

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
**Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологи-
ческих комплексов»**

Б.И.Фираго

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**к курсовому проектированию по теории электропривода
для студентов специальности 1-53 01 05 – «Автоматизированные
электроприводы»**

Минск - 2004

Фираго Б.И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода для студентов специальности 1-53 01 05. – Мн.: БНТУ, 2004. - 88 с.

Данное полностью переработанное и дополненное пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения при выполнении курсового проекта по дисциплине «Теория электропривода». В нем отражены требования к курсовому проектированию и рассмотрено содержание разделов курсового проекта, а также показано, как рассчитывают нагрузочные диаграммы механизмов и электроприводов, по которым предварительно выбирают мощность электродвигателя и параметры передаточного механизма. Даны рекомендации по расчету статических механических и электромеханических характеристик для типовых систем электроприводов.

Приводятся методики расчета переходных процессов и энергетики для регулируемых и нерегулируемых электроприводов, проверки выбранного электродвигателя по нагреву перегрузочной способности, выбора преобразователя напряжения или частоты.

В приложении даны технические данные и параметры наиболее распространенных типов электродвигателей, редукторов, управляемых преобразователей напряжения постоянного тока и преобразователей частоты, которые применяются в настоящее время.

1. Общие сведения

Курс «Теория электропривода» является одной из профилирующих дисциплин специальности 1-53 01 05 – «Автоматизированные электроприводы» и предусматривает, кроме изучения теоретического материала, закрепление полученных знаний при проведении практических занятий, лабораторных работ и курсового проекта. Курсовое проектирование является одним из главных элементов учебного процесса. Во время проектирования студенты приобретают практические навыки расчета статических и динамических нагрузок, механических и электромеханических характеристик, выбора мощности и оценки энергетических показателей электродвигателей для разных производственных механизмов, более глубоко осмысливают теорию электропривода.

Курсовой проект по данной дисциплине включает в себя главные вопросы проектирования систем электропривода производственного механизма: изучение особенностей работы механизма, выбор типа электропривода (регулируемого или нерегулируемого), выбор рода тока и типа электродвигателя, выбор напряжения и частоты питающей сети или преобразователя, расчет мощности и выбор двигателя, расчет энергетики электропривода и основных энергетических показателей: к.п.д. и коэффициента мощности.

Из комплекса полного проектирования системы электропривода за рамками данного курсового проекта остаются такие вопросы, как обоснование и выбор системы электропривода, разработка системы управления и регулирования и выбор ее элементов, конструктивная разработка узлов и размещение электрооборудования. Эти вопросы рассматриваются в других курсах данной специальности и решаются при дипломном проектировании. В данном курсовом проекте тип электропривода (регулируемый или нерегулируемый), род тока и вид механизма указываются в названии темы проекта, например: «Электропривод передвижения стола продольно-строгального станка по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель».

Наиболее трудоемким этапом проектирования электропривода является определение мощности и выбор двигателя, так как данная задача, связанная с особенностями нагрузочной диаграммы механизма и характером переходных процессов электропривода, не имеет прямого решения, а выполняется методом последовательных приближений. Для расчета и построения нагрузочных диаграмм механизма и электропривода необходимо выбирать рекомендуемые ускорения. Если передаточное число не задано, то следует его выбрать оптимальным по одному из критериев, например, по быстродействию.

При выполнении проекта следует всегда помнить о том, что проектируемый электропривод должен удовлетворять техническим требованиям механизма, которые указаны в задании, а также приняты на определенном этапе расчета.

2. Задание на курсовой проект. Требования к проекту

Задание на курсовой проект выдается руководителем на стандартном бланке и утверждается заведующим кафедрой. Оно включает тему проекта, исходные данные, содержание расчетно-пояснительной записки, перечень графического материала, представляемого на чертежном листе, рекомендуемую литературу, а также сроки выдачи и сдачи законченного проекта.

Содержание расчетно-пояснительной записки в общем случае имеет следующие разделы:

1. Описание работы механизма, его техническая характеристика и кинематическая схема. Требования к электроприводу.
2. Расчет и построение упрощенных скоростных и нагрузочных диаграмм механизма. Определение расчетной мощности электродвигателя.
3. Выбор оптимального передаточного числа (если оно не задано) кинематической передачи и типа электродвигателя.

4. Расчет и построение упрощенных скоростной и нагрузочной диаграмм электропривода.
5. Предварительная проверка электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности.
6. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик электродвигателя.
7. Расчет и построение искусственных механических характеристик электродвигателя, обеспечивающих выполнение технологических операций механизма.
8. Выбор регулировочного устройства для регулируемого электропривода.
9. Расчет переходных процессов электропривода за цикл и построение кривых скорости ω , электромагнитного момента M , тока I и потерь мощности ΔP в функции времени за цикл работы.
10. Окончательная проверка электродвигателя по нагреву соответствующим эквивалентным методом и методом средних потерь. Проверка двигателя по перегрузочной способности.
11. Расчет расхода электроэнергии за цикл и циклового к.п.д.
12. Заключение.
13. Литература.

Расчетно-пояснительная записка оформляется на стандартных листах писчей бумаги, заполняемых с одной стороны. Листы записки нумеруются и сшиваются. На последнем листе приводится список использованной литературы, оформляемый в соответствии со стандартом, на первом – содержание записки по разделам и основным параграфам разделов. Обложка пояснительной записки делается из плотной бумаги и оформляется по установленному образцу.

Разделы записки должны иметь четкое изложение материала с указанием основных допущений и обозначений. При использовании формул, графиков, численных коэффициентов и методик необходимо делать ссылки на соответствующие литературные источники, которые следует привести в списке использованной литературы.

Результаты повторяющихся расчетов следует сводить в таблицы, предварительно подробно показав на примере ход вычислений. Таблицы должны иметь название и нумерацию. Под буквенными обозначениями соответствующих величин необходимо указывать размерность.

Записка обязательно должна иллюстрироваться схемами, графиками, характеристиками и т.д., которые отражают отдельные этапы проектирования. Они могут выполняться на листах записки или на листках кальки или миллиметровки. Записка должна содержать все необходимые графики, схемы, рисунки независимо от того, вынесены они на чертежные листы или нет.

Чертежи к проекту выполняются на листах (1-2 листа) формата А1 (594x841). Они предназначены для иллюстрации доклада при защите проекта. Обычно на чертежных листах приводятся: кинематическая схема механизма, скоростные и нагрузочные диаграммы механизма и электропривода, схема силовых цепей электропривода, естественная механическая и электромеханическая характеристики, искусственные механические характеристики, графики переходных процессов за цикл работы. Приводимые на листе схемы, характеристики, кривые должны иметь подписи.

Перечень материала, выносимого на чертежные листы, согласовывается с руководителем проекта.

Чертежи можно выполнять карандашом или тушью в соответствии с требованиями стандарта.

Пояснительная записка, как правило, печатается, но может быть написана вручную аккуратным, четким почерком с соблюдением правил орфографии и синтаксиса языка.

Для планомерной работы студента над проектом руководитель указывает ориентировочные сроки выполнения разделов.

Готовый проект студент сдает к установленному сроку руководителю для проверки. Если имеются замечания руководителя о качестве и полноте выполненной работы, студент дорабатывает проект.

Студент защищает проект перед комиссией из преподавателей кафедры.

3. Технологическое описание работы механизма

Большинство производственных механизмов можно разделить на две группы: нереверсивные механизмы длительного режима работы и реверсивные механизмы циклического действия, работающие в динамических режимах.

Механизмы циклического действия представляют наибольший интерес для курсового проектирования, т.к. на их примере можно выявить почти все особенности расчета и выбора электродвигателей и преобразователей для таких механизмов. Поэтому электроприводы таких механизмов и предлагаются в качестве тем курсового проекта. Это в первую очередь механизмы подъемно-транспортных машин и некоторых обрабатывающих станков.

Технологические процессы производственных механизмов связаны с преодолением сил сопротивления на соответствующих участках линейного перемещения или преодолением моментов сопротивления при вращательном движении. При этом рабочие процессы механизма выполняются в общем случае при различных линейных (или угловых) скоростях. Изменение скорости от одного значения к другому происходит с определенным ускорением (замедлением). Наибольшие допустимые усредненные значения ускорений для механизмов циклического действия указаны в таблице 1. Следует, однако, помнить, что вследствие упругости звеньев кинематической цепи действительные ускорения механизмов могут в два раза превышать указанные в таблице 1 значения. Поэтому рекомендуется принимать в расчете ускорения меньше, указанных в таблице 1.

