая характеристика будут иметь вид аналогичный механической характеристики при прямом вращении поля статора, но расположена симметрично относительно начала координат.

На практике находит применение упрощенная формула расчета механической характеристики АД, которую называют формулой Клосса.

$$M = 2M_{\kappa} / (s/s_{\kappa} + s_{\kappa}/s); \quad (2.15)$$

### *Режимы работы АД*

АД может работать во всех возможных энергетических режимах, которые определяются значением и знаком скольжения, а именно [1]:

$s = 0$ ,  $\Omega = \omega_1 = \Omega_0$  – режим идеального холостого хода;

$s = 1$ ,  $\Omega = 0$  – режим короткого замыкания;

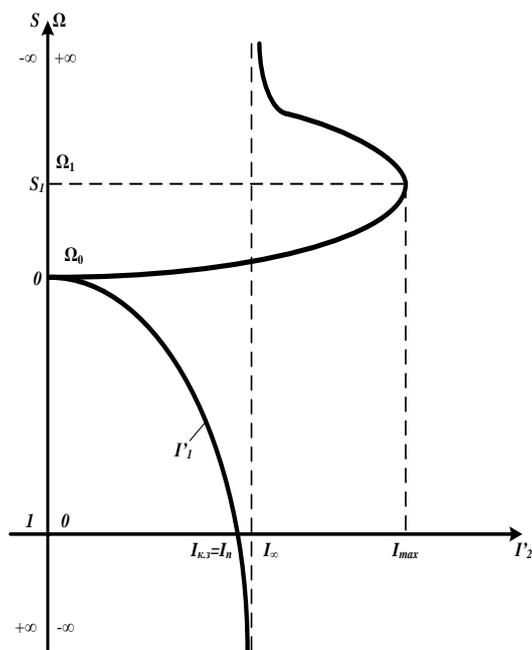
$0 < s < 1$ ,  $0 < \Omega < \omega_1$  – двигательный режим;

$s < 0$ ,  $\Omega > \omega_1$  – генераторный режим при работе АД параллельно с сетью (рекуперативное торможение);

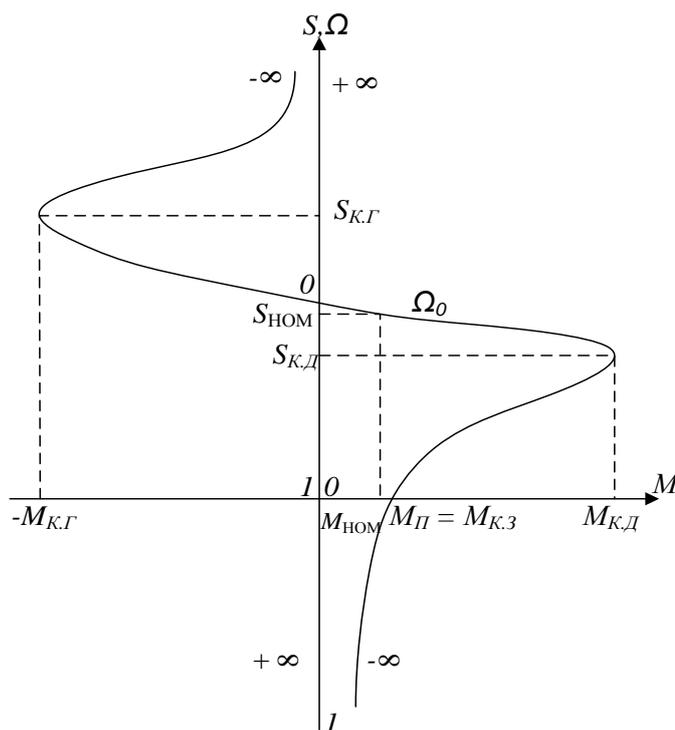
$s > 1$ ,  $\Omega < 0$  – генераторный режим при работе АД последовательно с сетью (торможение противовключением).

Кроме того, АД может работать в генераторном режиме независимо от сети переменного тока, который называется режимом динамического торможения.

В этом режиме обмотка статора АД, отключенная от сети переменного тока, подключена к источнику постоянного тока, а цепь ротора замкнута накоротко или на добавочные резисторы (см. разд. 6.10 [1]). Полученные формулы для электромеханической и механической характеристик позволяют назвать возможные способы регулирования координат АД, что, напомним, всегда связано с получением искусственных характеристик двигателя.



**Рис.2.1.** Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя



## Рис.2.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Так из (2.11) следует, что регулирование (ограничение) токов в роторе и статоре в переходных режимах может быть обеспечено изменением подводимого к статору АД напряжения, а также с помощью добавочных резисторов в цепях статора и ротора.

Формулы (2.2) и (2.12) определяют возможные способы получения искусственных механических характеристик, требуемых при регулировании момента и скорости АД, а именно:

- изменение уровня и частоты подводимого к двигателю напряжения;
- включение в цепи статора и ротора добавочных активных и реактивных резисторов;
- изменение числа пар полюсов магнитного поля АД.

Применяются и другие способы регулирования скорости вращения, реализуемые с помощью специальных схем включения АД, например, каскадные схемы, схемы электрического вала.

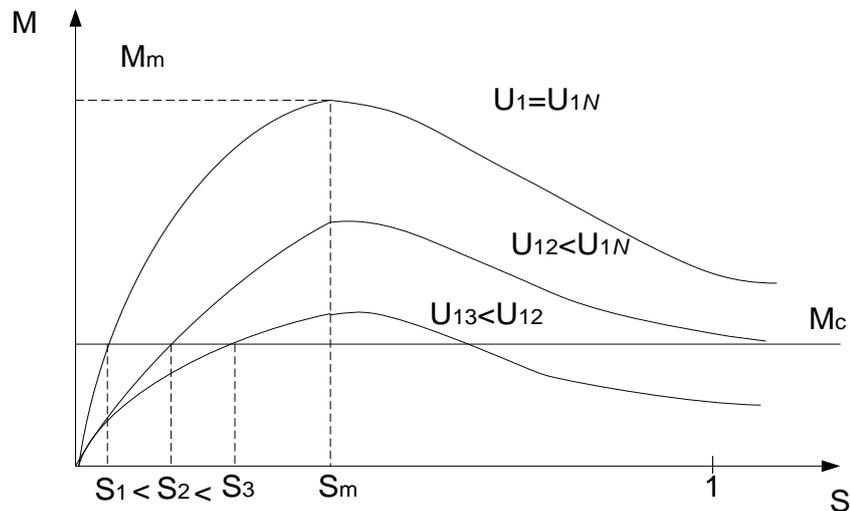
### 2.2. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением напряжения обмотки статора

Изменение величины напряжения, подводимого к статору АД, позволяет с помощью относительно простых схем управления осуществлять в статических и динамических режимах регулирование его скорости вращения с хорошими технико-экономическими показателями.

На рис. 2.3 приведены механические характеристика АД, построенные по формуле (2.13) для нескольких значений напряжения, подаваемого на обмотку статора,  $U_{13} < U_{12} < U_{1N}$ . При постоянном значении момента нагрузки  $M_c = \text{const}$  уменьшение напряжения, подаваемого на обмотку статора, приводит к увеличению скольжения  $s$ , а значит к уменьшению угловой скорости вращения (см. формулу (2.2)).

Из рис. 2.3 видно, что при уменьшении напряжения, подаваемого на обмотку статора, происходит уменьшение критического момента, в то же время величина критического скольжения остается неизменной. В результате при  $U_{\text{рег}} = \text{var}$  искусственные характеристики при напряжениях меньших номинального оказываются малоприспособными для регулирования скорости из-за уменьшения перегрузочной способности АД. Диапазон регулирования скорости вращения очень мал. Разомкнутые схемы асинхронного ЭП с регулятором напряжения обмотки статора используются лишь для воздействия в переходных процессах на момент АД, что может потребоваться, например, для обеспечения заданного ускорения движения ЭП или регулирования натяжения на исполнительном органе рабочей машины. Еще одним недостатком регулирования скорости вращения АД путем изменения скольжения является увеличение электрических потерь мощности в обмотке ротора  $\Delta P_2$  при

увеличении скольжения, т.е. при уменьшении скорости вращения и расширении диапазона регулирования скорости вращения (см. формулу (2.7)). Заметим, что регулирование напряжения на статоре не приводит к изменению скорости холостого хода  $\Omega_0 = 2\pi f_1 / p_{\text{п}}$ .



**Рис. 2.3.** Механические характеристики асинхронного двигателя при различных значениях напряжения обмотки статора

### 2.3. Тема практического занятия №12. Расчет естественной и искусственных механических характеристик асинхронного двигателя

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 13, и заданных значений напряжения обмотки статора  $U_1$  рассчитать и построить естественную и 3 искусственные механические характеристики асинхронного двигателя.

Параметры асинхронных двигателей приведены в Приложении.

Таблица 13. Варианты задач практического занятия №12 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6
Тип ЭД	4A71B 6Y3	4A80B SY3	4A90LD 8Y3	4A112MA 8Y3	4A132S 8Y3	4A160S 8Y3
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

Продолжение таблицы 13

№ вар	7	8	9	10	11	12
Тип ЭД	4A186M 8Y3	4A225M 8Y3	4A25M 8Y3	4A315S 8Y3	4A355M 8Y3	4A250S 10Y3
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

Продолжение таблицы 13

№ вар	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	4A280M 10Y3	4A355M 10Y3	4A315S 12Y3	4A315M 12Y3	4A355S 12Y3	4A355M 12Y3
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

Продолжение таблицы 13

№ вар	19	20	21	22	23	24
Тип ЭД	МТК0 11-6	МТК0 12-6	МТК1 11-6	МТК1 12-6	МТК2 11-6	МТКВ3 11-6
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

Продолжение таблицы 13

№ вар	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД	МТКВ31 1-8	МТКВ3 12-6	МТКВ3 12-8	МТКВ4 11-6	МТКВ4 11-8	МТКВ4 12-6
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

*Основные расчетные соотношения:*

Механическую характеристику АД следует рассчитать по формуле Клосса

$$M = 2M_K / (s/s_K + s_K/s);$$

Значение критического момента (максимального момента) механической характеристики можно определить с учетом относительного значения критического момента  $m_K$ , приведенного в паспортных данных асинхронного двигателя:

$$M_K = m_K M_N.$$

Значение номинального момента определим по паспортным данным двигателя

$$M_N = P_N / \Omega_N.$$

Критическое значение скольжения  $s_k$

$$s_k = s_N \left( m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right).$$

**Расчет естественной механической характеристики АД**

Расчет естественной механической характеристики АД проводится по формуле Клосса и формуле для расчета критическое значение скольжения  $s_k$ . Задаваясь значениями скольжения  $0 < s < (+s_k)$ , рассчитать значение момента АД в двигательном режиме. Результаты расчета свести в таблицу 14, строка « $U_{1N}$ , В», двигательный режим.

Задаваясь значениями скольжения  $(-s_k) < s < 0$ , рассчитать значение момента АД в генераторном режиме.

Результаты расчета свести в таблицу 14 – строка « $U_{1N}$ , В», генераторный режим.

Таблица 14

**Результаты теоретического расчета естественной и искусственных механических характеристик АД КЗ при  $f_1 = f_{1N} = 50$  Гц**

$U_1$ , В		Двигательный режим				Генераторный режим			
$U_{1N}$ , В	$s$								
	$M$ , Нм								
$U_{1,1}$ , В	$s$								
	$M$ , Нм								
$U_{1,2}$ , В	$s$								
	$M$ , Нм								
$U_{1,3}$ , В	$s$								
	$M$ , Нм								

*Расчет искусственной механической характеристики асинхронного двигателя при пониженном напряжении обмотки статора*

Расчет искусственной механической характеристики АД КЗ при пониженном напряжении обмотки статора проводим по формуле Клосса. Величина критического скольжения не зависит от величины напряжения обмотки статора. Значение критического момента в соответствии (2.13) прямо пропорционально квадрату напряжения обмотки статора, поэтому при расчете искусственной механической характеристики следует рассчитать значение критического момента при пониженном напряжении по формуле:

$$M_{к.и} = M_{к.е} (U_{1и} / U_{1е})^2,$$

где  $U_{1и}$  – напряжение фазы, принятое для расчета искусственной механической характеристики АД;

$U_{1е}$  – напряжение фазы, принятое для расчета естественной механической характеристики АД;

$M_{к.е}$  – критическое значение момента АД естественной механической характеристики АД.

Относительное значение критического момента искусственной механической характеристики при пониженном напряжении  $M_{к.и}$ :

$$m_{к.и} = M_{к.и} / M_N.$$

Расчет искусственных механических характеристик АД провести для трех заданных значений напряжения, подаваемого на обмотку статора:  $U_{1,1}$ ;  $U_{1,2}$ ;  $U_{1,3}$ .

Для заданных значений напряжения обмотки статора:

- задаваясь значениями скольжения  $0 < s < (+s_k)$ , рассчитать значение момента АД в двигательном режиме. Результаты расчета свести в таблицу 14;

- задаваясь значениями скольжения  $(-s_k) < s < 0$ , рассчитать значение момента АД в генераторном режиме. Результаты расчета свести в таблицу 14.

По результатам расчетов, сведенных в таблицу 14 (строки  $U_{1,1}$ , о.е.,  $U_{1,2}$ , о.е. и  $U_{1,3}$ , о.е.), построить на графике естественную и искусственные механические характеристики двигательного и генераторного режимов работы АД.

## 2.4. Тема практического занятия №13. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя

### А. Расчет характеристик прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

*Расчет механического переходного процесса при прямом пуске асинхронного двигателя.*

Механические переходные процессы пуска АД КЗ при условии постоянства момента инерции  $J = \text{Const}$  и статического момента сопротивления нагрузки  $M_c = \text{Const}$  описываются системой уравнений:

$$M_{\text{дин}} = M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (2.16)$$

$$M = 2M_K / (s/s_K + s_K/s); \quad (2.17)$$

$$s = (\omega_1 - \Omega) / \omega_1 \text{ — скольжение АД}; \quad (2.18)$$

$$M_c = \text{const}, \quad (2.19)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1 / p_n$  – угловая скорость вращения магнитного поля, рад/с;

$f_1$  – частота питающего напряжения, Гц;

$p_n$  – число пар полюсов АД;

$M$  – момент, развиваемый двигателем, Нм;

$M_c$  – момент нагрузки, приведенный к валу двигателя, Нм;

$J$  – момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, кгм<sup>2</sup>;

$M_K$  – момент критический (максимальный) асинхронного двигателя, Нм;

$s, s_K$  – скольжение текущее и критическое, соответствующее критическому моменту, о.е.;

$\Omega$  – угловая скорость ротора двигателя, рад/с;

Решая уравнения (2.16), (2.17), (2.18), получим расчетное соотношение для определения времени прямого пуска АД КЗ:

$$t = \frac{J\omega_1}{M_K} \left[ \frac{1}{4s_K} \left( s_H^2 - s^2 + 2s_K \ln \frac{s_H}{s} \right) \right]. \quad (2.20)$$

При пуске с начальным скольжением  $s_H = 1$  формула (2.20) принимает вид:

$$t = \frac{J\omega_1}{M_K} \left[ \frac{1}{4s_K} \left( 1 - s^2 + 2s_K \ln \frac{1}{s} \right) \right]. \quad (2.21)$$

### Задание:

Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 15, и заданного значения напряжения обмотки статора  $U_1 = U_{1N}$  рассчитать и построить пусковую характеристику АДК при прямом пуске.