Исходя из рекомендованной в данном пособии литературы, описываются технологические операции, выполняемые конкретным механизмом. На основании технической характеристики механизма и исходных данных к проекту определяется режим работы электропривода и формулируются требования к регулируемому электроприводу: 1) диапазон и плавность регулирования скорости; 2) требуемая жесткость механических характеристик.

Требования к электроприводу являются основанием для выбора типа электродвигателя и его исполнения, обоснования замкнутой или разомкнутой по скорости системы электропривода.

Таблица 1

Средние значения допустимых ускорений

№ п/п	Механизм	$a_{cp}, \text{м/с}^2$
1	2	3
1.	подъема кранов механосборочных цехов	0,2
2.	подъема монтажных кранов и перемещения жидких металлов	0,1
3.	подъема кранов металлургических цехов	0,5
4.	подъема кранов, перемещающих сыпучие грузы	0,8
5.	передвижения мостовых перегружателей	0,05
6.	передвижения кранов и тележек, транспортирующих жидкий металл, козловых кранов	0,1
7.	передвижения монтажных кранов и их тележек	0,2-0,3
8.	передвижения тележек грейферных перегружателей	0,8
9.	поворота кранов	0,6
10.	подъема лифтов пассажирских	< 2

1	2	3
11.	подъема больничных лифтов	< 1
12.	шахтных клетевых подъемников	0,6-0,75
13.	шахтных скиповых подъемников	0,8-1,2
14.	передвижения конвейеров	0,1-0,2
15.	поворота экскаваторов	1
16.	передвижения стола продольно-строгальных станков	0,8-1

4. Расчет и построение упрощенных скоростных и нагрузочных диаграмм механизма. Определение расчетной мощности электродвигателя

Большинство механизмов, рассматриваемых в данном курсовом проекте, выполняют технологические операции при поступательном движении со скоростью v (м/с). Нагрузочная диаграмма механизма рассчитывается, исходя из заданной (или рассчитанной) диаграммы линейной скорости v , принятой величины линейного ускорения a (м/с²), статических F_c и динамических $F_{дин}$ сил.

Для примера рассмотрим скоростную и нагрузочную диаграммы, представленные на рис.1, для регулируемого электропривода, где можно реализовать принятое ускорение. Весь цикл работы разбивается на ряд дискретных временных интервалов t_i , на каждом из которых постоянны скорость v или ускорение a . Сила, действующая на механизм, на каждом временном интервале t_i определяется равенством:

$$F_i = F_{c,i} + F_{дин,i} \quad (1)$$

где $F_{c,i}$ - статическая сила на i - м интервале времени с учетом потерь в передаче, Н;
 $F_{дин,i}$ - динамическая сила на i - интервале времени, Н;

$$F_{дин,i} = m_i a_i \quad (2)$$

m_i - перемещаемая масса на i - интервале;

a_i -- ускорение на i - интервале.

Статическая сила рассчитывается на основании конкретного технологического процесса, выполняемого механизмом. Рассмотрим некоторые из них.

1. Для механизма при подъеме груза G_i :

$$F_{c,i}^{\uparrow} = \frac{G_i}{i\eta_i} = \frac{m_i g}{i\eta_i}; \quad (3)$$

где m_i - поднимаемая масса на i - м интервале, кг;

$g = 9,81$ м/с² - ускорение земного тяготения,

i - кратность полиспаста механизма подъема;

η - к.п.д. передачи, определяемый в зависимости от коэффициента загрузки

$$K_{з,i} = \frac{m_i + m_k}{m_{ном} + m_k} \quad (4)$$

по формуле

$$\eta_i = \left(\frac{1}{\eta_{n,ном}} + \frac{\alpha}{\kappa_{з,i}} - \alpha \right)^{-1}, \quad (5)$$

$\alpha = 0,07 - 0,1$ – коэффициент постоянных потерь в передаче;

$\eta_{n,ном}$ – номинальный к.п.д. передачи;

$m_{ном}$ – масса номинального груза, кг;

m_k – масса крюка (подвески), кг.

2. Для механизма при опускании груза G_i

$$F_{c,i}^{\downarrow} = F_{c,i}^{\uparrow} (2\eta_i - 1). \quad (6)$$

3. Для механизма передвижения по горизонтальному рельсовому пути

$$F_{c,i} = \frac{\kappa_p (m_i + m_m) g (\mu r_{ц} + f)}{R_k \eta_i}, \quad (7)$$

где m_i , m_m – масса перемещаемого груза и масса механизма без груза, кг;

μ – коэффициент трения скольжения в подшипниках колес ($\mu = 0,008 - 0,015$ для подшипников качения, $\mu = 0,06 - 0,12$ для подшипников скольжения).

f – коэффициент трения качения ходовых колес, обычно $f = (0,3 - 1,5) 10^{-3}$ м;

R_k – радиус ходового колеса, м;

$r_{ц}$ – радиус цапфы ходового колеса, м;

κ_p – коэффициент, учитывающий сопротивление от трения реборд о рельсы и трения токоъемников о троллеи, $\kappa_p = 1,2 - 2,0$;

η_i – к.п.д. передачи, определяемый по (5) в зависимости от коэффициента загрузки

$$\kappa_{з,i} = \frac{m_i + m_m}{m_{ном} + m_m}, \quad (8)$$

$m_{ном}$ – масса номинального груза.

4. Для механизма передвижения стола продольно-строгального станка при прямом ходе

$$F_{c,n} = \left[F_z + F_y + (m_{\delta} + m_{cm}) g \mu \right] \frac{1}{\eta_{n,ном}}, \quad (9)$$

и при обратном ходе стола

$$F_{c,o} = \frac{(m_{\delta} + m_{cm}) g \mu}{\eta_{n,o}}, \quad (10)$$

где F_z – усилие резания, Н;

F_y – вертикальная составляющая усилия при резании, Н (обычно $F_y = 0,4 F_z$);

m_{δ}, m_{cm} – масса детали и масса стола, кг;

μ – коэффициент трения стола о направляющие ($\mu = 0,05 - 0,08$);

$\eta_{n,o}$ – к.п.д. передачи при обратном ходе, определяемый по (5) при коэффициенте загрузки

$$K_{з.о} = \frac{g\mu(m_{\delta} + m_{cm})}{F_z + F_y + g\mu(m_{\delta} + m_{cm})} . \quad (11)$$

При расчете динамической силы по (2) величину ускорения рекомендуется выбирать такой, чтобы

$$a \approx \frac{F_{c.max}}{m_{max}} \leq a_{дон} , \quad (12)$$

где $F_{c.max}$ – максимальное (по абсолютной величине) значение статической силы на временном интервале цикла;

m_{max} – значение ускоряемой массы для данной силы.

Это замечание сделано для того, чтобы коэффициент перегрузки электродвигателя не превышал величины 2. Если это не контролировать, то может оказаться, что требуемая перегрузочная способность превышает допустимую для двигателя перегрузку, что приводит к необходимости выбора электродвигателя не по нагреву, а по перегрузочной способности. С технико-экономической точки зрения такое решение является нерациональным.

Затем, в зависимости от длительности цикла $t_{ц}$, приводимой в исходных данных к проекту или рассчитываемой на основании задания, определяется режим работы электропривода. Если $t_{ц} < 10$ мин, то рассматриваемая нагрузочная диаграмма механизма будет относиться к повторно-кратковременному режиму (ПВ < 100 %). При $t_{ц} > 10$ мин имеем длительный режим с переменной нагрузкой (ПВ = 100 %). Если имеем длительный режим работы, то на основании рассчитанной нагрузочной диаграммы определяем эквивалентную за цикл силу

$$F_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n F_i^2 t_i}{t_{ц}}} , \quad (13)$$

где n - число интервалов в цикле,

$t_{ц}$ - время цикла.

Если $t_{ц} < 10$ мин, то для повторно-кратковременного режима определяется продолжительность включения

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{ц}} 100\% \quad (14)$$

и эквивалентная сила за рабочее время t_p

$$F_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \sum_{i=1}^m F_i^2 t_i} , \quad (15)$$

где m – число рабочих участков в цикле,

$$t_p = t_{ц} - t_0 , \quad (16)$$

t_0 - сумма пауз, когда электродвигатель отключен от сети.

На основании эквивалентной силы и номинальной скорости $v_{ном}$ рассчитывается эквивалентная мощность:

а) для длительного режима

$$P_{\varepsilon} = F_{\varepsilon} v_{ном} , \quad (17)$$

б) для повторно-кратковременного режима

$$P_{\varepsilon}(ПВ) = F_{\varepsilon, \varepsilon} \cdot v_{ном} . \quad (18)$$

Эквивалентная мощность повторно-кратковременного режима приводится к одному из ближайших стандартных значений $ПВ_{ст}$ ($ПВ_{ст} = 15\%, 25\%, 40\%$ и 60%) по формуле

$$P_3(PB_{ст}) = P_3(PB) \sqrt{\frac{PB}{PB_{ст}}} . \quad (19)$$

В связи с тем, что в нагрузочной диаграмме механизма не учтена инерционность еще не выбранного электродвигателя, расчетная мощность $P_{расч}$ определяется с коэффициентом запаса $K_{зап} = 1,1 - 1,3$:

$$P_{расч} = K_{зап} \cdot P_3 . \quad (20)$$

После этого можно выбрать электродвигатель на номинальную мощность

$$P_{ном} \geq P_{расч} \quad (21)$$

для различных значений номинальной угловой скорости. Если передаточное число не задано, то для данной номинальной мощности $P_{ном}$ выбирают электродвигатели на несколько скоростей (которые имеются в каталоге) и находят величину

$$J_{\partial,i} \omega_{ном,i}^2 = \min . \quad (22)$$

По этому критерию выбирают номинальную частоту вращения $n_{ном}$, для которой рассчитывают номинальную угловую скорость, рад/с:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi n_{ном}}{30} . \quad (23)$$

После этого рассчитывают передаточное число редуктора для:

а) механизма подъема

$$j_p = \frac{\omega_{ном} D_{\partial}}{2i v_{ном}} , \quad (24)$$

б) механизма передвижения

$$j = \frac{\omega_{ном} D_k}{2v_{ном}} , \quad (25)$$

где i – кратность полиспаста,

$v_{ном}$ - номинальная скорость подъема (или передвижения), м/с;

D_{∂} – диаметр барабана, м;

D_k – диаметр ходового колеса, м.

Если передаточное число задано, то номинальная угловая скорость электродвигателя $\omega_{ном}$ однозначно определяется для механизма подъема из (24), а для механизма передвижения из (25).

Для некоторых механизмов, например, для привода стола продольно-строгального станка, может быть задан радиус приведения поступательного движения к вращательному

$$\rho = \frac{v_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{D_{ш}}{2j} , \quad (26)$$

где $D_{ш}$ – диаметр шестерни в передаче «зубчатое колесо – рейка»,

j - передаточное число редуктора;

$\omega_{ном}$ - номинальная угловая скорость электродвигателя.

Технические данные редукторов приведены в Приложении (таблицы № 15 – 19).

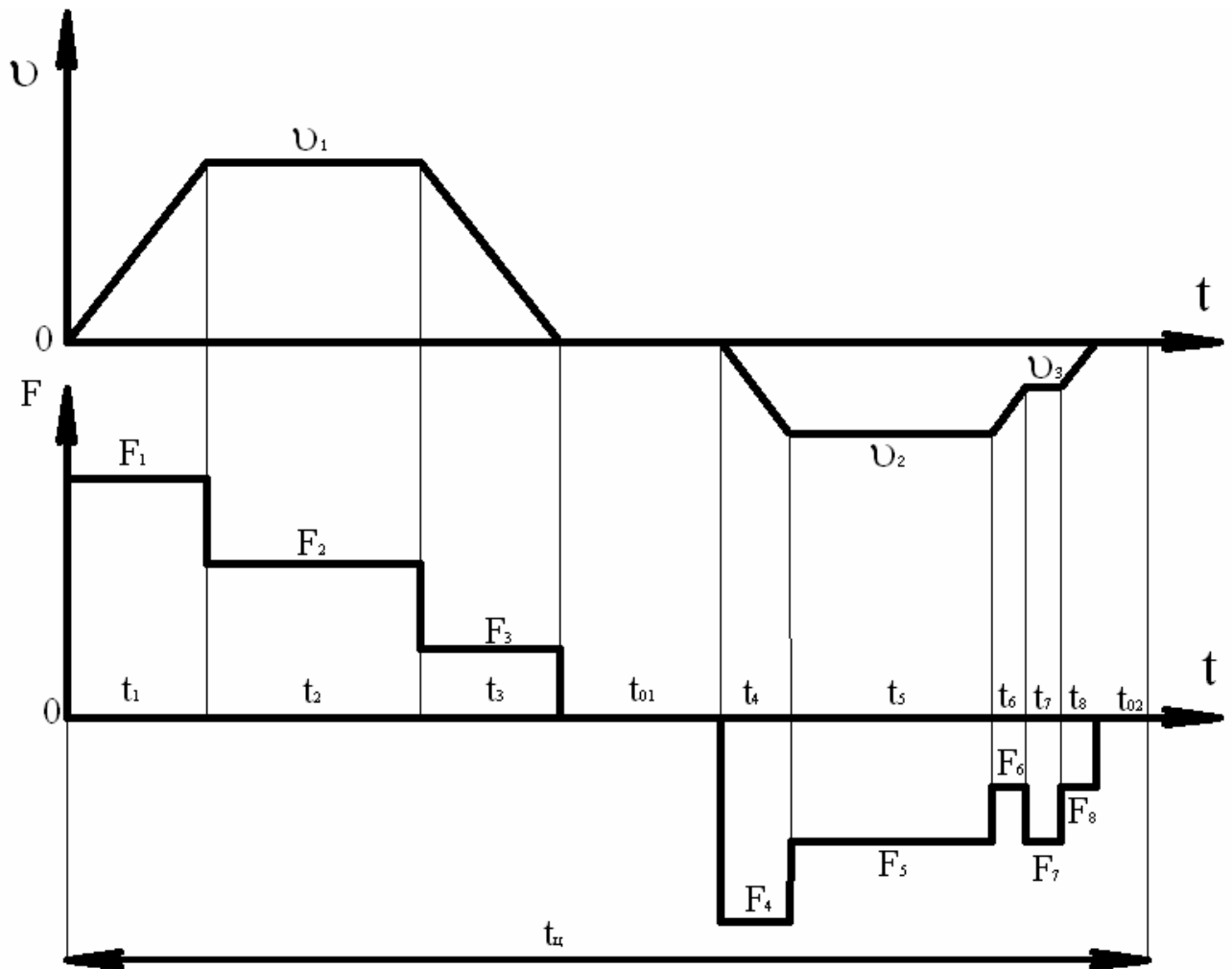


Рис.1. Скоростная и нагрузочная диаграммы механизма

5. Расчет и построение упрощенных скоростных и нагрузочных диаграмм регулируемого электропривода

Нагрузочная диаграмма электропривода представляет собой зависимость электромагнитного момента M или тока I от времени, а скоростная – зависимость угловой скорости ω электродвигателя от времени за цикл. Электромагнитный момент двигателя вычисляется по приближенной формуле

$$M = M_c \pm M_{\text{дин}}, \quad (27)$$

где

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon, \quad (28)$$

$$J = \delta J_\phi + \frac{J_M}{j^2} + m\rho^2, \quad (29)$$

J – суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу электродвигателя, кгм^2 ;

J_M – момент инерции механизма, совершающего вращательное движение с угловой скоростью ω_M ;

j – передаточное число между валом двигателя и валом механизма с угловой скоростью ω_M ;

$$j = \frac{\omega_{ном}}{\omega_m},$$

m – поступательно перемещаемая масса с линейной скоростью v ;

J_o - момент инерции ротора двигателя,

ρ - радиус приведения поступательного движения со скоростью v к вращательному движению с угловой скоростью ω :

$$\rho = \frac{v}{\omega} \quad \text{м/рад} , \quad (30)$$

$\delta = 1,1-1,3$ – коэффициент, учитывающий момент инерции соединительной муфты и редуктора.