Параметры двигателя приведены в Приложении.

Таблица 15. Варианты задач практического занятия №13 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6
Тип ЭД	4A71B 6У3	4A80B 5У3	4A90LD 8У3	4A112MA 8У3	4A132S 8У3	4A160S 8У3

### Продолжение таблицы 15

№ вар	7	8	9	10	11	12
Тип ЭД	4A186M 8У3	4A225M 8У3	4A25M 8У3	4A315S 8У3	4A355M 8У3	4A250S 10У3

### Продолжение таблицы 15

№ вар	13	14	15	16	17	18
-------	----	----	----	----	----	----

Тип ЭД	4А280М 10У3	4А355М 10У3	4А315S 12У3	4А315М 12У3	4А355S 12У3	4А355М 12У3
--------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Продолжение таблицы 15

№ вар	19	20	21	22	23	24
Тип ЭД	МТК0 11-6	МТК0 12-6	МТК1 11-6	МТК1 12-6	МТК2 11-6	МТКВ3 11-6

Продолжение таблицы 15

№ вар	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД	МТКВ31 1-8	МТКВ3 12-6	МТКВ3 12-8	МТКВ4 11-6	МТКВ4 11-8	МТКВ4 12-6

Задаваясь значениями скольжения  $s$  в пределах от 0, ..., 1,0, необходимо по формуле (2.21) рассчитать время  $t$  для каждого принятого значения  $s$ . Далее рассчитать значение скорости вращения  $\Omega$  и заполнить таблицу 16.

Таблица 16

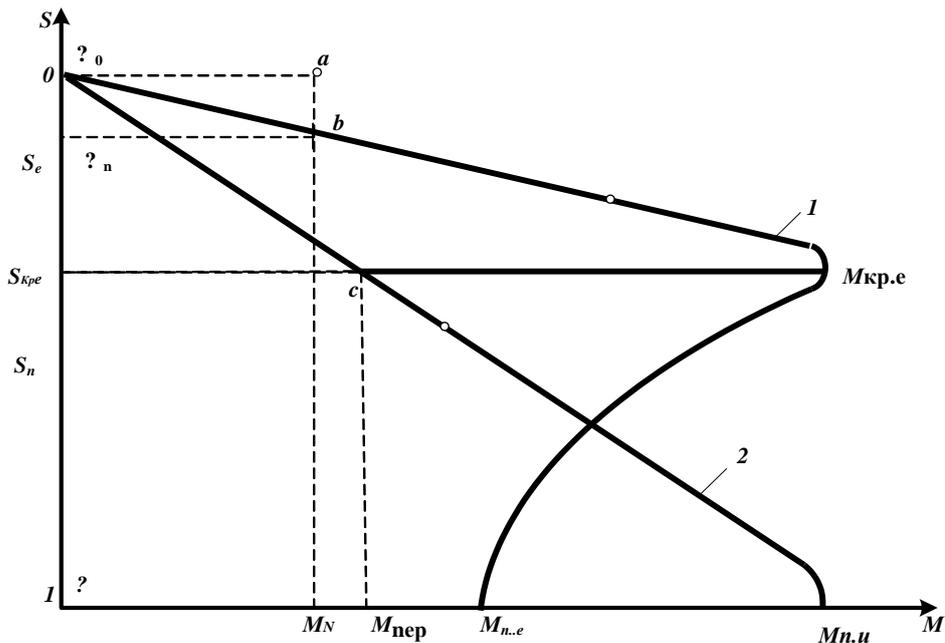
$s$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$t$ , с								
$\Omega$ , рад/с								

По данным таблицы 16 построить характеристику прямого пуска  $\Omega=f(t)$ .

## Б. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором в одну ступень

*Расчет механического переходного процесса асинхронного двигателя с фазным ротором при пуске в одну ступень*

Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при одноступенчатом пуске приведены на рис.2.4. Пуск начинается по искусственной характеристики 2 с включенным в цепь обмотки ротора добавочным сопротивлением  $R_{доб}$ . Пусковой момент двигателя равен значению  $M_{п.и}$ . Разгон по характеристики 2 идет до точки  $c$ , соответствующей моменту переключения  $M_{пер}$ , далее сопротивление  $R_{доб}$  необходимо закортить ( $R_{д.р}=0$ ). Момент двигателя при этом скачком возрастает до значения  $M_{кр.е}$ . Далее разгон идет по естественной механической характеристике 1 до точки  $b$ , соответствующей точки номинального режима работы двигателя ( $M_N, s_{eN}$ ).



**Рис.2.4.** Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при одноступенчатом пуске

*Основные расчетные соотношения*

Определим активное сопротивление фазной обмотки ротора  $R_p$ :

$$R_p = \frac{M_N \omega_1 s_N}{3I_{2N}^2}; \quad (2.22)$$

где  $M_N = P_N / \Omega_N$  – номинальное значение момента двигателя.

Необходимую величину добавочного сопротивления в цепи ротора  $R_{доб}$  определим по формуле (2.23):

$$R_{доб} = R_p (s_{кр.и} / s_{кр.е} - 1), \quad (2.23)$$

где  $s_{кр.е}$  – критическое значение скольжения естественной механической характеристики определяется по паспортным данным двигателя;

$s_{кр.и}$  – критическое значение скольжения искусственной механической характеристики.

Для уменьшения времени пуска целесообразно принять  $s_{кр.и} = 1$ . Этот случай иллюстрируется пусковыми характеристиками, приведенными на рис.2.4.

Момент переключения  $M_{пер}$  определяется по формуле

$$M_{пер} = 2M_{кр} / (s_2 / s_{кр.и} + s_{кр.и} / s_2), \quad (2.24)$$

где  $s_2$  – значение величины скольжения на момент переключения с искусственной на естественную механическую характеристику.

При скольжении переключения  $s_2 = s_{кр.е}$  и значении  $s_{кр.и} = 1$  момент переключения равен

$$M_{\text{пер}} = 2M_{\text{кр}}/(s_{\text{кр.е}}/1+1/s_{\text{кр.е}}). \quad (2.25)$$

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 17, заданного типа асинхронного двигателя и заданного значения напряжения обмотки статора  $U_1 = U_{1N}$  рассчитать и построить пусковые характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при прямом пуске и пуске в одну ступень.

Параметры двигателей приведены в Приложении.

Таблица 17. Варианты задач практического занятия №13 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6
Тип ЭД	МТН 111-6	МТН 112-6	МТН 211-6	МТН 311-6	МТН 312-6	МТН 312-8

Продолжение таблицы 17

№ вар	7	8	9	10	11	12
Тип ЭД	МТН 311-8	МТН 312-8	МТН 411-6	МТН 412-6	МТН 411-8	МТН 412-8

Продолжение таблицы 17

№ вар	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	МТФ 012-6	МТФ 111-6	МТФ 112-6	МТФ 211-6	МТФ 311-6	МТФ 411-6

Продолжение таблицы 17

№ вар	19	20	21	22	23	24
Тип ЭД	МТФ 311-8	МТФ 312-8	МТФ 411-8	МТН 011-6	МТН 012-6	МТН 111-6

Продолжение таблицы 17

№ вар	25	26	27	28	29	30
Тип ЭД	МТН 411-8	МТН 412-6	МТН 412-8	МТН 312-6	МТН 311-8	МТН 311-6

Задаваясь значениями скольжения  $s$  в пределах от 0, ...,  $s_2 = s_{\text{кр.е}}$ , ..., 1, 0, необходимо рассчитать параметры естественной и искусственной характеристик и заполнить таблицу 18.

Характеристики  $M_e = f(s)$  и  $M_{\text{и}} = f(s)$  рассчитываются по формуле Клосса  $M = 2M_{\text{кр}}/(s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s)$  с учетом значения  $s_{\text{кр.е}}$  и значения  $s_{\text{кр.и}} = 1$ , приняв значение  $M_{\text{кр}} = M_{\text{кр.е}}$ .

Критическое значение скольжения  $s_{\text{кр.е}}$  можно рассчитать по формуле:

$$s_{\text{кр}} = s_N \left( m_{\text{к}} + \sqrt{m_{\text{к}}^2 - 1} \right).$$

Далее следует рассчитать время пуска в одну ступень. Расчет ведется в два этапа. Первый этап расчета – пуск с включенным в цепь обмотки ротора добавочным сопротивлением  $R_{доб}$ , величина которого рассчитывается по формуле (2.23). По формуле (2.21) следует рассчитать время пуска  $t_1$ , за которое скольжение  $s$  изменяется в пределах  $1 < s < s_2 = s_{кр.е}$ . При  $t = t_1$  добавочное сопротивления цепи обмотки ротора  $R_{доб}$  необходимо закоротить.

Второй этап пуска – продолжение пуска двигателя, но уже с закороченным сопротивлением  $R_{доб}$ . По формуле (2.20) следует рассчитать время  $t_2$ , за которое скольжение  $s$  изменится в пределах  $s_2 < s < s_N$ . Значение скольжения  $s_2 = s_{кр.е}$ . Значение  $s_{кр.е}$  определяется по паспортным данным двигателя. Полное время пуска в одну ступень  $t_{о.п} = t_1 + t_2$ . Результаты расчета свести в таблицу 18.

Далее следует рассчитать время прямого пуска  $t_{п.п}$  (без добавочного сопротивления  $R_{доб}$ ). Расчет  $t_{п.п}$  следует вести по формуле (2.21) при изменении скольжения в пределах  $s_N < s < 1$ .

Рассчитанные значения времени  $t_{п.п}$  занести в таблицу 18.

Таблица 18. Результаты расчета времени прямого пуска и пуска в одну ступень

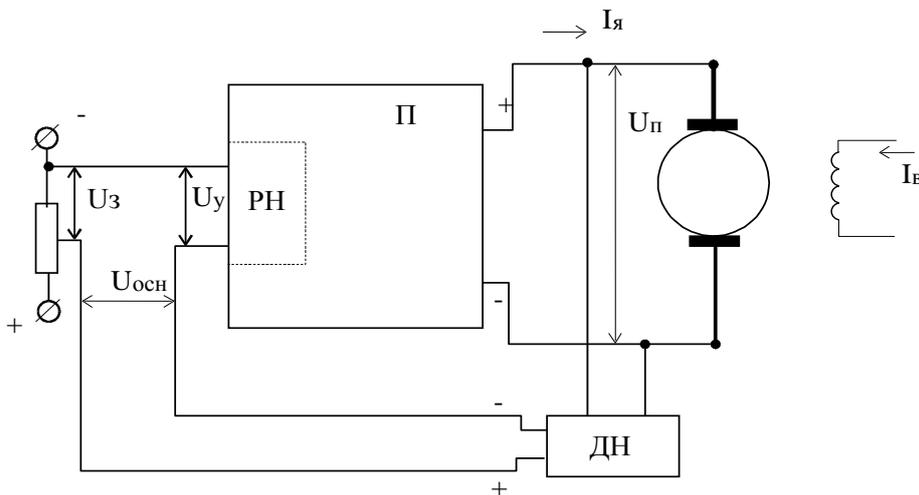
$s$	0	0,03	0,06	0,1	0,2	$s_2 = s_{кр.е}$	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Omega$ , рад/с										
$M_e$ , Нм										
$M_{и}$ , Нм										
$t_{о.п}$ , с										
$t_{п.п}$ , с										

По данным таблицы 18 построить пусковую диаграмму асинхронного двигателя с фазным ротором  $M=f(t)$  в одну ступень и при прямом пуске. Сравнить полученные значения времени разгона двигателя при пуске в одну ступень с временем разгона при прямом пуске этого двигателя.

### 3. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 3.1. Тема практического занятия №14. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению обмотки якоря

Функциональная схема системы ЭП с отрицательной обратной связью (ООС) по напряжению обмотки якоря приведена на рис.3.1 [1].



**Рис. 3.1.** Функциональная схема электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению обмотки якоря

Исходные уравнения:

$$U_y k_{\Pi} = (U_3 - U_{\text{осн}}) k_{\Pi} = E_{\Pi}; \quad (3.1)$$

$$U_3 - U_{\text{осн}} = U_y;$$

$$U_{\text{осн}} = k_{\text{н}} U_{\text{я}} = k_{\text{н}} (E_{\Pi} - I_{\text{я}} R_{\Pi}), \quad (3.2)$$

где  $E_{\Pi}$  – ЭДС преобразователя;

$$E_{\Pi} = U_{\Pi} + I_{\text{я}} R_{\Pi},$$

$U_{\Pi} = U_{\text{я}}$  – напряжение, подаваемое на обмотку якоря;

$U_y$  – результирующее напряжение управления на входе системы;

$k_{\Pi} = E_{\Pi} / U_y$  – коэффициент усиления преобразователя;

$k_{\text{н}} = U_{\text{осн}} / U_{\Pi}$  – коэффициент обратной связи по напряжению;

$R_{\Pi}$  – активное сопротивление силовой цепи преобразователя;

$I_{\text{я}}$  – ток якоря двигателя постоянного тока;

$I_{\text{я}} R_{\Pi} = \Delta U_{\text{п.р}}$  – перепад напряжения на выходе преобразователя при разомкнутой обратной связи по напряжению.