Поскольку для регулируемого электропривода линейное ускорение a уже было принято при построении скоростной и нагрузочной диаграмм механизма, то угловое ускорение ε определяется таким образом:

$$\varepsilon = \frac{a}{\rho} . \quad (31)$$

Аналогично, угловая скорость вала электродвигателя однозначно будет определяться линейной скоростью v механизма

$$\omega = \frac{v}{\rho} . \quad (32)$$

Знак динамического момента определяется ускорением: при разгоне $\varepsilon > 0$ и $M_{дин} > 0$, а при торможении $\varepsilon < 0$ и $M_{дин} < 0$.

Статические моменты M_c на валу двигателя будут определяться выражением:

$$M_c = F_c \cdot \rho , \quad (33)$$

где F_c вычисляется по формулам (3), (6), (7), (9) и (10) в зависимости от вида механизма и выполняемой им операции.

Рассчитанные таким образом скоростная и нагрузочная диаграммы регулируемого электропривода имеют вид, показанный на рис.2.

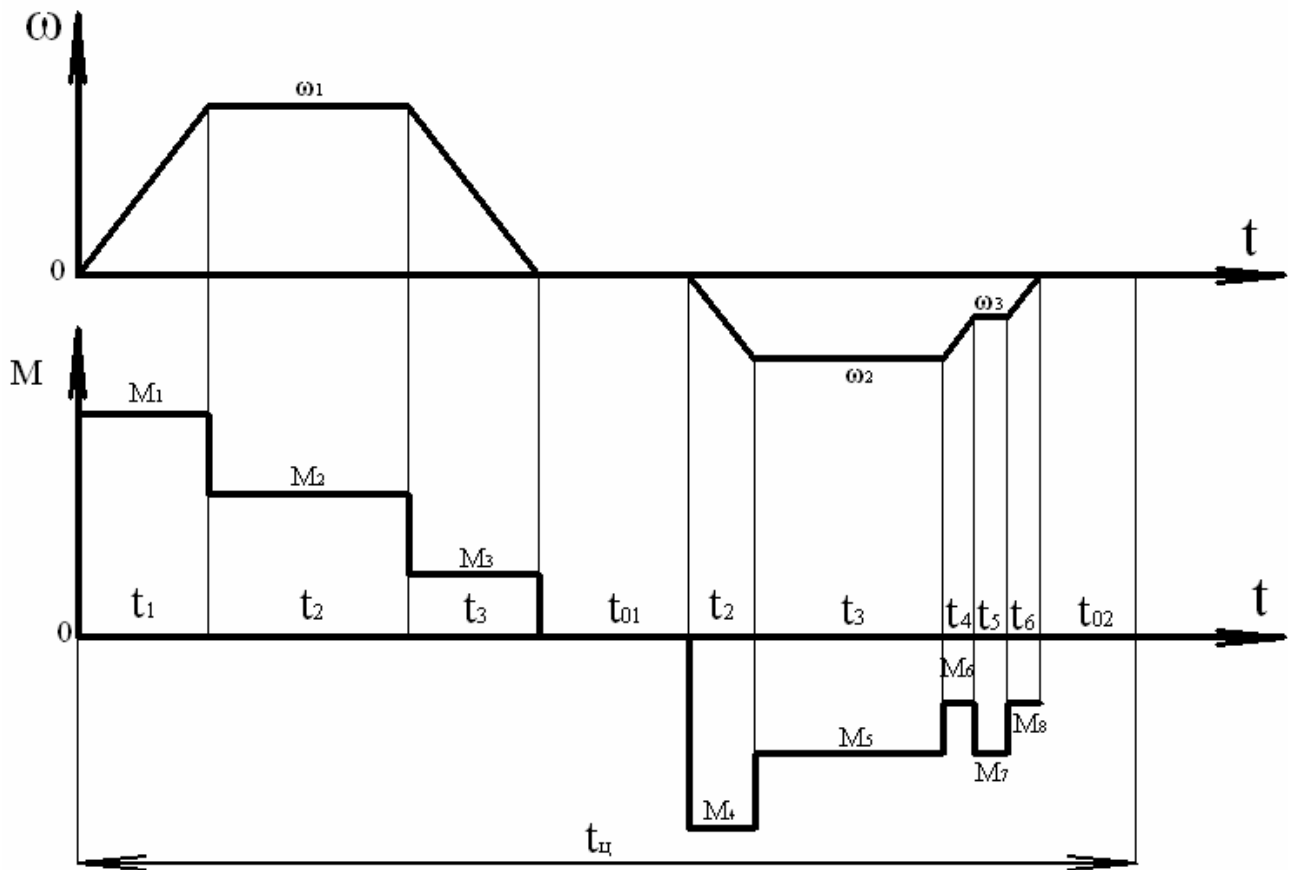


Рис. 2. Скоростная и нагрузочная диаграммы электропривода

6. Предварительная проверка электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности

Построенная указанным выше способом нагрузочная диаграмма электропривода позволяет провести предварительную проверку двигателя по нагреву, принимая во внимание следующие соображения. Если выбранный электродвигатель в системе электропривода работает при примерно постоянном магнитном потоке (ДПТ НВ, АД до критического скольжения, АД при частотном управлении по закону $\psi = \text{const}$), то среднеквадратичный (эквивалентный) момент двигателя отражает его среднюю температуру нагрева. Поэтому для длительного режима работы с переменной нагрузкой (ПВ = 100%) можно найти эквивалентный момент двигателя за время цикла $t_{ц}$ с учетом ухудшения условий охлаждения

$$M_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{ox,i} t_i}}, \quad (34)$$

где M_i – электромагнитный момент двигателя на i – м участке упрощенной нагрузочной диаграммы электропривода;

t_i – временной интервал i -го участка;

$\beta_{ox,i}$ – коэффициент охлаждения самовентилируемого двигателя на i - участке, рассчитываемый по формуле:

$$\beta_{ox,i} = \beta_o + (1 - \beta_o) \sqrt{\frac{\omega_i}{\omega_{ном}}} , \quad (35)$$

ω_i – средняя угловая скорость на i -м участке;

β_o - коэффициент ухудшения охлаждения при неподвижном роторе двигателя;

$\beta_o = 1$ – для двигателей с независимой вентиляцией;

$\beta_o = 0,95 - 0,98$ – для двигателей с естественным охлаждением;

$\beta_o = 0,45 - 0,55$ – для закрытых (обдуваемых) самовентилируемых двигателей;

$\beta_o = 0,25 - 0,35$ – для самовентилируемых двигателей защищенного исполнения.

Предварительно выбранный электродвигатель будет удовлетворять условиям нагрева, если:

$$M_{э} \leq M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} . \quad (36)$$

Для повторно-кратковременного режима работы эквивалентный момент $M_{ээ}$ рассчитывается только для включенного (рабочего) состояния двигателя:

$$M_{ээ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_{ox,i} t_i}} = M_{э} \text{ (ПВ)}, \quad (37)$$

где m – число рабочих участков в цикле.

Затем $M_{э}$ (ПВ) пересчитывается на стандартное значение $ПВ_{ст}$:

$$M_{э} \text{ (ПВ}_{ст}) = M_{э} \text{ (ПВ)} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}} . \quad (38)$$

Если

$$M_{э} \text{ (ПВ}_{ст}) \leq M_{ном} \text{ (ПВ}_{ст}) = \frac{P_{ном} \text{ (ПВ}_{ст})}{\omega_{ном}} , \quad (39)$$

то двигатель удовлетворяет условиям нагрева.

Электродвигатель будет удовлетворять условиям перегрузки, если максимальный момент M_{max} нагрузочной диаграммы электропривода не превышает максимально допустимого момента $M_{max,доп}$ для данного двигателя, т.е.

$$M_{max} \leq M_{max,доп} . \quad (40)$$

Значения $M_{max,доп}$ обычно указываются в каталожных данных электродвигателя.

Если же двигатель работает с переменным магнитным потоком в прежнем режиме (ДПТ ПВ, ДПТ СВ, АД с короткозамкнутым ротором в пуско-тормозных режимах, АД в системе РН-АД), то момент двигателя уже не отражает нагрев. Поэтому упрощенную нагрузочную диаграмму $M(t)$ надо пересчитать, используя соответствующие формулы, в упрощенную нагрузочную диаграмму тока $I(t)$ и определить эквивалентный ток

$$I_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{ox,i} t_i}} . \quad (41)$$

Если $I_3 \leq I_{ном}$, (42)
то выбранный двигатель удовлетворяет условиям нагрева.