Из (3.1) и (3.2) находим напряжение на выходе преобразователя при замкнутой обратной связи по напряжению

$$U_{\text{п.з}} = [U_3 k_{\Pi} / (1 + k_{\text{н}} k_{\Pi})] - [I_{\text{я}} R_{\Pi} / (1 + k_{\text{н}} k_{\Pi})] = U_{\text{по}} - \Delta U_{\text{п.з}}. \quad (3.3)$$

где  $[I_{\text{я}} R_{\Pi} / (1 + k_{\text{н}} k_{\Pi})] = \Delta U_{\text{п.з}}$  – перепад напряжения на выходе преобразователя при замкнутой обратной связи по напряжению.

Откуда нетрудно получить  $\Delta U_{\text{п.р}} / \Delta U_{\text{п.з}} = 1 + k_{\text{н}} k_{\Pi}$ ,

$k_{\text{н}} k_{\Pi} = K_{\text{треб.}} = \Delta U_{\text{п.р}} / \Delta U_{\text{п.з}} - 1$  – коэффициент усиления (передачи) системы,

необходимый для обеспечения заданного значения перепада напряжения  $\Delta U_{\text{п.з}}$ .

$\Delta U_{\text{п.з}} = (\Delta U_{\text{п.з, \%}} / 100) U_{\text{яN}}$  – заданное значение перепада напряжения цепи обмотки якоря замкнутой по напряжению системы при номинальном режиме работы.

Разрешим (3.1) и (3.2) относительно ЭДС

$$E_{\Pi} = (U_3 + I_{\text{я}} R_{\Pi} k_{\Pi}) k_{\Pi} / (1 + k_{\Pi} k_{\Pi}). \quad (3.4)$$

Как видно из (3.4), ОСН действует как комбинированная связь – отрицательная ОС по ЭДС преобразователя и положительная ОС по току якоря.

Откуда видно, что ЭДС  $E_{\Pi}$  растет из-за положительной ОС по току якоря.

Нетрудно видеть, что в замкнутой по напряжению системе падение напряжения  $\Delta U_{\Pi,з}$  при одинаковых нагрузках в  $(1+k_{\Pi}k_{\Pi})$  раз меньше, чем падение напряжения  $\Delta U_{\Pi,р}$  в разомкнутой системе.

Однако, поскольку система астатическая, то напряжение преобразователя  $U_{\Pi}$  даже при замыкании обратной связи по напряжению будет поддерживаться с ошибкой  $\Delta U_{\Pi,з}$ , определяемой статизмом  $S_{\text{хз}}$  внешней характеристики преобразователя.

$$S_{\text{хз}} = \Delta U_{\Pi,з} / E_{\Pi,0} = [\Delta U_{\Pi,р} / E_{\Pi,0}] / (1 + K_{\text{треб}}), \quad (3.5)$$

Таким образом, статизм  $S_{\text{хз}}$  (относительная ошибка замкнутой системы) зависит от коэффициента усиления преобразователя и коэффициента ОС по напряжению.

Чем больше диапазон регулирования напряжения  $D = U_{\Pi, \text{о max}} / U_{\Pi, \text{о min}}$ , тем больше статизм  $S_{\text{хз}}$  внешней характеристики замкнутой системы, определяемый по формуле (3.6):

$$S_{\text{хз}} = \Delta U_{\Pi,з} / U_{\Pi,0 \text{ min}} = [\Delta U_{\Pi,з} / U_{\Pi,0 \text{ max}}] D / (1 + K_{\text{треб}}) = S_{\text{хр}} D / (1 + K_{\text{треб}}), \quad (3.6)$$

где  $S_{\text{хр}}$  – статизм внешней характеристики разомкнутой системы.

Определим требуемый коэффициент усиления  $K_{\text{треб}}$ , исходя из заданного статизма внешней характеристики и диапазона регулирования.

$$K_{\text{треб}} = (S_{\text{хр}} / S_{\text{хз}}) D - 1. \quad (3.7)$$

Уравнение (3.3) можно записать в таком виде:

$$U_{\Pi} = U_3 k_{\Pi,э} - I_{\text{я}} R_{\Pi,э}, \quad (3.8)$$

где  $k_{\Pi,э} = k_{\Pi} / (1 + K_{\text{треб}})$  и  $R_{\Pi,э} = R_{\Pi} / (1 + K_{\text{треб}})$  – эквивалентные значения коэффициента усиления и внутреннего сопротивления преобразователя некоторой условной разомкнутой системы с теми же внешними характеристиками и теми же значениями напряжения задания  $U_3$ , что и рассмотренная замкнутая система (подобного рода замены замкнутой системы эквивалентной ей по основным характеристикам разомкнутой системы будут использованы и далее).

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 19, рассчитать требуемое значение коэффициента усиления преобразователя  $k_{\Pi}$  и

коэффициент обратной связи по напряжению  $k_n$ . Рассчитать и построить электромеханические характеристики системы ЭП при наличии и отсутствии обратной связи по напряжению обмотки якоря. Параметры двигателя приведены в Приложении.

Таблица 19. Варианты задач практического занятия №14 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0
$R_{п}, \text{Ом}$	0,3	0,7	3,0	0,1	0,3	0,05	0,05	0,14	0,01
$U_{з \max}, \text{В}$	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0	5,0
$\Delta U_{п.з}, \%$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07

Продолжение таблицы 19

№ вар	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	ДСП Я-04	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3
$R_{п}, \text{Ом}$	0,11	0,07	0,10	0,03	0,30	0,4	0,3	0,6	1,0
$U_{з \max}, \text{В}$	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0
$\Delta U_{п.з}, \%$	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08

Продолжение таблицы 19

№ вар	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Тип ЭД	МИ-21-4	МИ-22-1	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2
$R_{п}, \text{Ом}$	2,0	0,2	0,4	1,5	0,6	1,3	4,5	0,2	0,4
$U_{з \max}, \text{В}$	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0
$\Delta U_{п.з}, \%$	0,09	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6

Продолжение таблицы 19

№ вар	28	29	30	31	32	33
Тип ЭД	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
$R_{п}, \text{Ом}$	1,1	0,6	1,0	4,0	0,2	0,7
$U_{з \max}, \text{В}$	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\Delta U_{п.з}, \%$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2

где  $R_{п}$  – активное сопротивление силовой цепи преобразователя;

$U_{з}$  - напряжение задания;

$\Delta U_{п.з}, \%$  - заданное падение напряжения на выходе преобразователя при замкнутой обратной связи по напряжению в процентах.

Основные расчетные соотношения:

$$E_{пN} = U_{пN} + I_{яN} R_{п};$$

$$U_{пN} = U_{яN};$$

$$E_{пN} = U_{яN} + I_{яN} R_{п};$$

$$\Delta U_{п.3} = (\Delta U_{п.3, \%} / 100) U_{яN};$$

$$I_{я} R_{п} = \Delta U_{п.р};$$

$$k_{н} k_{п} = K_{треб} = \Delta U_{п.р} / \Delta U_{п.3} - 1;$$

$$k_{п} = \frac{E_{пN} + k_{п} k_{н} U_{яN}}{U_{3 \max}};$$

$$k_{н} = K_{треб} / k_{п};$$

$$U_{y} k_{п} = (U_{3} - U_{осн}) k_{п} = E_{п};$$

$$U_{y} = U_{3} - U_{осн};$$

$$U_{осн} = k_{н} U_{я} = k_{н} (E_{п} - I_{я} R_{п});$$

$$k_{н} = U_{осн} / U_{п};$$

Задаваясь значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при наличии отрицательной обратной связи по напряжению обмотки якоря  $\Omega_3 = f(I_{я})$ .

$$\Omega_3 = \frac{[U_3 k_{п} / (1 + k_{н} k_{п})] - [I_{я} R_{п} / (1 + k_{н} k_{п})] - I_{я} R_{я}}{k_e}$$

Напряжение  $U_3$  принять равным  $U_{3 \max}$ .

$$k_e = \frac{U_{яN} - I_{яN} R_{я}}{\Omega_N}$$

Результаты расчета свести в таблицу 20.

Таблица 20. Результаты расчета скоростных характеристик системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению

$I_{я}, A$	0	$0,5 I_{яN}$	$I_{яN}$
$\Omega_{раз}, рад/с$			
$\Omega_3, рад/с$			

Скоростную характеристику системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению следует рассчитать для напряжения задания  $U_3$  равном  $U_{yN}$ . Напряжение  $U_{yN}$  определим, используя приведенные выше расчетные соотношения:

$$U_{yN} = U_{3 \max} - U_{осн N}; \quad U_{осн N} = k_{н} U_{яN}; \quad k_{н} = K_{треб} / k_{п}; \quad k_{н} k_{п} = K_{треб} = \Delta U_{п.р} / \Delta U_{п.3} - 1.$$

Задаваясь значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению обмотки якоря  $\Omega_{раз} = f(I_{я})$ .

$$\Omega_{\text{раз}} = \frac{U_{yN} k_{\Pi} - I_{\text{я}} (R_{\Pi} + R_{\text{я}})}{k_e}.$$

Результаты расчета свести в таблицу 20.

По результатам расчетов построить скоростные характеристики системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению обмотки якоря,  $\Omega_{\text{з}}=f(I_{\text{я}})$  и  $\Omega_{\text{раз}}=f(I_{\text{я}})$ , соответственно.

### **3.2. Тема практического занятия №15. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости**

Функциональная схема электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью (ООС) по скорости приведена на рис.3.2 [1].



$$K_{\text{треб}} = (S_{xp}/S_{xz})D - 1 = \Delta\Omega_p / \Delta\Omega_3 - 1; \quad (3.12)$$

где  $S_{xp} = \Delta\Omega_p / \Omega_{o\max}$  — статизм скоростной характеристики в разомкнутой системе.

Если известны значения коэффициентов  $k_{п}$ ,  $k_{дв}$  и  $K_{\text{треб}}$ , то можно определить значение коэффициента  $k_c$ :

$$k_c = \frac{K_{\text{треб}}}{k_{п} k_{дв}}. \quad (3.13)$$

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 21, рассчитать требуемое значение коэффициента усиления преобразователя  $k_{п}$  и коэффициент обратной связи по скорости  $k_c$ . Построить скоростные характеристики разомкнутой и замкнутой по скорости системы ЭП.

Таблица 21. Варианты задач практического занятия №15 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0
$R_{п}$ , Ом	0,3	0,7	3,0	0,1	0,3	0,05	0,05	0,14	0,01
$U_{з\max}$ , В	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_3, \%$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07

Продолжение таблицы 21

№ вар	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	ДСП Я-04	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3
$R_{п}$ , Ом	0,11	0,07	0,10	0,03	0,30	0,4	0,3	0,6	1,0
$U_{з\max}$ , В	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_3, \%$	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08

Продолжение таблицы 21

№ вар	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Тип ЭД	МИ-21-4	МИ-22-1	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2
$R_{п}$ , Ом	2,0	0,2	0,4	1,5	0,6	1,3	4,5	0,2	0,4
$U_{з\max}$ , В	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0

$\Delta\Omega_{3,\%}$	0,09	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
-----------------------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Продолжение таблицы 21

№ вар	28	29	30	31	32	33
Тип ЭД	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
$R_{\Pi}$ , Ом	1,1	0,6	1,0	4,0	0,2	0,7
$U_{3 \max}$ , В	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\Delta\Omega_{3,\%}$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2

где  $R_{\Pi}$  – активное сопротивление силовой цепи преобразователя;

$U_{3 \max}$  – максимальное напряжение задания;

$\Delta\Omega_{3,\%}$  - заданное относительное значение перепада скорости замкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП.

*Основные расчетные соотношения:*

Абсолютное значение перепада скорости замкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_3 = (\Delta\Omega_{3,\%}/100)\Omega_N;$$

Абсолютное значение перепада скорости разомкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_p = I_{яN}R_{я.ц}/k_e;$$

$$R_{я.ц} = R_{я} + R_{\Pi};$$

$$k_e = \frac{U_{яN} - I_{яN}R_{я}}{\Omega_N}.$$

$$k_{дв} = \frac{1}{k_e} = \frac{1}{C_e \Phi_n}.$$

Требуемый коэффициент усиления системы  $K_{\text{треб}}$ :

$$K_{\text{треб}} = k_c k_{\Pi} k_{дв} = \Delta\Omega_p / \Delta\Omega_3 - 1;$$

Определим значения  $k_c$  и  $k_{\Pi}$ .

$$k_{\Pi} = \left( E_{\Pi N} + \frac{K_{\text{треб}} \Omega_N}{k_{дв}} \right) / U_{3 \max}.$$

где  $E_{\Pi N} = U_{яN} + I_{яN}R_{\Pi}$ , а

$$k_c = K_{\text{треб}} / k_{\Pi} k_{дв}$$

Расчет скоростной характеристики системы ЭП при наличии отрицательной обратной связи по скорости

$$\Omega_3 = U_3 k_{\Pi} k_{дв} / (1 + k_c k_{\Pi} k_{дв}) - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} / (1 + k_c k_{\Pi} k_{дв}) = \Omega_0 - \Delta\Omega_3,$$

Напряжение  $U_3$  принять равным  $U_{3 \max}$ .

Задаваясь значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при наличии отрицательной обратной связи по скорости. Результаты расчета свести в таблицу 22.

Таблица 22. Результаты расчета электромеханических характеристик системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по скорости

$I_{я}, А$	0	$0,5 I_{яN}$	$I_{яN}$
$\Omega_{раз}, рад/с$			
$\Omega_3, рад/с$			

Скоростную характеристику системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по скорости следует рассчитать для напряжения задания  $U_3$  равном  $U_{yN}$ . Напряжение  $U_{yN}$  определим, используя приведенные выше расчетные соотношения:

$$U_{yN} = U_{зmax} - U_{осcN}; \quad U_{осcN} = k_c \Omega_N; \quad k_c = K_{треб} / k_{\pi} k_{дв}; \quad k_c k_{\pi} k_{\pi} = K_{треб} = \Delta \Omega_{раз} / \Delta \Omega_3 - 1.$$

Задаваясь значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по скорости  $\Omega_{раз} = f(I_{я})$ .