Для повторно-кратковременного режима :

$$I_3 (ПВ_{ст}) = I_3 (ПВ) \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}} , \quad (43)$$

$$I_3 (ПВ_{ст}) \leq I_{ном} (ПВ_{ст}) . \quad (44)$$

7. Расчет и построение упрощенных скоростных и нагрузочных диаграмм механизма нерегулируемого электропривода

В настоящее время (75 – 80) % общего числа электроприводов составляют нерегулируемые электроприводы, в основном, на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей. Поэтому будущие инженеры должны уметь правильно рассчитывать и выбирать такие электроприводы.

В нерегулируемом электроприводе уже нельзя задать и реализовать требуемое ускорение механизма. Оно будет изменяться в зависимости от режима (пуск, торможение) и величины статического момента. Поэтому нагрузочную и скоростную диаграммы механизма можно построить для установившейся скорости механизма v и статической мощности P_c . Например, для механизма подъема статическая мощность :

а) при подъеме груза массой m_z ,

$$P_{c,z}^{\uparrow} = \frac{g(m_z + m_k)v}{\eta} , \quad (45)$$

б) при опускании груза массой m_z

$$P_{c,z}^{\downarrow} = g(m_z + m_k)v \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right) , \quad (46)$$

где m_k – масса крюка,

v - линейная скорость подъема (опускания) груза,

η - к.п.д. передачи, определяемый по (5) в зависимости от коэффициента загрузки (4).

Для механизма передвижения статическая мощность

$$P_c = F_c \cdot v \quad (47)$$

где F_c рассчитывается по (7),

v – скорость передвижения.

После расчета статической мощности $P_{c,i}$ на каждом i -м участке цикла находим эквивалентную статическую мощность:

а) для длительного режима работы (ПВ=100%):

$$P_{c,э} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \sum_{i=1}^n P_{c,i}^2 t_i} , \quad (48)$$

б) для повторно-кратковременного режима работы ($PВ < 100\%$, $t_{ц} < 10$ мин) при расчетном значении ПВ

$$P_{c.э}(ПВ) = \sqrt{\frac{1}{t_p} \sum_{i=1}^m P_{c,i}^2 t_i} \quad , \quad (49)$$

где m – число рабочих интервалов в цикле;

t_p – время работы (без пауз) двигателя за цикл.

Приводим $P_{c.э}(ПВ)$ к стандартному значению $ПВ_{ст}$:

$$P_{c.э}(ПВ_{ст}) = P_{c.э}(ПВ) \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}} \quad . \quad (50)$$

Определяем расчетную мощность

$$P_{расч} = K_{зап} \cdot P_{c.э} \quad ,$$

а затем также, как и для регулируемого электропривода, выбираем электродвигатель.

8. Расчет и построение упрощенной скоростной и нагрузочной диаграмм нерегулируемого электропривода (на примере асинхронного коротко – замкнутого двигателя)

Для выбранного электродвигателя рассчитываем:

а) средний пусковой момент

$$M_{п.ср} = \frac{1}{2} \left[M_k + M_c + \frac{1 - S_k}{1 - S_c} (M_{II} - M_c) \right] \quad , \quad (51)$$

б) средний тормозной момент

$$M_{т.ср} = (0,9 \div 0,95) M_{II} \quad , \quad (52)$$

где M_k, M_{II} – критический (максимальный) и пусковой моменты асинхронного двигателя,
 S_k, S_c - критическое скольжение и скольжение, соответствующее статическому моменту M_c :

$$S_c = \frac{\omega_0 - \omega_c}{\omega_0} \quad , \quad (53)$$

$$\Delta\omega_c = \frac{M_c}{\beta} \quad , \quad \omega_c = \omega_0 - \Delta\omega_c \quad , \quad (54)$$

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k} \quad , \quad (55)$$

ω_0 – синхронная угловая скорость асинхронного двигателя;

β - модуль жесткости линеаризованной механической характеристики.

Основным тормозным режимом для асинхронного короткозамкнутого двигателя является режим противовключения, поскольку динамическое торможение на всем диапазоне скоростей, кроме скорости, близкой к нулю, дает тормозной момент, составляющий единицы и доли процента от номинального.

Время пуска и торможения электропривода при данном статическом моменте M_c определяется выражениями:

$$t_{II} = \frac{J\omega_c}{M_{п.ср} - M_c} \quad , \quad (56)$$

$$t_T = \frac{J\omega_c}{M_{T.c.p} + M_c} \quad (57)$$

При известных t_{II} и t_T находим угловое ускорение

$$\varepsilon_{II} = \frac{\omega_c}{t_n} \quad (58)$$

и угловое замедление

$$\varepsilon_T = \frac{\omega_c}{t_T} \quad (59)$$

электропривода.

Построенная в соответствии с приведенной методикой упрощенная скоростная и нагрузочная диаграммы нерегулируемого электропривода на основе асинхронного короткозамкнутого двигателя показана на рис.3.

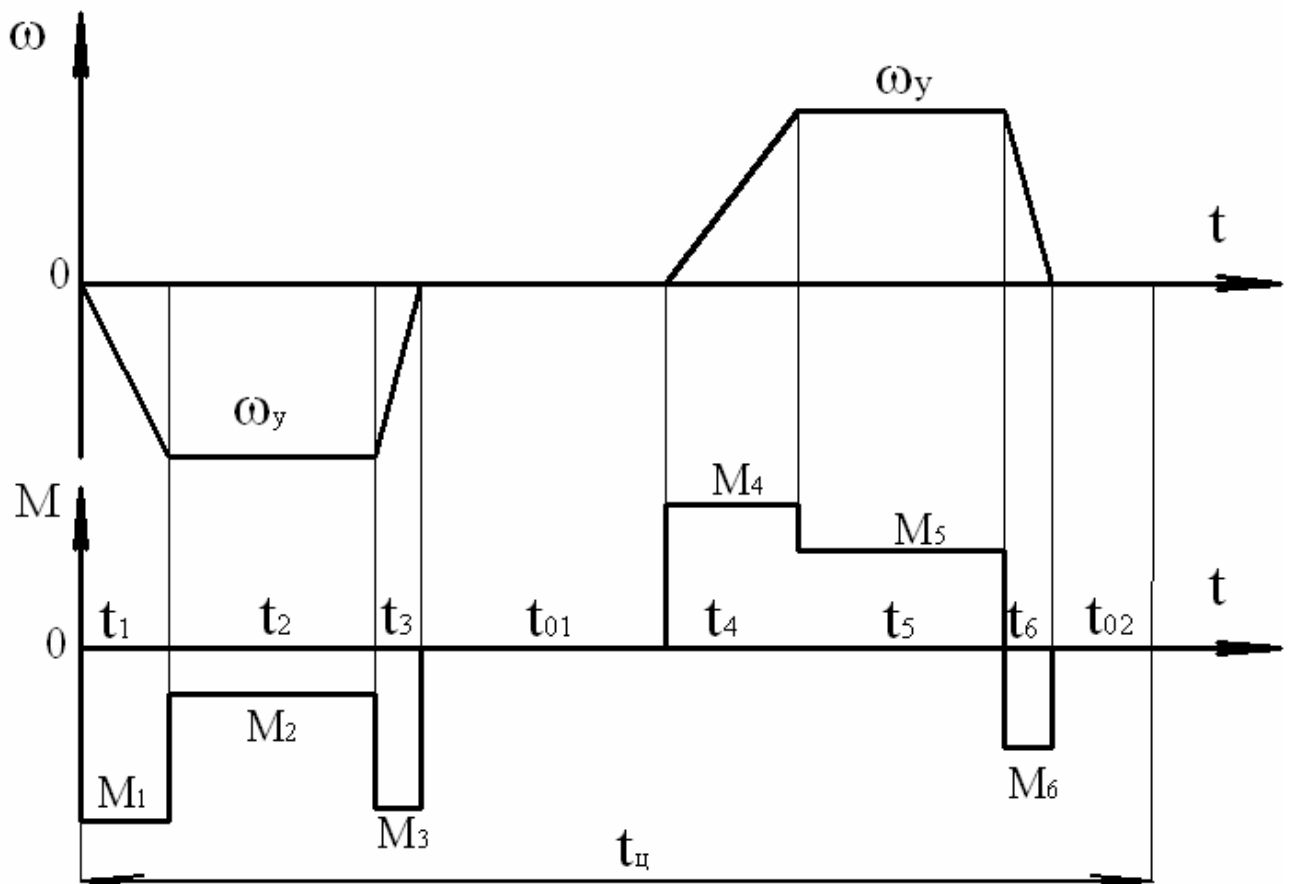


Рис.3. Упрощенные скоростная и нагрузочная диаграммы нерегулируемого электропривода