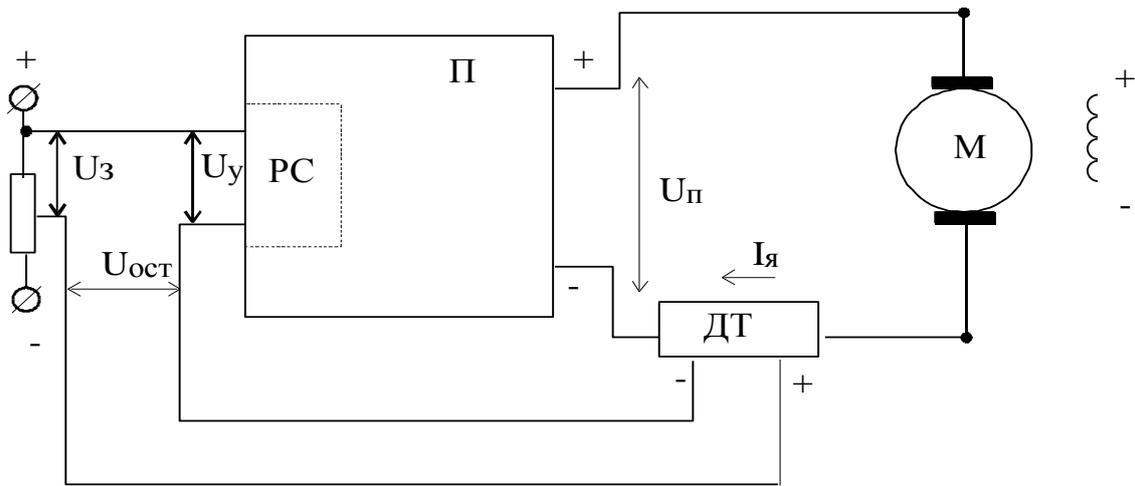
$$\Omega_{раз} = \frac{U_{yN} k_{\pi} - I_{я} (R_{\pi} + R_{я})}{k_e}.$$

Результаты расчета свести в таблицу 22.

По результатам расчетов построить скоростные характеристики системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по скорости,  $\Omega_3 = f(I_{я})$  и  $\Omega_{раз} = f(I_{я})$ , соответственно.

### 3.3. Тема практического занятия №16. Расчет параметров электропривода постоянного тока с положительной обратной связью по току якоря двигателя

Функциональная схема системы ЭП с положительной обратной связью (ПОС) по току якоря приведена на рис.3.3 [1].



**Рис. 3.3.** Функциональная схема электропривода постоянного тока с положительной обратной связью по току якоря

Исходные уравнения:

$$U_y k_{\Pi} = (U_z + U_{\text{ост}}) k_{\Pi} = E_{\Pi}; \quad (3.14)$$

$$U_{\text{ост}} = k_T I_{\text{я}}; \quad (3.15)$$

$$E_{\Pi} = I_{\text{я}} R_{\text{я.ц}} + \frac{\Omega}{k_{\text{дв}}}. \quad (3.16)$$

Здесь  $k_T = U_{\text{ост}} / I_{\text{я}}$  – коэффициент ОС по току;  $R_{\text{я.ц}}$  – суммарное сопротивление якорной цепи, включая и сопротивление силовой цепи преобразователя  $R_{\Pi}$ .

Из (3.14), (3.15), (3.16) получим уравнение статической скоростной характеристики

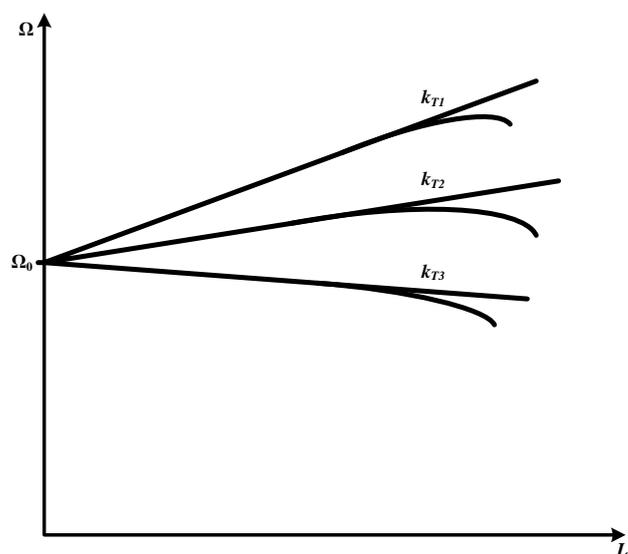
$$\Omega_3 = U_z k_{\Pi} k_{\text{дв}} - I_{\text{я}} R_{\text{я.ц}} k_{\text{дв}} (1 - k_{\Pi} k_T / R_{\text{я.ц}}) = \Omega_0 - \Delta\Omega_3; \quad (3.17)$$

$$\Omega_0 = U_z k_{\Pi} k_{\text{дв}}, \text{ а}$$

$$\Delta\Omega_3 = I_{\text{я}} R_{\text{я.ц}} k_{\text{дв}} (1 - k_{\Pi} k_T / R_{\text{я.ц}}). \quad (3.18)$$

Из (3.18) следует, что в зависимости от значения коэффициента  $k_T$  в этой системе теоретически может быть получена любая степень жесткости статической скоростной характеристики привода ( $k_{T1} > k_{T2} > k_{T3}$ ) (рис. 3.4).

Если характеристика системы вход–выход линейна, то и скоростная характеристика  $\Omega = f(I_{\text{я}})$  то же линейна, если нет, то  $\Omega = f(I_{\text{я}})$  нелинейна (сплошные толстые линии). Поскольку система разомкнута по скорости, то при различных других возмущающих воздействиях скорость  $\Omega_0$  будет изменяться. Поэтому положительная обратная связь (ПОС) по току применяется обычно только как дополнительная к основной ОС по напряжению или по скорости.



**Рис. 3.4.** Скоростные характеристики ЭП с положительной обратной связью по току якоря

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 23, рассчитать требуемое значение коэффициента усиления преобразователя  $k_{\Pi}$  и коэффициент обратной связи по току  $k_T$ . Построить скоростные характеристики разомкнутой и замкнутой по току якоря системы ЭП при трех значениях коэффициента обратной связи по току:  $k_{T1} = k_{TN}$ ;  $k_{T2} = 0,9k_{TN}$ ;  $k_{T3} = 1,1k_{TN}$ . Параметры двигателя приведены в Приложении.

Таблица 23. Варианты задач практического занятия №16 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0
$R_{\Pi}$ , Ом	0,3	0,7	3,0	0,1	0,3	0,05	0,05	0,14	0,01
$U_{3 \max}$ , В	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_{3,\%}$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07

Продолжение таблицы 23

№ вар	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	ДСП Я-04	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3
$R_{\Pi}$ , Ом	0,11	0,07	0,10	0,03	0,30	0,4	0,3	0,6	1,0
$U_{3 \max}$ , В	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_{3,\%}$	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08

Продолжение таблицы 23

№ вар	19	20	21	22	23	24	25	26	27
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Тип ЭД	МИ-21-4	МИ-22-1	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2
$R_{\Pi}$ , Ом	2,0	0,2	0,4	1,5	0,6	1,3	4,5	0,2	0,4
$U_{3 \max}$ , В	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0
$\Delta\Omega_{3,\%}$	0,09	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6

Продолжение таблицы 23

№ вар	28	29	30	31	32	33
Тип ЭД	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
$R_{\Pi}$ , Ом	1,1	0,6	1,0	4,0	0,2	0,7
$U_{3 \max}$ , В	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\Delta\Omega_{3,\%}$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2

где  $R_{\Pi}$  – активное сопротивление силовой цепи преобразователя;

$U_{3 \max}$  – максимальное напряжение задания;

$\Delta\Omega_{3,\%}$  – заданное относительное значение перепада скорости замкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП.

*Основные расчетные соотношения:*

Абсолютное значение перепада скорости замкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_3 = (\Delta\Omega_{3,\%}/100)\Omega_N;$$

Абсолютное значение перепада скорости разомкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_p = I_{яN}R_{я.ц}/k_e;$$

$$R_{я.ц} = R_{я} + R_{\Pi};$$

$$k_e = \frac{U_{яN} - I_{яN}R_{я}}{\Omega_N}.$$

$$k_{дв} = \frac{1}{k_e} = \frac{1}{C_e \Phi_n}.$$

Требуемый коэффициент усиления системы  $K_{\text{треб}}$ :

$$K_{\text{треб}} = k_T k_{\Pi} k_{дв} = \Delta\Omega_p / \Delta\Omega_3 - 1;$$

Откуда  $k_T k_{\Pi} = K_{\text{треб}} / k_{дв}$ .

Определим значения  $k_T$  и  $k_{\Pi}$ .

$$E_{\Pi N} = U_{яN} + I_{яN}R_{\Pi}$$

$$k_{\Pi} = (E_{\Pi N} - k_T k_{\Pi} I_{яN}) / U_{3 \max}.$$

$$k_{TN} = K_{\text{треб}} / (k_{дв} k_{\Pi}).$$

Задавая значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП  $\Omega_3 = f(I_{я})$  при наличии положительной обратной связи по току якоря для трех значениях

коэффициента обратной связи по току:  $\Omega_{31}=f(I_{я})$  при  $k_{т1}=k_{тN}$ ;  $\Omega_{32}=f(I_{я})$  при  $k_{т2}=0,9k_{тN}$ ; и  $\Omega_{33}=f(I_{я})$  при  $k_{т3}=1,1k_{тN}$ .

$$\Omega_3 = U_3 k_{п} k_{дв} - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} (1 - k_{п} k_{т} / R_{я.ц}) = \Omega_0 - \Delta\Omega_3;$$

Напряжение  $U_3$  принять равным  $U_{3\max}$ .

Результаты расчета свести в таблицу 24.

Таблица 24. Результаты расчета скоростных характеристик системы ЭП при наличии и отсутствии положительной обратной связи по току якоря

$I_{я}, A$	0	$0,25 I_{яN}$	$0,5 I_{яN}$	$0,75 I_{яN}$	$I_{яN}$
$\Omega_{раз}, рад/с$					
$\Omega_{31}, рад/с$					
$\Omega_{32}, рад/с$					
$\Omega_{33}, рад/с$					

Скоростную характеристику системы ЭП при отсутствии положительной обратной связи по току якоря следует рассчитать для напряжения задания  $U_3$  равном  $U_{yN}$ .

Напряжение  $U_{yN}$  определим, используя приведенные выше расчетные соотношения:

$$U_{yN} = U_{3\max} + U_{остN}; U_{остN} = k_{тN} I_{яN}; k_{тN} = K_{трреб} / (k_{дв} k_{п});$$

$$K_{трреб} = k_{т} k_{п} k_{дв} = \Delta\Omega_p / \Delta\Omega_3 - 1; k_{т} k_{п} = K_{трреб} / k_{дв};$$

$$k_{п} = (E_{пN} - k_{т} k_{п} I_{яN}) / U_{3\max}; E_{пN} = U_{яN} + I_{яN} R_{п}.$$

Задаваясь значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при отсутствии положительной обратной связи потоку  $\Omega_{раз}=f(I_{я})$ .

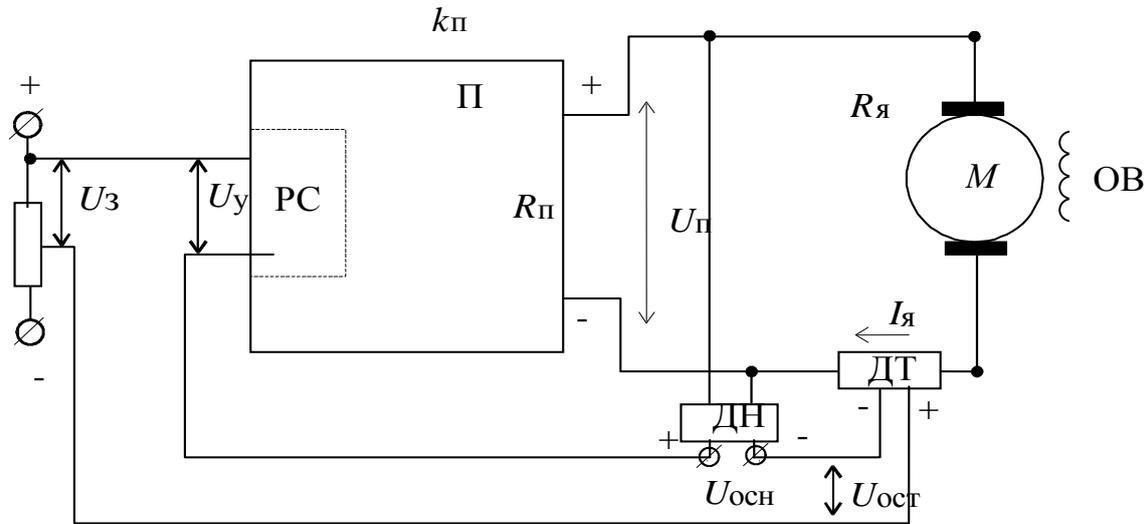
$$\Omega_{раз} = \frac{U_{yN} k_{п} - I_{яN} (R_{п} + R_{я})}{k_e}.$$

Результаты расчета свести в таблицу 24.

По результатам расчетов построить скоростные характеристики системы ЭП при наличии и отсутствии положительной обратной связи по току,  $\Omega_{31}=f(I_{я})$ ,  $\Omega_{32}=f(I_{я})$ ,  $\Omega_{33}=f(I_{я})$  и  $\Omega_{раз}=f(I_{я})$ , соответственно.

### 3.4. Тема практического занятия №17. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению и положительной обратной связью по току якоря

Функциональная схема системы ЭП с ООС по напряжению и ПОС по току якоря приведена на рис.3.5 [1].



**Рис.3.5.** Функциональная схема электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению и положительной обратной связью по току якоря

Исходные уравнения [1]:

$$U_y = U_3 - U_{осн} + U_{ост}; \quad (3.19)$$

$$U_{осн} = k_n (E_{\pi} - I_{я} R_{\pi}); \quad (3.20)$$

$$U_{ост} = k_T I_{я}; \quad (3.21)$$

$$E_{\pi} = k_{\pi} U_y; \quad (3.22)$$

$$E_{\pi} = I_{я} R_{я.ц} + \frac{\Omega}{k_{дв}}; \quad (3.23)$$

$$E_{\pi} = E_{дв} + I_{я} R_{я.ц} = U_{яN} + I_{яN} R_{\pi}; \quad (3.24)$$

Здесь:  $k_n = U_{осн} / U_{\pi}$  – коэффициент ОС по напряжению;

$k_T = U_{ост} / I_{я}$  – коэффициент ОС по току;

$k_{\pi} = E_{\pi} / U_y$  – коэффициент передачи преобразователя.

Решая систему (3.19) – (3.24), получим:

$$\Omega = \frac{1}{1 + k_n k_{\pi}} \left[ U_3 k_{\pi} k_{дв} - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} \left( 1 + k_n k_{\pi} \frac{R_{я}}{R_{я.ц}} - k_T k_{\pi} / R_{я} \right) \right] = \Omega_0 - \Delta \Omega_3, \quad (3.25)$$

$$\text{где: } \Omega_0 = \frac{U_3 k_{\pi} k_{дв}}{1 + k_n k_{\pi}}, \text{ а } \Delta \Omega_3 = \frac{1}{1 + k_n k_{\pi}} \left[ I_{я} R_{я.ц} k_{дв} \left( 1 + k_n k_{\pi} \frac{R_{я}}{R_{я.ц}} - k_T k_{\pi} / R_{я} \right) \right].$$

В рассматриваемой схеме при соответствующем выборе коэффициентов ОС можно обеспечить жесткость статической скоростной характеристики такую же, как и при ООС по скорости с коэффициентом  $k_c$ .

В этом случае  $k_n = k_c k_{дв}$ , а

$$k_T = k_n k_{дв}. \quad (3.26)$$

Если же  $k_T = (R_{я.ц} + k_n k_{п} R_{я}) / k_{п}$ , то статическая скоростная характеристика двигателя будет иметь абсолютную жесткость (при  $k_{п} = \text{const}$ ). Датчик напряжения ДН необходимо включить на зажимы двигателя.

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 25, рассчитать требуемое значение коэффициента усиления преобразователя  $k_{п}$  и коэффициентов обратной связи по напряжению якоря  $k_n$  и по току  $k_T$ . Построить скоростные характеристики системы ЭП разомкнутой и замкнутой по току якоря. Параметры двигателя приведены в Приложении.

Таблица 25. Варианты задач практического занятия №17 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0
$R_{п}, \text{Ом}$	0,3	0,7	3,0	0,1	0,3	0,05	0,05	0,14	0,01
$U_{з\max}, \text{В}$	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_{з}, \%$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07

Продолжение таблицы 25

№ вар	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	ДСП Я-04	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3
$R_{п}, \text{Ом}$	0,11	0,07	0,10	0,03	0,30	0,4	0,3	0,6	1,0
$U_{з\max}, \text{В}$	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_{з}, \%$	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08

Продолжение таблицы 25

№ вар	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Тип ЭД	МИ-21-4	МИ-22-1	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2
$R_{п}, \text{Ом}$	2,0	0,2	0,4	1,5	0,6	1,3	4,5	0,2	0,4
$U_{з\max}, \text{В}$	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0
$\Delta\Omega_{з}, \%$	0,09	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6

Продолжение таблицы 25

№ вар	28	29	30	31	32	33
Тип ЭД	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3

$R_{\text{п}}, \text{ Ом}$	1,1	0,6	1,0	4,0	0,2	0,7
$U_{3 \text{ max}}, \text{ В}$	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\Delta\Omega_{3, \%}$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2

*Основные расчетные соотношения:*

Абсолютное значение перепада скорости замкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_{3}=(\Delta\Omega_{3, \%}/100)\Omega_{N};$$

Абсолютное значение перепада скорости разомкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\begin{aligned} \Delta\Omega_{\text{р}} &= I_{\text{яN}}R_{\text{я.ц}}/k_{\text{е}}; \\ R_{\text{я.ц}} &= R_{\text{я}}+R_{\text{п}}; \\ k_{\text{е}} &= \frac{U_{\text{яN}} - I_{\text{яN}}R_{\text{я}}}{\Omega_{N}}. \\ k_{\text{дв}} &= \frac{1}{k_{\text{е}}} = \frac{1}{C_{\text{е}}\Phi_{\text{н}}}. \end{aligned}$$

Определим значения коэффициентов  $k_{\text{н}}$  и  $k_{\text{т}}$  в первом приближении. Значение  $k_{\text{т}}$  определим при допущении отсутствия отрицательной обратной связи по напряжению обмотки якоря. В этом случае

$$K_{1} = k_{\text{т}}k_{\text{п}}k_{\text{дв}} = \Delta\Omega_{\text{р}}/\Delta\Omega_{3} - 1;$$

Откуда  $k_{\text{т}}k_{\text{п}}=K_{1}/k_{\text{дв}}$ .

Определим значения  $k_{\text{т}}$  и  $k_{\text{п}}$ .

$$\begin{aligned} U_{\text{я}}k_{\text{п}} &= (U_{3} + U_{\text{ост}})k_{\text{п}} = E_{\text{п}}; \\ U_{\text{ост}} &= k_{\text{т}}I_{\text{я}} \end{aligned}$$

Для номинального режима

$$\begin{aligned} U_{3 \text{ max}}k_{\text{п}} + k_{\text{т}}k_{\text{п}}I_{\text{яN}} &= E_{\text{пN}}; \\ k_{\text{п}} &= (E_{\text{пN}} - k_{\text{т}}k_{\text{п}}I_{\text{яN}}) / U_{3 \text{ max}}. \\ k_{\text{т}} &= K_{1}/(k_{\text{дв}}k_{\text{п}}). \end{aligned}$$

Коэффициент обратной связи по напряжению обмотки якоря найдем в первом приближении, положив отсутствие положительной обратной связи по току якоря и приняв значение  $\Delta U_{\text{п.3, \%}} = 0,5\Delta\Omega_{3, \%}$ .

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{п.3}} &= (\Delta U_{\text{п.3, \%}}/100)U_{\text{яN}}; \\ \Delta U_{\text{п.р}} &= I_{\text{яN}}R_{\text{п}}; \\ k_{\text{н}}k_{\text{п}} &= K_{2} = \Delta U_{\text{п.р}}/\Delta U_{\text{п.3}} - 1; \\ k_{\text{н}} &= K_{2}/k_{\text{п}}. \end{aligned}$$

Выполнить уточнение значений коэффициентов  $k_{\text{т}}$  и  $k_{\text{н}}$ . Изменяя величину коэффициента  $k_{\text{н}}$ , добиться требуемого равенства:

$$k_{\text{т}} = (R_{\text{я.ц}} + k_{\text{н}}k_{\text{п}}R_{\text{я}}) / k_{\text{п}}.$$

Используя рассчитанные значения коэффициентов, выполнить расчет скоростной характеристики ЭП с отрицательной обратной связью по напряжению и положительной обратной связью по току якоря.

$$\Omega_3 = \frac{1}{1 + k_n k_{\pi}} \left[ U_3 k_{\pi} k_{\text{дв}} - I_{\text{я}} R_{\text{я.ц}} k_{\text{дв}} \left( 1 + k_n k_{\pi} \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{я.ц}}} - k_{\text{т}} k_{\pi} / R_{\text{я.ц}} \right) \right] = \Omega_0 - \Delta \Omega_3$$

Напряжение  $U_3$  принять равным  $U_{3 \text{ max}}$ .  
 Результаты расчета свести в таблицу 26.

Таблица 26. Результаты расчета скоростных характеристик системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению и положительной обратной связи по току якоря

$I_{\text{я}}, \text{ A}$	0	$0,25 I_{\text{яN}}$	$0,5 I_{\text{яN}}$	$0,75 I_{\text{яN}}$	$I_{\text{яN}}$
$\Omega_{\text{раз}}, \text{ рад/с}$					
$\Omega_3, \text{ рад/с}$					

Скоростную характеристику системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению и положительной обратной связи по току якоря следует рассчитать для напряжения задания  $U_3$  равном  $U_{\text{яN}}$ .  
 Напряжение  $U_{\text{яN}}$  определим, используя приведенные выше расчетные соотношения:

$$U_{\text{яN}} = U_{3 \text{ max}} + U_{\text{остN}}; \quad U_{\text{остN}} = k_{\text{тN}} I_{\text{яN}}; \quad k_{\text{тN}} = K_{\text{1треб}} / (k_{\text{дв}} k_{\pi});$$

$$K_{\text{1треб}} = k_{\text{т}} k_{\pi} k_{\text{дв}} = \Delta \Omega_{\text{p}} / \Delta \Omega_3 - 1; \quad k_{\pi} = (E_{\text{пN}} - k_{\text{т}} k_{\pi} I_{\text{яN}}) / U_{3 \text{ max}}; \quad k_{\text{т}} k_{\pi} = K_{\text{1треб}} / k_{\text{дв}};$$

$$E_{\text{пN}} = U_{\text{яN}} + I_{\text{яN}} R_{\text{п}}. \quad k_{\text{дв}} = \frac{1}{k_{\text{е}}} = \frac{1}{C_{\text{е}} \Phi_{\text{н}}}. \quad k_{\text{е}} = \frac{U_{\text{яN}} - I_{\text{яN}} R_{\text{я}}}{\Omega_{\text{N}}}$$

Задавая значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{\text{яN}}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению и положительной обратной связи по току якоря  $\Omega_{\text{раз}} = f(I_{\text{я}})$ .

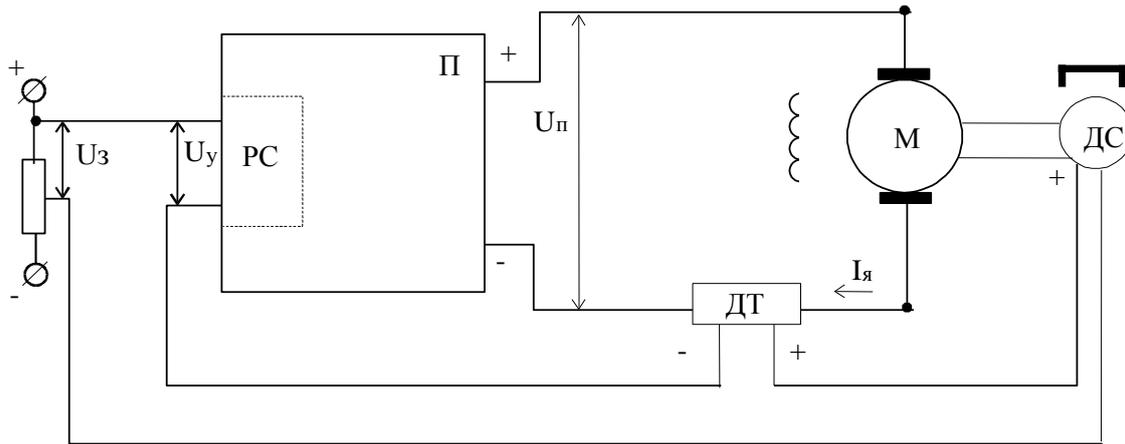
$$\Omega_{\text{раз}} = \frac{U_{\text{яN}} k_{\pi} - I_{\text{я}} (R_{\text{п}} + R_{\text{я}})}{k_{\text{е}}}$$

Результаты расчета свести в таблицу 26.

По результатам расчетов построить скоростные характеристики системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по напряжению и положительной обратной связи по току якоря

### 3.5. Тема практического занятия №18. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и положительной обратной связью по току якоря

Функциональная схема системы ЭП с отрицательной обратной связью по скорости и положительной обратной связью по току якоря приведена на рис. 3.6 [1].



**Рис. 3.6.** Функциональная схема электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и положительной обратной связью по току

Исходные уравнения:

$$U_y = U_z - U_{\text{осс}} + U_{\text{ост}}, \quad (3.26)$$

где  $U_z$  – сигнал задания;

$$U_{\text{осс}} = k_c \Omega - \text{сигнал обратной связи по скорости}; \quad (3.27)$$

$$U_{\text{ост}} = k_T I_{\text{я}} - \text{сигнал обратной связи по току}; \quad (3.28)$$

$$E_{\text{п}} = k_{\text{п}} U_y - \text{ЭДС преобразователя}. \quad (3.29)$$

$$E_{\text{пН}} = I_{\text{яН}} R_{\text{я.ц}} + \frac{\Omega_{\text{Н}}}{k_{\text{дв}}}. \quad (3.30)$$

$$R_{\text{я.ц}} = R_{\text{я}} + R_{\text{п}};$$

$k_c$  – коэффициент обратной связи по скорости.

$k_T$  – коэффициент обратной связи по току;

Решая систему, получим:

$$\Omega_3 = U_z k_{\text{п}} k_{\text{дв}} / (1 + k_c k_{\text{п}} k_{\text{дв}}) - I_{\text{я}} R_{\text{я.ц}} k_{\text{дв}} (1 - k_T k_{\text{п}} / R_{\text{я.ц}}) / (1 + k_c k_{\text{п}} k_{\text{дв}}) = \Omega_0 - \Delta \Omega_3, \quad (3.31)$$

где:  $\Omega_0 = U_z k_{\text{п}} k_{\text{дв}} / (1 + k_c k_{\text{п}} k_{\text{дв}})$ , а  $\Delta \Omega_3 = I_{\text{я}} R_{\text{я.ц}} k_{\text{дв}} (1 - k_T k_{\text{п}} / R_{\text{я.ц}}) / (1 + k_c k_{\text{п}} k_{\text{дв}})$ .

Эта система применяется при больших диапазонах регулирования  $D$ . Коэффициент  $k_c$  при этом выбирают максимально возможным, после чего находят требуемое значение коэффициента ОС по току:

$$k_{\text{т. треб}} = [S_{\text{хр}} D - S_{\text{хз}} (1 + K)] R_{\text{я.ц}} / (k_{\text{п}} S_{\text{хр}} D), \quad (3.32)$$

где  $S_{\text{хз}}$  – заданный статизм нижней скоростной характеристики;

$S_{\text{хр}}$  – статизм скоростной характеристики разомкнутой системы.

$$\text{Общий коэффициент системы } K = k_c k_{\text{п}} k_{\text{дв}}. \quad (3.33)$$

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 27, рассчитать требуемое значение коэффициента усиления преобразователя  $k_{\text{п}}$  и коэффициентов обратной связи по скорости  $k_c$  и по току якоря  $k_T$ . Построить

скоростные характеристики разомкнутой и замкнутой систем ЭП. Параметры двигателя приведены в Приложении.