Нагрузочная диаграмма в виде зависимости момента M от времени t не может быть использована для проверки двигателя по нагреву, поскольку в пуско-тормозных режимах магнитный поток изменяется и уже электромагнитный момент не пропорционален току. Поэтому для предварительной проверки двигателя по нагреву следует использовать метод средних потерь или метод эквивалентного тока. Для предварительной проверки по нагреву асинхронного короткозамкнутого двигателя, работающего в длительном режиме при переменной нагрузке ($ПВ = 100\%$), целесообразно использовать метод средних потерь:

$$\Delta P_{ср.ц} \leq \Delta P_{ном} (ПВ = 100\%) , \quad (60)$$

где
$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} (ПВ = 100\%) \cdot (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}}, \quad (61)$$

$\Delta P_{ном}$ - номинальные потери мощности электродвигателя;

$\eta_{ном}$ - номинальный к.п.д. электродвигателя;

$P_{ном}$ (ПВ=100%) – номинальная мощность двигателя в длительном режиме работы,

$\Delta P_{ср,ц}$ - средние потери мощности за время цикла $t_{ц}$.

Средние потери мощности за цикл можно вычислить по формуле:

$$\Delta P_{ср,ц} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta A_{n,i} + \Delta A_{T,i}) + \sum_{j=1}^m \Delta P_j t_j + \Delta P_{пост} \cdot t_p}{\alpha \sum_{i=1}^n (t_{n,i} + t_{T,i}) + \sum_{j=1}^m t_j + \beta_0 \sum_{k=1}^q t_{0,k}}, \quad (62)$$

где

$$\Delta A_{n,i} = \frac{J \omega_{c,i}^2}{2} \cdot \frac{M_{n.ср,i}}{M_{n.ср,i} - M_{c,i}}, \quad (63)$$

$$\Delta A_{T,i} = 3 \frac{J \omega_{c,i}^2}{2} \cdot \frac{M_{T.ср}}{M_{T.ср} + M_{c,i}}, \quad (64)$$

$$\Delta P_j = \frac{P_j (1 - \eta_j)}{\eta_j}, \quad (65)$$

$$P_j = M_{c,j} \omega_j, \quad (66)$$

$$\eta_j = \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_{ном}} - 1 \right) \frac{a + k_{з,j}^2}{(a+1) \cdot k_{з,j}} \right]^{-1}, \quad (67)$$

$$k_{з,j} = \frac{M_{c,j}}{M_{ном}}, \quad (68)$$

$$a = \frac{\Delta P_{пост}}{\Delta P_{пер,ном}}, \quad (69)$$

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{ном} - \Delta P_{пер,ном}, \quad (70)$$

$$\Delta P_{пер,ном} \approx M_{ном} \omega_0 S_{ном} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (71)$$

$$\alpha = \frac{1 + \beta_0}{2}, \quad (72)$$

n – число пуско-тормозных участков в цикле;

m – число участков с установившейся скоростью ω_j в цикле,

t_p - время работы двигателя за цикл;

$t_{0,k}$ - время паузы на k -м интервале отключенного состояния двигателя;

$\eta_{ном}$ - номинальный к.п.д. двигателя;

$k_{з,j}$ – коэффициент загрузки двигателя на j -м интервале;

ω_j - установившаяся скорость двигателя на j -м интервале;

η_j - к.п.д. двигателя при коэффициенте загрузки $k_{з,j}$;

$\Delta A_{n,i}$ - потери энергии при пуске АД на i -м интервале со статическим моментом $M_{c,i}$;

$\Delta A_{T,i}$ - потери энергии при торможении противовключением АД со статическим моментом $M_{c,i}$;

ΔP_j - потери мощности на j - м интервале установившейся скорости.

t_j – время установившегося движения на j - м интервале;

β_0 - коэффициент, входящий в (35);

q – число пауз в цикле.

Если условие (60) выполняется, то двигатель по нагреву подходит.

Для асинхронного короткозамкнутого двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме ($t_{ц} < 10$ мин), предварительную проверку двигателя по нагреву можно выполнить проще: определением числа включений в час

$$z = \frac{3600}{t_{ц}}, \quad (73)$$

где $t_{ц}$ - время цикла, определяемое на основании исходных данных к проекту.

Если

$$z < z_{ном} = 3600 \frac{\Delta P_{ном} (1 - \varepsilon) \beta_0}{\Delta A_n + \Delta A_T} ; \quad (74)$$

то двигатель по нагреву подходит.

Здесь обозначено:

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_{ц}} = \frac{ПВ}{100} \quad (75)$$

как относительное время включения АД, а

$$\Delta A_n + \Delta A_T = \sum_{i=1}^n (\Delta A_{n,i} + \Delta A_{T,i})$$

как суммарные потери энергии при пуске и торможении за цикл.

Очевидно, что для данного электропривода надо выполнять проверку по пусковым условиям:

$$M_{ц} > M_{c, max} , \quad (76)$$

где $M_{c, max}$ - максимальный статический момент.

9. Расчет и построение естественных механических и электромеханических характеристик электродвигателей

9.1. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя

При постоянных параметрах механическая характеристика асинхронного двигателя выражается известной формулой Клосса. Однако в современных асинхронных короткозамкнутых двигателях, имеющих глубокие пазы в роторе, параметры изменяются в достаточно широких пределах с изменением скольжения. Поэтому формулой Клосса можно пользоваться при скольжениях до критического. Имеются эмпирические формулы, например, формула К.А.Чекунова, которая дает удовлетворительные результаты только в области скольжений от критического до единицы. Но задачи электропривода требуют иметь механические характеристики АД как для двигательного, так и тормозного режимов. Ниже предлагается разработанная автором методика расчета механических и электромеханических характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя при изменении скольжения от $S_{ном}$ до 2. При этом мы будем полагать, что параметры эквивалентной схемы АД для номинального режима ($S \leq S_{ном}$) известны. Дальше будет показано, как их определить.

Механические и электромеханические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя выражаются параметрическими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{3U_{\phi,ном}^2}{\omega_0} \cdot \frac{\Delta R_2 + \frac{R_{2,э}}{S}}{(R_{1,э} + \frac{R_{2,э}}{S})^2 + (\frac{x_{k,0}}{k_1 + kS})^2}; \\
 I_2' &= \frac{U_{\phi,ном}}{\sqrt{(R_{1,э} + \frac{R_{2,э}}{S})^2 + (\frac{x_{k,0}}{k_1 + kS})^2}}; \\
 I_1 &= \sqrt{I_2'^2 + (\frac{I_0}{1 + k_2 S})^2}; \\
 \omega &= \omega_0(1 - S),
 \end{aligned} \tag{77}$$

где

$$\begin{aligned}
 R_{1,э} &= R_1 + \Delta R_2; \\
 R_{2,э} &= R_{2,0}' - \Delta R_2 S_{ном}; \\
 \Delta R_2 &= \frac{R_{2,n}' - R_{2,0}'}{1 - S_{ном}}; \\
 k &= \frac{d - 1}{1 - S_{ном}}; \\
 k_1 &= 1 - k S_{ном}; \\
 d &= \frac{x_{k,0}}{x_{k,n}}; \\
 I_0 &= I_{1ном} \sqrt{1 - \cos \varphi_{ном}}; \\
 k_2 &= \frac{E_{1,ном}}{E_{1,n}} - 1; \\
 E_{1,ном} &= \sqrt{(U_{\phi,ном} \sin \varphi_{ном} - I_{1ном} x_1)^2 + (U_{\phi,ном} \cos \varphi_{ном} - I_{1ном} R_1)^2}; \\
 E_{1,n} &= \sqrt{(U_{\phi,ном} \sin \varphi_{II} - I_{1,n} x_1)^2 + (U_{\phi,ном} \cos \varphi_{II} - I_{1,n} R_1)^2}; \\
 \cos \varphi_{II} &= \cos \varphi_{ном} \left[\frac{\lambda_{II} \eta_{ном}}{\lambda_I (1 - S_{ном})} + \gamma_1 \lambda_I (1 - \eta_{ном}) \right]; \\
 \gamma_1 &= \frac{\Delta P_{неп.1ном}}{\Delta P_{ном}} = 0,25 - 0,4 \quad (\gamma_{1,ср} = 0,32); \\
 \lambda_{II} &= \frac{M_{II}}{M_{ном}}; \quad \lambda_I = \frac{I_{1,n}}{I_{1ном}}; \\
 R_{2,n}' &= \frac{M_{II} \omega_0}{3 I_{2,n}'^2}; \quad I_{2,n}' = \lambda_{I2} I_{2,ном}'^2; \\
 \lambda_{I2} &= 0,95 \lambda_I;
 \end{aligned} \tag{78}$$