Таблица 27. Варианты задач практического занятия №18 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ Я-06	ДПЦ Я-07	ДПЦ Я-1,0	ДПЦ Я-3,0
$R_{п}, \text{Ом}$	0,3	0,7	3,0	0,1	0,3	0,05	0,05	0,14	0,01
$U_{з \max}, \text{В}$	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_{з}, \%$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07

Продолжение таблицы 27

№ вар	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	ДСП Я-04	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ-21-1	МИ-21-2	МИ-21-3
$R_{п}, \text{Ом}$	0,11	0,07	0,10	0,03	0,30	0,4	0,3	0,6	1,0
$U_{з \max}, \text{В}$	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_{з}, \%$	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08

Продолжение таблицы 27

№ вар	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Тип ЭД	МИ-21-4	МИ-22-1	МИ-22-2	МИ-22-3	МИ-22-4	МИ-22-5	МИ-22-6	МИ-31-1	МИ-31-2
$R_{п}, \text{Ом}$	2,0	0,2	0,4	1,5	0,6	1,3	4,5	0,2	0,4
$U_{з \max}, \text{В}$	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0
$\Delta\Omega_{з}, \%$	0,09	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6

Продолжение таблицы 27

№ вар	28	29	30	31	32	33
Тип ЭД	МИ-31-3	МИ-31-4	МИ-31-5	МИ-31-6	МИ-12-1	МИ-12-3
$R_{п}, \text{Ом}$	1,1	0,6	1,0	4,0	0,2	0,7
$U_{з \max}, \text{В}$	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\Delta\Omega_{з}, \%$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2

*Основные расчетные*

*соотношения:*

Абсолютное значение перепада скорости замкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_{з} = (\Delta\Omega_{з, \%} / 100) \Omega_N;$$

Абсолютное значение перепада скорости разомкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_p = I_{яN} R_{я.ц} / k_c;$$

$$R_{я.ц} = R_я + R_п;$$

$$k_c = \frac{U_{яN} - I_{яN} R_я}{\Omega_N}.$$

$$k_{дв} = \frac{1}{k_c} = \frac{1}{C_e \Phi_H}.$$

Определим значение коэффициентов  $k_c$  и  $k_п$  при отсутствии обратной связи по току.

Для этого режима работы системы коэффициент усиления системы в целом  $K_1$  определяется по формуле:

$$K_1 = k_c k_п k_{дв} = \Delta\Omega_p / \Delta\Omega_3 - 1;$$

Откуда  $k_c k_п = K_1 / k_{дв}$ .

$$U_y k_п = (U_3 - U_{occ}) k_п = E_п;$$

$$U_{occ} = k_c \Omega;$$

Для номинального режима

$$U_{3\max} k_п - k_c k_п \Omega_N = E_N;$$

$$k_п = (E_N + k_c k_п \Omega_N) / U_{3\max};$$

или:

$$k_п = \left( E_{пN} + \frac{K \Omega_N}{k_{дв}} \right) / U_{3\max}.$$

$$k_c = K_1 / (k_п k_{дв}).$$

Величину коэффициента обратной связи по току  $k_T$  определим из условия отсутствия перепада скорости, т.е.  $\Delta\Omega_3 = 0$ . Поскольку для этой системы

$$\Delta\Omega_3 = I_я R_{я.ц} k_{дв} (1 - k_T k_п / R_{я.ц}) / (1 + k_c k_п k_{дв}),$$

то  $\Delta\Omega_3$  равно 0 при условии  $k_T k_п = R_{я.ц}$ . Таким образом коэффициент  $k_T = R_{я.ц} / k_п$ .

Используя полученные выше значения коэффициентов, рассчитать 2 скоростные характеристики ЭП с отрицательной обратной связью по скорости и положительной обратной связью по току якоря:

$$- \Omega_{31} = f(I_я) \text{ при условии } k_T = R_{я.ц} / k_п;$$

$$- \Omega_{32} = f(I_я) \text{ при условии } k_T = 0,8 R_{я.ц} / k_п.$$

$$\Omega_3 = U_3 k_п k_{дв} / (1 + k_c k_п k_{дв}) - I_я R_{я.ц} k_{дв} (1 - k_T k_п / R_{я.ц}) / (1 + k_c k_п k_{дв}) = \Omega_0 - \Delta\Omega_3$$

Напряжение  $U_3$  принять равным  $U_{3\max}$ .

Результаты расчета свести в таблицу 28.

Таблица 28. Результаты расчета скоростных характеристик системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по скорости и положительной обратной связи по току якоря

$I_{я}, A$	0	$0,25 I_{яN}$	$0,5 I_{яN}$	$0,75 I_{яN}$	$I_{яN}$
$\Omega_{раз}, рад/с$					
$\Omega_{з1}, рад/с$					
$\Omega_{з1}, рад/с$					

Скоростную характеристику системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по скорости и положительной обратной связи по току якоря следует рассчитать для напряжения задания  $U_3$  равном  $U_{yN}$ .

Напряжение  $U_{yN}$  определим, используя приведенные выше расчетные соотношения:

$$U_{yN} = U_{з\max} - U_{оосN} + U_{остN};$$

$$U_{оосN} = k_c \Omega_N; \quad U_{остN} = k_T I_{яN}.$$

$$K_1 = k_c k_{\pi} k_{дв} = \Delta\Omega_p / \Delta\Omega_3 - 1;$$

$$k_{\pi} = (E_N + k_c k_{\pi} \Omega_N) / U_{з.\max}; \quad k_c k_{\pi} = K_1 / k_{дв}; \quad k_c = K_1 / k_{\pi} k_{дв}; \quad k_T = R_{я.ц} / k_{\pi}.$$

Задаваясь значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по скорости и положительной обратной связи по току якоря  $\Omega_{раз} = f(I_{я})$ .

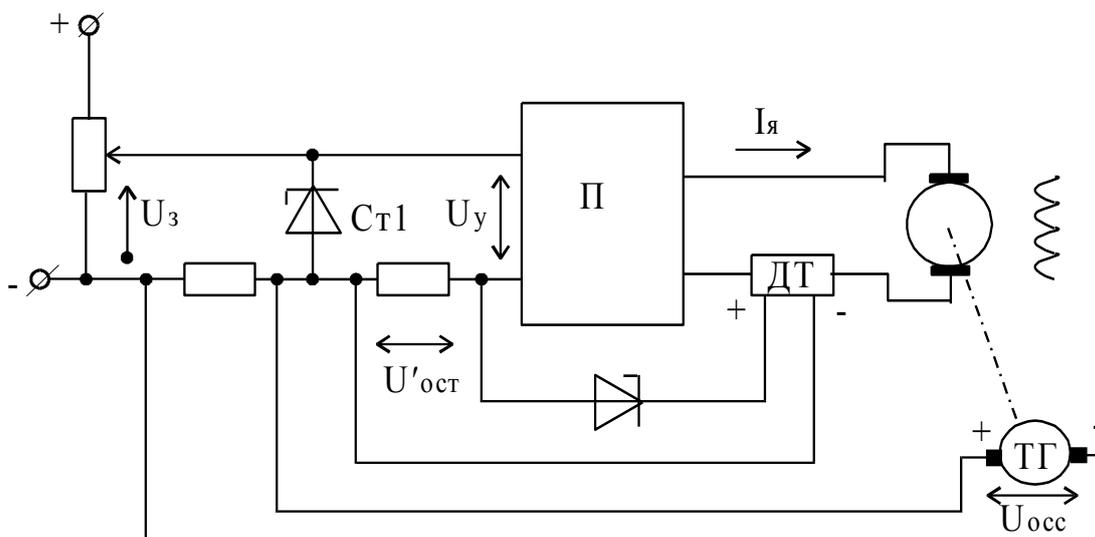
$$\Omega_{раз} = \frac{U_{yN} k_{\pi} - I_{я} (R_{\pi} + R_{я})}{k_c}.$$

Результаты расчета свести в таблицу 28.

По результатам расчетов построить скоростные характеристики системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по скорости и положительной обратной связи по току якоря.

### 3.6. Тема практического занятия №19. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и с отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой»

Функциональная схема системы ЭП постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и с отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой» приведена на рис. 3.7 [1].



**Рис.3.7.** Функциональная схема электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой»

Для ограничения перегрузок по моменту (току якоря) в системах управления ЭП необходимо осуществлять ограничение сигналов управления. Эти ограничения сигналов осуществляются различными способами: применением обратных связей с «отсечкой», шунтированием входа преобразователя (промежуточного усилителя) стабилитронами, использованием «насыщения» промежуточного усилителя.

«Отсечка» в обратной связи означает, что связь действует только при определенных значениях регулируемой величины [1].

В схеме, приведенной на рис.3.7, реализуются две отсечки - по скорости и по току якоря.

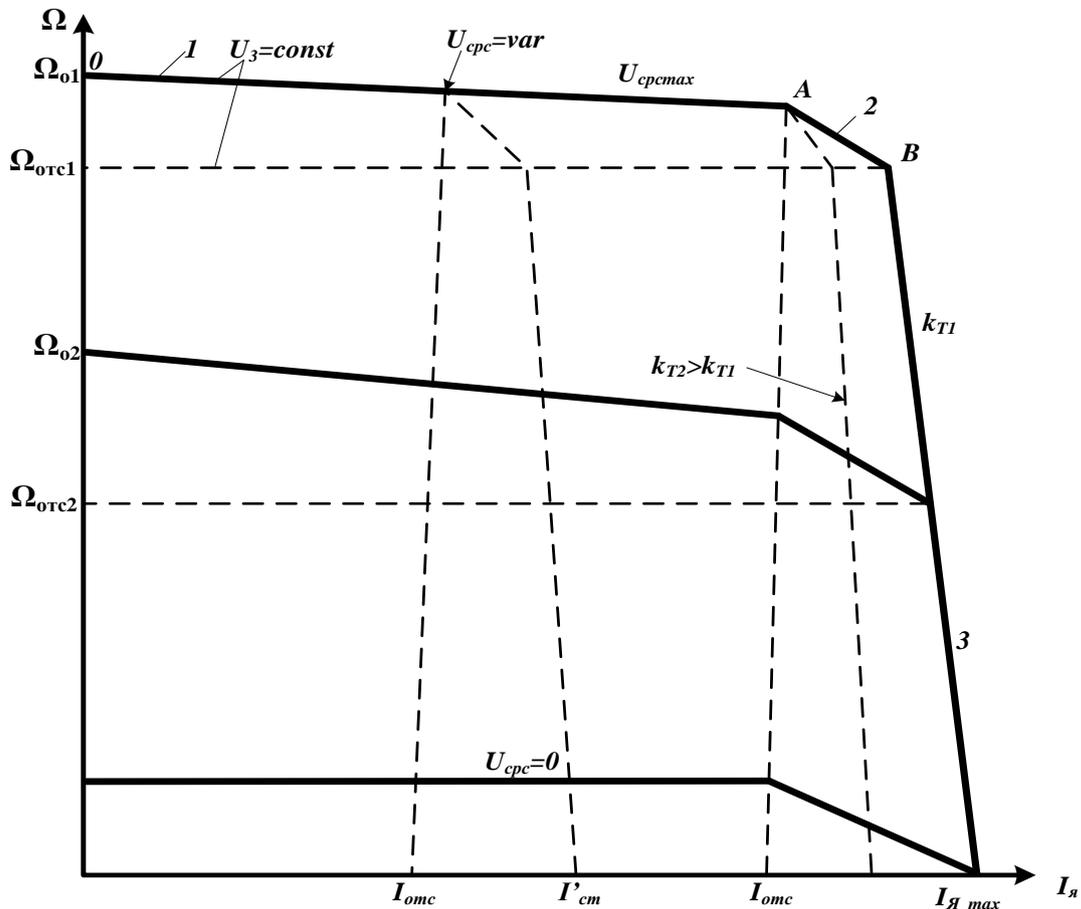
В системе электропривода постоянного тока с отсечками по скорости и по току якоря можно сформировать «экскаваторные» статические скоростные характеристики, приведенные на рис. 3.8.

Рассмотрим систему ЭП постоянного тока с непрерывной отрицательной обратной связью по скорости и отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой» [1].

В системе введено ограничение разности сигналов  $U_3 - U_{occ}$  благодаря наличию стабилитрона Ст1, напряжение пробоя которого равно  $U_{ст1}$ . Напряжение сравнения токовой отсечки равно напряжению пробоя  $U_{ст2}$  стабилитрона Ст2. Такую схему обычно применяют, когда преобразователь П–тиристорный управляемый выпрямитель. Уровень ограничения сигнала  $(U_3 - U_{occ})_{max} = U_{ст1}$  соответствует максимальному значению ЭДС преобразователя  $E_{п max.}$ , а значит и максимальному значению скорости вращения ЭП.

Статическая скоростная характеристика этой системы ЭП имеет три участка (рис. 3.8). На участке 1 действует обратная связь по скорости и разность сигналов  $U_3 - U_{\text{осс}} < U_{\text{ст1}}$ , токовая связь не действует, т.к.  $U_{\text{ост}} < U_{\text{ст2}}$ , а сигнал управления на входе преобразователя  $U_y = U_3 - U_{\text{осс}}$ . На участке 2 действуют обе обратные связи, т.к. на этом участке  $U_{\text{ост}} > U_{\text{ст2}}$  и в цепь управления вводится сигнал  $U'_{\text{ост}} = U_{\text{ост}} - U_{\text{ст2}}$ , но сигнал  $U_y = U_3 - U_{\text{осс}} - U'_{\text{ост}}$  остается пока меньше напряжения  $U_{\text{ст1}}$ . Наконец, на стыке участков 2 и 3 величина  $U_3 - U_{\text{осс}}$  становится равной  $U_{\text{ст1}}$  и далее при возрастании тока результирующий сигнал управления на входе преобразователя  $U_y = U_{\text{ст1}} - U'_{\text{ост}}$  будет уменьшаться, а значит и скорость вращения будет уменьшаться. На участке 3 отрицательная обратная связь по скорости не действует.

В рассматриваемой системе задается скорость  $\Omega_0$  величиной  $U_3$ , а скорость отсечки  $\Omega_{\text{отс}}$  является функцией  $I_{\text{отс}}$ ,  $k_T$  и  $k_c$ . Поэтому регулировочные характеристики в этой системе получаются путем изменения  $U_3$  при постоянно значении  $U_{\text{ст1}}$  (см.рис.3.8).



**Рис. 3.8.** Скоростные характеристика системы с отдельными отсечками по току и скорости

Опуская вывод, запишем обобщенное уравнение статической скоростной характеристики с непрерывной отрицательной обратной связью по скорости и отрицательной обратной связью по току с «отсечкой» (3.33). В системе действует непрерывная отрицательная обратная связь по скорости с

коэффициентом  $k_c$ . Отрицательная связь по току с отсечкой имеет коэффициент, обозначенный здесь  $k_{то}$ , а напряжение сравнения токовой «отсечки»  $U_{ср.т} = U_{ст2}$ .

Уравнение скоростной характеристики замкнутой по скорости и по току с «отсечкой» системы  $\Omega = f(I_я)$  имеет вид:

$$\Omega = \frac{k_{дв} k_{п} (U_3 + k_{то} I_{отс})}{1 + k_{п} k_c k_{дв}} - I_я R_{я.ц} k_{дв} \frac{1 + \frac{k_{п}}{R_{я.ц}} k_{то}}{1 + k_{п} k_c k_{дв}}. \quad (3.33)$$

Здесь  $k_c, k_{то}$  – коэффициенты ОС по скорости и току якоря с «отсечкой»;  $I_{отс} = U_{ст2}/k_{то}$  – ток отсечки.

Считаем, что преобразователь имеет линейную характеристику  $E_{п} = f(U_у)$ .

В (3.33) коэффициент отсутствующей непрерывной связи приравнивается нулю. Для первого участка статической характеристики  $\Omega = f(I_я)$  в (3.33) нужно положить  $k_{то}=0$ , для второго участка учитывают коэффициенты всех действующих в системе связей. Для третьего участка в (3.33) остается только коэффициент  $k_{то}$ , а  $U_3 = U_{ст1}$ . Очевидно, что при значениях задающего сигнала  $U_3 = U_{ст1}$  третий участок будет продолжением второго участка.

Задающее напряжение по заданной скорости  $\Omega_0$  при известных значениях коэффициентов  $k_c, k_{дв}, k_{п}$  определяется как:

$$U_3 = \frac{\Omega_0}{k_{дв} k_{п}} [1 + k_{п} k_c k_{дв}], \quad (3.34)$$

**Задание.** Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 29, рассчитать требуемое значение коэффициента усиления преобразователя  $k_{п}$ , коэффициентов обратной связи по скорости  $k_c$  и коэффициент обратной связи по току якоря с «отсечкой»  $k_{то}$ . Построить скоростные характеристики разомкнутой и замкнутой систем ЭП с отсечками по скорости и току. Параметры двигателя приведены в Приложении.

Таблица 29. Варианты задач практического занятия №19 и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ЭД	ДИ-12-1	ДИ-12-2	ДИ-12-3	ДИ-13-1	ДИ-13-2	ДПЦ-Я-06	ДПЦ-Я-07	ДПЦ-Я-1,0	ДПЦ-Я-3,0
$R_{п}, \text{Ом}$	0,3	0,7	3,0	0,1	0,30	0,05	0,05	0,14	0,01
$U_{3\text{max}}, \text{В}$	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_3, \%$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07
$U_{ст2}, \text{В}$	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	1,8
$I_{отс}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$

Продолжение таблицы 29

№ вар	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Тип ЭД	ДСП Я-04	ДСП Я-06	ДСП Я-08	ДСП Я-1,5	ДМП Я-0,37	ДМП Я-0,62	МИ- 21-1	МИ- 21-2	МИ- 21-3
$R_{п}, \text{ Ом}$	0,11	0,07	0,10	0,03	0,30	0,4	0,3	0,6	1,0
$U_{з\text{max}}, \text{ В}$	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0	5,0
$\Delta\Omega_{3, \%}$	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
$U_{ст2}, \text{ В}$	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
$I_{отс}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$

Продолжение таблицы 29

№ вар	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Тип ЭД	МИ- 21-4	МИ- 22-1	МИ- 22-2	МИ- 22-3	МИ- 22-4	МИ- 22-5	МИ- 22-6	МИ- 31-1	МИ- 31-2
$R_{п}, \text{ Ом}$	2,0	0,2	0,4	1,5	0,6	1,3	4,5	0,2	0,4
$U_{з\text{max}}, \text{ В}$	5,0	10,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	5,0
$\Delta\Omega_{3, \%}$	0,09	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$U_{ст2}, \text{ В}$	2,9	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3
$I_{отс}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$

Продолжение таблицы 29

№ вар	28	29	30	31	32	33
Тип ЭД	МИ- 31-3	МИ- 31-4	МИ- 31-5	МИ- 31-6	МИ- 12-1	МИ- 12-3
$R_{п}, \text{ Ом}$	1,1	0,6	1,0	4,0	0,2	0,7
$U_{з\text{max}}, \text{ В}$	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0	10,0
$\Delta\Omega_{3, \%}$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
$U_{ст2}, \text{ В}$	2,2	2,1	2,0	2,9	2,8	2,6
$I_{отс}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$	$1,2I_{яN}$	$1,1I_{яN}$

*Основные расчетные соотношения:*

Абсолютное значение перепада скорости замкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_{3} = (\Delta\Omega_{3, \%} / 100) \Omega_{N};$$

Абсолютное значение перепада скорости разомкнутой системы при номинальной нагрузке ЭП:

$$\Delta\Omega_{р} = I_{яN} R_{я.ц} / k_{е};$$

$$R_{я.ц} = R_{я} + R_{п};$$

$$k_c = \frac{U_{яN} - I_{яN} R_{я}}{\Omega_N}$$

$$k_{дв} = \frac{1}{k_c} = \frac{1}{C_e \Phi_H}$$

Коэффициенты  $K$ ,  $k_{п}$ ,  $k_c$  следует определить для режима работы ЭП на участке 1 электрохимической характеристики, т.е. на участке изменения тока якоря в пределах  $0 < I_{я} < I_{отс}$ , на котором действует только обратная связь по скорости. Коэффициент усиления системы в целом  $K$ :

$$K = k_c k_{п} k_{дв} = \Delta \Omega_p / \Delta \Omega_3 - 1.$$

Откуда  $k_c k_{п} = K / k_{дв}$ .

Определим значения  $k_c$  и  $k_{п}$ .

$$U_y k_{п} = (U_3 - U_{осс}) k_{п} = E_{п};$$

$$U_{осс} = k_c \Omega;$$

Для номинального режима

$$U_{3 \max} k_{п} - k_c k_{п} \Omega_N = E_{пN};$$

$$k_{п} = (E_{пN} + k_c k_{п} \Omega_N) / U_{3 \max};$$

$$k_{п} = \left( E_{пN} + \frac{K \Omega_N}{k_{дв}} \right) / U_{3 \max}.$$

$$E_{пN} = U_{яN} + I_{яN} R_{п}$$

$$k_c = K / k_{п} k_{дв}.$$

Коэффициент передачи обратной связи по току с «отсечкой»

$$k_{то} = U_{ст2} / I_{отс}.$$

Расчет требуемого напряжения стабилизации стабилизатора Ст1.

$$k_{п} U_{ст1} = E_{п \max} = U_{яN} + I_{яN} R_{я}.$$

$$U_{ст1} = (U_{яN} + I_{яN} R_{я}) / k_{п}.$$

Построение скоростной характеристики на участке 1 ( $0 < I_{я} < I_{отс}$ ) выполняется по формуле

$$\Omega_3 = \frac{k_{дв} k_{п} U_3}{1 + k_{п} k_c k_{дв}} - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} \frac{1}{1 + k_{п} k_c k_{дв}}. \quad (3.35)$$

Построение скоростной характеристики на участке 2 (при  $I_{отс} < I_{я} < 1,1 I_{отс}$ ) выполняется по формуле

$$\begin{aligned}
\Omega &= \frac{k_{дв} k_{п} (U_{ст1} + k_{то} I_{отс})}{1 + k_{п} k_{с} k_{дв}} - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} \frac{1 + \frac{k_{п}}{R_{я.ц}} k_{то}}{1 + k_{п} k_{с} k_{дв}} = \\
&= \frac{1}{1 + k_{п} k_{с} k_{дв}} (k_{дв} k_{п} U_{ст1} + k_{дв} k_{п} k_{то} I_{отс} - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} - I_{я} k_{дв} k_{п} k_{то}) = \\
&= \frac{1}{1 + k_{п} k_{с} k_{дв}} [k_{дв} k_{п} U_{ст1} - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} - (I_{я} - I_{отс}) k_{дв} k_{п} k_{то}].
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Построение скоростной характеристики на участке 3 выполняется по формуле

$$\Omega = k_{дв} k_{п} (U_{ст1} + k_{то} I_{отс}) - I_{я} R_{я.ц} k_{дв} \left( 1 + \frac{k_{п}}{R_{я.ц}} k_{то} \right). \tag{3.37}$$

Напряжение  $U_3$  принять равным  $U_{3\max}$ .

Результаты расчета свести в таблицу 30.

Таблица 30. Результаты расчета скоростных характеристик системы ЭП с отрицательной обратной связью по скорости и с отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой»

$I_{я}, A$	0	$0,5 I_{яN}$	$0,75 I_{яN}$	$I_{яN}$	$I_{отс}$	$1,1 I_{отс}$
$\Omega_{раз}, рад/с$						
$\Omega_3, рад/с$						

Скоростную характеристику системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по скорости и отрицательной обратной связи по току якоря с «отсечкой» следует рассчитать для напряжения задания  $U_3$  равном  $U_{yN}$ .

Напряжение  $U_{yN}$  определим, используя приведенные выше расчетные соотношения:

$$U_{yN} = U_{3\max} - U_{оосN};$$

$$U_{оосN} = k_c \Omega_N;$$

$$K_1 = k_c k_{п} k_{дв} = \Delta\Omega_p / \Delta\Omega_3 - 1;$$

$$k_{п} = (E_N + k_c k_{п} \Omega_N) / U_{3,\max}; \quad k_c k_{п} = K_1 / k_{дв}; \quad k_c = K_1 / k_{п} k_{дв};$$

Задаваясь значениями тока обмотки якоря в пределах от 0 до  $I_{яN}$ , выполнить расчет скоростной характеристики системы ЭП при отсутствии отрицательной обратной связи по скорости и отрицательной обратной связи по току якоря с «отсечкой»  $\Omega_{раз} = f(I_{я})$ .

$$\Omega_{\text{раз}} = \frac{U_{yN} k_{\Pi} - I_{\text{я}} (R_{\Pi} + R_{\text{я}})}{k_{\text{е}}}$$

Результаты расчета свести в таблицу 30.

По результатам расчетов построить скоростные характеристики системы ЭП при наличии и отсутствии отрицательной обратной связи по скорости и отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой».

.

**4. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДВИГАТЕЛЯМ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

4.1. Справочные данные по электрическим двигателям постоянного тока

Таблица 31. Двигатели серий СЛ, МИ, ДИ, ДВИ, ДПЦЯ, ДСПЯ, ДДЯ, ПЯ, ДПУ

Тип ЭД	$P_{дN}$ , Вт	$n_N$ , об/мин	$U_{яN}$ , В	$I_{яN}$ , А	$R_{я}$ , Ом	$L_{я}$ , мГн	$J_{д} \cdot 10^{-6}$ кгм <sup>2</sup>
СЛ-121	5,0	4800	110	0,21	130	–	-
СЛ-221	13	3700	110	0,35	117	230	-14
СЛ-261	24	3600	110	0,5	51	140	20
СЛ-281	26	5200	24	2,4	1,15	0,5	20
СЛ-321	38	3000	110	0,7	25,8	130	60
СЛ-361	50	3000	110	0,85	20,5	115	70
СЛ-521	77	3000	110	1,2	8,5	58	170
СЛ-569	175	3400	110	2,2	3,6	30	270
СЛ-621	172	2400	110	2,3	3,0	35	675
СЛ-661	230	2400	110	2,9	1,75	25	935
Двигатели серии МИ							
МИ-11-1	120	3000	60	2,86	0,46	–	1500
МИ-11-2	100	2000	60	2,27	0,94	–	1500
МИ-11-3	120	3000	110	1,53	1,48	–	1500
МИ-11-4	100	2000	110	1,22	3,6	–	1500
МИ-12-1	200	3000	60	4,57	0,23	–	2000
МИ-12-2	120	2000	60	2,72	0,52	–	2000
МИ-12-3	200	3000	110	2,46	0,765	–	2000
МИ-12-4	120	2000	110	1,46	1,74	–	2000
МИ-21-1	250	3000	60	5,6	0,284	–	3500
МИ-21-2	200	2000	60	4,3	0,645	–	3500
МИ-21-3	250	3000	110	3,05	0,945	–	3500
МИ-21-4	200	2000	110	2,33	2,2	–	3500
МИ-22-1	370	3000	60	8,2	0,195	–	4000
МИ-22-2	250	2000	60	5,5	0,36	–	4000
МИ-22-3	120	1000	60	2,6	1,44	–	4000
МИ-22-4	370	3000	110	4,4	0,546	–	4000
МИ-22-5	250	2000	110	2,9	1,29	–	4000
МИ-22-6	120	1000	110	1,4	4,58	–	4000
МИ-31-1	450	3000	60	10,3	0,204	–	9000

МИ-31-2	370	2000	60	8,2	0,406	–	9000
МИ-31-3	200	1000	60	4,4	1,32	–	9000
МИ-31-4	450	3000	110	5,6	0,585	–	9000
МИ-31-5	370	2000	110	4,4	1,16	–	9000
МИ-31-6	200	1000	110	2,4	3,96	–	9000

Двигатели серии ДИ							
Тип ЭД	$P_{дН}$ , Вт	$n_N$ , об/мин	$U_{яN}$ , В	$I_{яN}$ , А	$R_{я}$ , Ом	$L_{я}$ , мГн	$J_{д} \cdot 10^{-6}$ кгм <sup>2</sup>
ДИ-12-1	1200	6000	110	13,6	0,29	–	1800
ДИ-12-2	800	4000	110	9,05	0,67	–	1800
ДИ-12-3	400	2000	110	4,75	3,0	–	1800
ДИ-13-1	2400	6000	110	25	0,11	–	3000
ДИ-13-2	1600	4000	110	16,6	0,252	–	3000
Малоинерционные ЭД с дисковыми и цилиндрическими якорями							
ДПЦЯ- 0,6	600	3000	23	40	0,06	–	360
ДПЦЯ-0,7	700	3100	20	45	0,06	–	560
ДПЦЯ – 1,0	970	3000	40	29,3	0,149	–	400
ДПЦЯ- 1,5	1500	4900	110	16,5	–	–	360
ДПЦЯ- 3,0	2900	3000	22	190	0,007	–	2600
ДПЦЯ- 5,0	5000	2800	220	29	–	–	10500
ДСПЯ- 0,4	4000	3000	27	24	0,12	–	150
ДСПЯ- 0,6	600	3000	27	40	0,08	–	210
ДСПЯ- 0,8	800	3000	26	44	0,1	–	300
ДСПЯ- 1,5	1500	4000	23	95	0,03	–	470
ДМПЯ-0,37	370	3000	35	13,6	0,32	–	320
ДМПЯ-0,62	620	3000	39	22	0,32	–	620
ДДЯ-500	500	3000	110	–	–	–	1270
ДДЯ-900	900	3000	127	–	–	–	1270
ПЯ-50	50	3000	12	7,5	–	–	17
ПЯ-125	125	3000	24	7,3	–	–	70
ПЯ-250	250	3000	36	9,6	–	–	290
ПЯ-500	500	3000	48	13,8	–	–	770
Мо4500	4300	3000	220	21	0,45	–	9000
Мо1000	1120	3000	100	13	0,44	–	2440
ДПУ160-180-3	180	3000	36	7,0	0,5	–	217
ДПУ200-550-3	550	3000	140	5,5	2,2	–	884
ДПУ240-1100-3	1100	3000	122	11	0,53	–	1880