$R'_{2,n}$ - активное сопротивление фазы ротора при $S = 1$;

$R'_{2,0}$ - активное сопротивление фазы ротора при $S \leq S_{\text{ном}}$,

$$\left. \begin{aligned} x_{k,n} &= \sqrt{z_k^2 - (R_1 + R'_{2,n})^2}; \\ z_k &= \frac{U_{\phi,\text{ном}}}{I'_{2,n}}. \end{aligned} \right\} \quad (79)$$

В этих расчетах полагаем известными сопротивления R_1 , x_1 и $x'_{2,0}$.

Задавая скольжением $0 \leq S \leq 2$ в (77), рассчитываем механическую $\omega(M)$ и электромеханическую $\omega(I_1)$ характеристики АД для двигательного режима и режима противовключения.

9.2. Методика расчета параметров эквивалентной схемы 3-фазного асинхронного двигателя по каталожным данным для номинального режима

Исходные данные: $P_{\text{ном}}$; $U_{\phi,\text{ном}}$; $n_{\text{ном}}$; $\cos \varphi_{\text{ном}}$; $\eta_{\text{ном}}$; λ_m ; λ_p ; λ_I .

На основании этих данных рассчитываем:

- номинальный ток статора

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{3U_{\phi,\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}}, \quad (80)$$

- номинальное скольжение

$$S_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0}, \quad (81)$$

- номинальную угловую скорость

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30}, \quad (82)$$

- синхронную угловую скорость

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}, \quad (83)$$

- номинальный момент на валу

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (84)$$

- номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}})}{\eta_{\text{ном}}}. \quad (85)$$

Принимаем

$$\Delta P_{\text{мх,ном}} = (0,02 - 0,1) \Delta P_{\text{ном}} \approx 0,06 \Delta P_{\text{ном}}, \quad (86)$$

$$\Delta P_{\text{доб.2}} = (0,01 - 0,05) \Delta P_{\text{ном}} \approx 0,03 \Delta P_{\text{ном}}. \quad (87)$$

Рассчитываем:

- момент холостого хода

$$M_0 = \frac{\Delta P_{\text{мх,ном}} + \Delta P_{\text{доб.2}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (88)$$

- электромагнитный номинальный момент

$$M_{\text{э.ном}} = M_{\text{ном}} + M_0, \quad (89)$$

- переменные номинальные потери мощности в роторе

$$\Delta P_{\text{пер.2ном}} = M_{\text{э.ном}} \omega_0 S_{\text{ном}}. \quad (90)$$

Задаемся коэффициентом загрузки $k_{3,m}$, соответствующим максимальному к.п.д.

АД:

$$k_{3,m} = 0,5 - 0,75 \text{ для режима S1,}$$

$$k_{3,m} = 0,5 - 0,6 \text{ для режимов S3 - S8.}$$

Рассчитываем:

- переменные номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{пер.ном}} = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{1 + k_{3,m}^2}, \quad (91)$$

- постоянные потери мощности

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{ном}} - \Delta P_{\text{пер.ном}}, \quad (92)$$

- переменные номинальные потери мощности в обмотках статора

$$\Delta P_{\text{пер.1ном}} = \Delta P_{\text{пер.ном}} - \Delta P_{\text{пер.2ном}}, \quad (93)$$

- активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = \frac{\Delta P_{\text{пер.1ном}}}{3I_{1\text{ном}}^2}, \quad (94)$$

- максимальное значение электромагнитного момента

$$M_{\text{э,маx}} = \lambda_m M_{\text{ном}} + M_0, \quad (95)$$

- коэффициент

$$\sigma = \frac{3U_{\text{ф.ном}}^2 S_{\text{ном}}}{\Delta P_{\text{пер.2ном}}} - 2R_1, \quad (96)$$

- сопротивление

$$Z = \frac{3U_{\text{ф.ном}}^2}{2\omega_0 M_{\text{э,маx}}} - R_1, \quad (97)$$

- приведенное активное сопротивление фазы ротора

$$R'_{2,0} = 0,5S_{\text{ном}} (\sigma + \sqrt{\sigma^2 - 4Z^2}), \quad (98)$$

- индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{k,0} = \sqrt{Z^2 - R_1^2}, \quad (99)$$

- критическое скольжение

$$S_k = \frac{R'_{2,0}}{Z}, \quad (100)$$

- коэффициент

$$a = \frac{R_1}{R'_{2,0}}. \quad (101)$$

Рассчитывает электромагнитный момент АД по формуле Клосса для найденных параметров и скольжения $S = S_{\text{ном}}$:

$$M(S_{\text{ном}}) = \frac{2M_{\text{э,маx}}(1 + aS_k)}{\frac{S_{\text{ном}}}{S_k} + \frac{S_k}{S_{\text{ном}}} + 2aS_k}. \quad (102)$$

Сравниваем $M_{\text{э,ном}}$, рассчитанный по формуле (89), с $M(S_{\text{ном}})$. Если погрешность

$$\Delta m = \frac{M(S_{ном}) - M_{э,ном}}{M_{э,ном}} \quad (103)$$

превышает допустимую (обычно 5-10%), то корректируем $k_{э,м}$ и M_0 , а затем повторяем расчет до получения требуемой погрешности.

После этого:

- принимаем

$$x_{1,0} \approx x'_{2,0} = 0,5x_{к0}, \quad (104)$$

- рассчитываем:

а) потери в стали

$$\Delta P_{СТ} = \Delta P_{пост} - (\Delta P_{мх,ном} + \Delta P_{доб.2}), \quad (105)$$

б) ток холостого хода

$$I_0 = I_{ном} \sqrt{1 - \cos \varphi_{ном}}, \quad (106)$$

в) эквивалентное сопротивление намагничивающего контура

$$R_{\mu} = \frac{\Delta P_{СТ}}{3I_0^2}, \quad (107)$$

г) синус φ_0 холостого хода

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \left[\frac{(R_1 + R_{\mu})I_0}{U_{\phi,ном}} \right]^2} \quad (108)$$

д) индуктивное сопротивление намагничивающего контура

$$x_{\mu} = \frac{U_{\phi,ном} \sin \varphi_0}{I_0} - x_1. \quad (109)$$

Рассчитанные параметры указаны на эквивалентной однофазной схеме асинхронного двигателя (рис.4а).

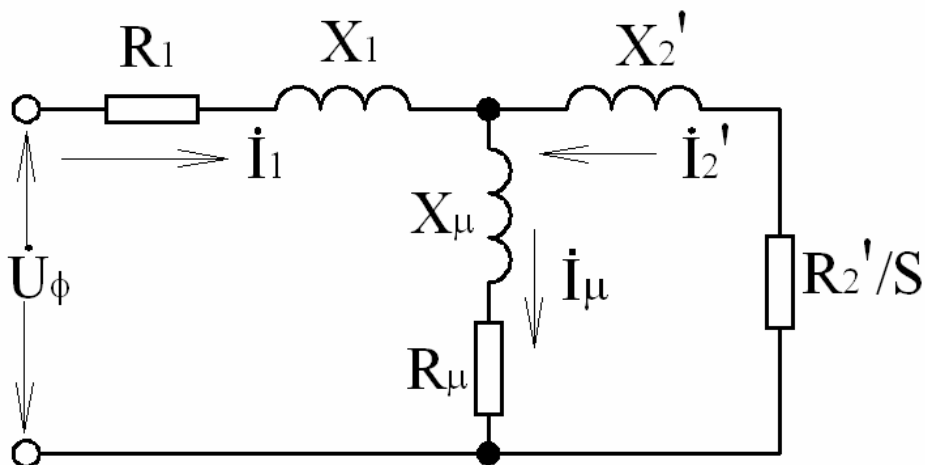


Рис.4а. Эквивалентная Т – образная схема для одной фазы асинхронного двигателя

Следует заметить, что при расчетах механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя эквивалентное сопротивление R_{μ} обычно не учитывается из-за малой величины по сравнению с индуктивным сопротивлением x_{μ} .