Двигатели серии ДВИ. Номинальное напряжение возбуждения 27 В							
ДВИ-111-02	40	6000	27	2,6	3,8	–	7
ДВИ-121-02	60	6000	27	3,6	2,5	–	12
ДВИ-211-02	120	6000	27	7,4	1,3	–	23
ДВИ-221-02	180	6000	27	10,8	0,8	–	32
ДВИ-311-02	250	6000	27	14,2	0,6	–	45
ДВИ-321-02	370	6000	27	20,5	0,4	–	66

Двигатели серии МИГ							
Тип ЭД	$P_{дN}$ , Вт	$n_N$ , об/мин	$U_{яN}$ , В	$I_{яN}$ , А	$R_{я}$ , Ом	$L_{я}$ , мГн	$J_{д} \cdot 10^{-6}$ кгм <sup>2</sup>
МИГ-10 Б	10	6000	12	1,4	2,5	–	0,25
МИГ-25 Б	25	6000	12	3,2	0,9	–	0,68
МИГ-60 Б	60	6000	27	3,0	1,5	–	3,6
МИГ-90 Б	90	6000	27	4,1	0,7	–	7,9
МИГ-40 ДТ	40	6000	27	2,73	2,2	–	2,9
МИГ-90 ДТ	90	6000	27	4,6	0,73	–	11,0
МИГ-180 ДТ	180	6000	27	9,2	0,33	–	17,0
МИГ-370 ДТ	370	6000	27	17,0	0,12	–	48,0
МИГ-550 ДТ	550	6000	110	6,2	1,2	–	145,0

Таблица 32. Двигатели серии ДПР

Возбуждение от постоянных магнитов							
Тип ЭД	$P_{дN}$ , Вт	$n_N$ , об/мин	$U_{яN}$ , В	$I_{яN}$ , А	$R_{я}$ , Ом	$L_{я}$ , мГн	$J_{д} \cdot 10^{-6}$ кгм <sup>2</sup>
ДПР-32НІ-01	1,9	9000	27	0,14	37	–	0,2
ДПР-42НІ-01	4,7	9000	27	0,29	13	–	0,57
ДПР-52НІ-01	9,4	9000	27	0,53	3,6	–	1,7
ДПР-62НІ-01	12,6	9000	27	1,0	2,0	–	3,6
ДПР-72НІ-01	18,8	4500	27	1,0	2,9	–	7,8
ДПР-82НІ-01	25,1	6000	27	1,35	1,7	–	7,8

Таблица 33. Высокмоментные двигатели

Возбуждение от постоянных магнитов							
Тип ЭД	$M_{дN}$ , Нм	$n_N$ , об/мин	$U_{яN}$ , В	$I_{яN}$ , А	$R_{я}$ , Ом	$L_{я}$ , мГн	$J_{д} \cdot 10^{-4}$ кгм <sup>2</sup>
ПБВ100 М	7,16	1000	52	18	0,222	1,18	100
ПБВ100	10,5	1000	56	24	0,139	0,8	130
ПБВ112	14	750	44	31,5	0,109	0,732	350
ПБВ112М	17,3	600	47	29	0,123	0,898	420
ПБВ132	47,7	600	70	50	0,070	0,554	2380
ПБВ132М	35	600	53	50	0,057	0,422	1880
ПБВ160М	76,4	500	66	78,5	0,031	0,337	2420
ПБВ160	105	500	78,5	90	0,034	0,405	2280
ДК1-1,7	11,9	1000	36	8	0,75	—	16
ДК1-2,3	16,1	1000	48	7,5	0,95	—	20,5
ДК1-5,2	36,4	1000	110	6,5	2,1	—	35

## 4.2. Справочные данные по электрическим двигателям переменного тока

Таблица 34. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

Тип ЭД	$P_N$ , кВт	При номинальной нагрузке			$M_K/M_N$	$M_{пуск}/M_N$	$I_{пуск}/I_N$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
		$n_N$ , об/мин	$\eta_N$ , %	$\cos\varphi_N$				
Синхронная скорость вращения 750 об/мин								
4А71В6У3	0,25	680	56	0,65	1,7	1,6	3,0	$18,5 \cdot 10^{-4}$
4А80BSУ3	0,55	700	64	0,65	1,7	1,6	3,5	$33,8 \cdot 10^{-4}$
4А90LD8У3	1,1	700	70	0,68	1,9	1,6	3,5	$86,3 \cdot 10^{-4}$
4А112МА8У3	2,2	700	76,5	0,71	2,2	1,9	5,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4А132S8У3	4,0	720	83,0	0,70	2,6	1,9	5,5	$4,25 \cdot 10^{-2}$
4А160S8У3	7,5	730	86,0	0,75	2,2	1,4	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4А186М8У3	15,0	730	87,0	0,82	2,2	1,2	6,0	$25 \cdot 10^{-2}$
4А225М8У3	30,0	735	90,0	0,81	2,1	1,3	6,0	$73,8 \cdot 10^{-2}$
4А25М8У3	45,0	740	91,0	0,81	2,0	1,2	6,0	1,36
4А315S8У3	90,0	740	93,0	0,85	2,3	1,2	6,3	4,93
4А355М8У3	160,0	740	93,5	0,85	2,2	1,2	6,5	10,2
Синхронная скорость вращения 600 об/мин								
4А250S10У3	30,0	500	88,0	0,81	1,0	1,2	6,0	1,36
4А280М10У3	45,0	500	91,5	0,78	1,8	1,0	6,0	3,78
4А355М10У3	110	500	93,0	0,83	1,8	1,0	6,0	10,0
Синхронная скорость вращения 500 об/мин								

4A315S12Y3	45,0	490	90,5	0,75	1,8	1,0	6,0	5,25
4A315M12Y3	55,0	490	91,0	0,75	1,8	1,0	6,0	6,18
4A355S12Y3	75,0	490	91,5	0,76	1,8	1,0	6,0	9,33
4A355M12Y3	90,0	92,0	0,76	0,76	1,8	1,0	6,0	10,0
	$P_N$ , кВт	$n_N$ , об/мин	$I_{\phi N}$ , А	$\cos\varphi_N$	$m_k$	$M_{\text{пус}}/$ $M_N$	$I_{\text{пуск}}/$ $I_N$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
МТК011-6	1,4	870	4,8	0,69	2,8	2,8	3,0	0,02
МТК012-6	2,2	875	7,2	0,7	2,8	2,8	3,1	0,0275
МТК111-6	3,5	870	10,1	0,74	2,8	2,8	3,5	0,0462
МТК112-6	5,0	890	13,5	0,75	3,0	3,0	3,9	0,065
МТК211-6	7,5	905	18,4	0,79	2,9	2,8	4,3	0,11
МТКВ311-6	11,0	910	26,0	0,8	3,1	2,8	4,9	0,212
МТКВ311-8	7,5	680	20	0,74	3,1	2,9	4,4	0,262
МТКВ312-6	16	905	37,8	0,79	3,1	2,8	4,9	0,3
МТКВ312-8	11	690	30,4	0,71	3,3	3,1	4,9	0,0375
МТКВ411-6	7,5	935	50	0,78	3,0	2,8	5,2	0,475
МТКВ411-8	16	695	41	0,73	3,3	3,0	4,8	0,512
МТКВ412-6	11	945	62	0,81	3,3	2,8	5,6	0,637

Таблица 35. Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором

Тип	$P_N$ , кВт	$n_N$ , об/мин	$\eta_N$ , %	$I_{\phi.1N}$ , А	$I_{\phi.2 N}$ , А	$M_k$ , Нм	$m_k$	$J_p$ , кгм <sup>2</sup>	$\cos\varphi_N$
МТН011-6	1,4	870	65	4,9	8,8	41,83	2,60	0,021	0,76
МТН012-6	2,2	892	70	6,9	11	66,6	2,70	0,026	0,79
МТН111-6	3,5	905	75,5	8,9	14,2	106,3	2,75	0,042	0,79
МТН112-6	5,0	910	80	12,8	15,5	173	3,14	0,056	0,77
МТН211-6	7,5	922	82	19,0	19,2	252	3,09	0,082	0,80
МТН311-6	11	948	83	25,4	41	324,9	2,80	0,304	0,81
МТН312-6	15	964	84	34,7	46	482,3	3,10	0,374	0,79
МТН311-8	7,5	703	78,5	21	21	298,7	2,80	0,302	0,75
МТН312-8	11	720	81,3	29,6	43	458,3	3,00	0,380	0,77
МТН411-6	24	960	86	51	59	641,6	2,80	0,520	0,87
МТН412-6	30	970	87	66	72	866	2,80	0,630	0,84
МТН411-8	15	717	83	40	48	669,4	3,20	0,520	0,81

MTH412-8	22	725	83	58	58	910,3	3,00	0,630	0,77
MTF011-6	1,2	800	55	7,1	16,5	39	2,60	0,021	0,78
MTF012-6	1,7	785	58	10,4	18,5	59	2,72	0,028	0,78
MTF111-6	2,8	860	58	10,4	18,5	88	2,70	0,048	0,78
MTF112-6	4,0	895	72	17,5	21,8	137	3,06	0,067	0,78
MTF211-6	6,0	895	74	27,5	30,0	191	2,85	0,115	0,78
MTF311-6	9,0	925	75	37	56	314	3,22	0,200	0,76
MTF312-6	12	945	81,5	47,2	61	471	3,70	0,312	0,77
MTF411-6	18	945	82	69,5	86	638	3,35	0,500	0,8
MTF412-6	25	960	84	94	100	932	3,58	0,675	0,77
MTF311-8	6	665	71	29	32	265	2,94	0,275	0,78
MTF312-8	8,2	680	75	41	62	422	3,50	0,387	0,73
MTF411-8	13	685	78	56	76	569	3,00	0,537	0,76

## Библиографический список

1. Мартынов А.А. Электрический привод. ГУАП. СПб. 2015. 523с.
2. Мартынов А.А. Основы проектирования электрических приводов. ГУАП. СПб. 2015. 154с

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА	7
1.1. Краткие теоретические сведения по основам электропривода постоянного тока	7
1.2. Режимы торможения, холостого хода и короткого замыкания двигателя постоянного тока независимого возбуждения	9
1.3. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи якоря	14
1.4. Расчет регулировочных резисторов в цепи обмотки якоря	16
1.5. Регулирование тока и момента при пуске, торможении и реверсе	18
1.6. Расчет резисторов пускового реостата при пуске в несколько ступеней	20
1.7. Расчетные схемы механической части электропривода.	22
1.8. Неустановившееся движение электропривода при постоянном динамическом моменте	26
1.9. Неустановившееся движение при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа	28
1.10. Характеристики ЭП постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем в цепи обмотки якоря	31
1.11. Характеристики ЭП постоянного тока с реверсивным широтно-импульсным преобразователем в цепи обмотки якоря	34
1.12. Практического занятия №1. Расчет времени переходного процесса $t_{п.п}$ при увеличении скорости вращения двигателя постоянного тока от $\Omega_{нач}$ до $\Omega_{кон}$ при заданных параметрах двигателя постоянного тока	37
1.13. Тема практического занятия №2. Расчет времени переходного процесса $t_{п.п}$ при снижении скорости вращения в $N$ раз при заданных параметрах двигателя постоянного тока	39
1.14. Тема практического занятия №3. Расчет параметров электропривода постоянного тока при заданных параметрах двигателя постоянного тока	41
1.15. Тема практического занятия №4. Расчет и построение кривых переходного процесса $\Omega(t)$ и $M(t)$ при линейной механической характеристике двигателя	43
1.16. Тема практического занятия №5. Расчет естественной и искусственных механических характеристик ЭП постоянного тока при реостатном способе регулирования скорости вращения	45
1.17. Тема практического занятия №6. Расчет добавочный сопротивлений цепи обмотки якоря при динамическом, рекуперативном торможении и торможении противовключением	47
1.18. Тема практического занятия №7. Приведение момента инерции и статического момента сопротивления	

грузоподъемного механизма к валу электродвигателя	49
1.19. Тема практического занятия №8. Приведение момента инерции и статического момента сопротивления тележки мостового крана к валу электродвигателя	51
1.20. Тема практического занятия №9. Расчет параметров реостатного пуска двигателя постоянного тока	53
1.21. Тема практического занятия №10. Расчет искусственных электромеханических характеристик ЭП постоянного тока с реверсивным тиристорным преобразователем в цепи обмотки якоря	55
1.22. Тема практического занятия №11. Расчет искусственных электромеханических характеристик ЭП ПТ с реверсивным широтно-импульсным преобразователем в цепи обмотки якоря	57
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	59
2.1. Краткие сведения по основам асинхронного электропривода	59
2.2. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением напряжения обмотки статора	63
2.3. Тема практического занятия №12. Расчет естественной и искусственных механических характеристик асинхронного двигателя	65
2.4. Тема практического занятия №13. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя	68
3. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА	73
3.1. Тема практического занятия №14. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению обмотки якоря	73
3.2. Тема практического занятия №15. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости	78
3.3. Тема практического занятия №16. Расчет параметров электропривода с положительной обратной связью по току якоря двигателя	82
3.4. Тема практического занятия №17. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению и положительной обратной связью по току якоря	86
3.5. Тема практического занятия №18. Расчет параметров электропривода с отрицательной обратной связью по скорости и положительной обратной связью по току якоря	90
3.6. Тема практического занятия №19. Расчет параметров электропривода постоянного тока с отрицательной обратной связью по скорости и с отрицательной обратной связью по току якоря с «отсечкой»	94

4. Приложение. Справочные данные по электрическим двигателям постоянного и переменного тока	101
4.1. Справочные данные по электрическим двигателям постоянного тока	101
4.2. Справочные данные по электрическим двигателям переменного тока	104
Библиографический список	107