В некоторых справочниках, например, в [15] приводятся параметры эквивалентной схемы АД в относительных единицах:

$$x^* = \frac{x}{Z_{\sigma}}; \quad R^* = \frac{R}{Z_{\sigma}},$$

где Z_{σ} - базовое сопротивление, которое определяется таким образом

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{\phi,ном}}{I_{1ном}}.$$

Параметры эквивалентной схемы АД в абсолютных единицах, т.е. в Омах рассчитывается по формулам:

$$R_1 = R_1^* \cdot Z_{\sigma},$$

$$x_1 = x_1^* \cdot Z_{\sigma},$$

$$R_2' = R_2'^* \cdot Z_{\sigma},$$

$$x_2' = x_2'^* \cdot Z_{\sigma},$$

$$x_{\mu} = x_{\mu}^* \cdot Z_{\sigma}.$$

В приложении данного пособия для ряда типов асинхронных двигателей приведены каталожные данные и параметры эквивалентной схемы в относительных единицах.

Вид естественной механической характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя показан на рис. 4б, а электромеханической – на рис.5.

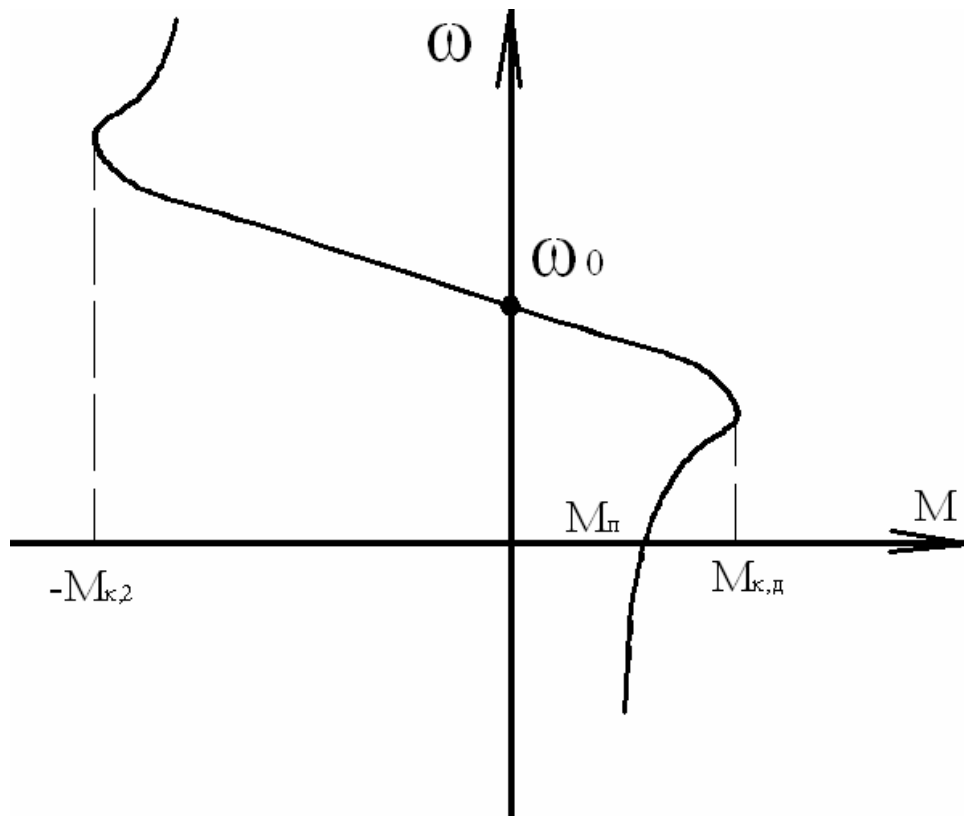


Рис.4б. Естественная механическая характеристика асинхронного короткозамкнутого ротора

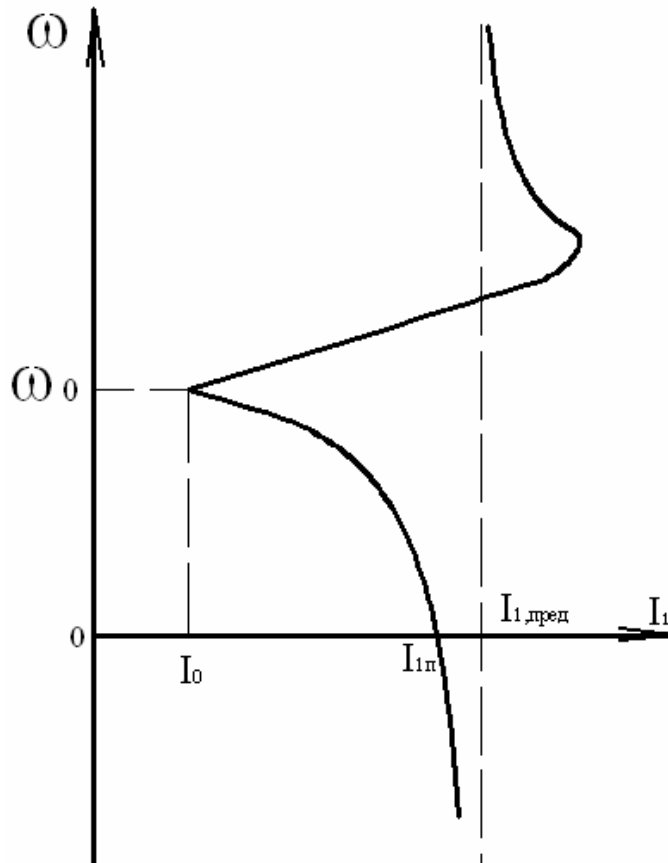


Рис.5 . Естественная электромеханическая характеристика асинхронного короткозамкнутого двигателя

9.3. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

Для асинхронных двигателей с фазным ротором параметры эквивалентной схемы можно считать постоянными, тогда для расчета естественной механической характеристики можно воспользоваться уточненной формулой Клосса

$$M = \frac{2M_k(1 + a|S_k|)}{\frac{S}{|S_k|} + \frac{|S_k|}{S} + 2a|S_k|}, \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \quad (110)$$

$$\omega = \omega_0(1 - S),$$

где

$$\left. \begin{array}{l} M_k = \frac{3U_{\phi,ном}^2}{2\omega_0(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})}; \\ S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}; \\ a = \frac{R_1}{R_2'}; \\ x_k = x_1 + x_2'; \\ -\infty < S < \infty. \end{array} \right\} \quad (111)$$

Пусковой момент получается при $S=1$, однако, его величина не имеет значения, так как для АД с фазным ротором величина пускового момента может быть установлена с помощью добавочного сопротивления в цепи ротора желаемой, вплоть до M_k .

Естественная электромеханическая характеристика АД с фазным ротором может быть рассчитана для приведенного тока ротора

$$\left. \begin{aligned} I'_2 &= \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{S})^2 + x_k^2}}; \\ \omega &= \omega_0 (1 - S), \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

или для тока статора

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{\sqrt{R_{АД}^2 + x_{АД}^2}}; \\ \omega &= \omega_0 (1 - S), \end{aligned} \right\} \quad (113)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_{АД} &= R_1 + R_e(S), \\ x_{АД} &= x_1 + x_e(S), \\ R_e(S) &= \frac{x_\mu^2 R'_2 S}{R_2'^2 + (x_2' + x_\mu)^2 S^2}, \\ x_e(S) &= x_\mu \frac{R_2'^2 + x_2'(x_2' + x_\mu)S}{R_2'^2 + (x_2' + x_\mu)^2 S^2}. \end{aligned} \right\} \quad (114)$$

Более информативной является электромеханическая характеристика $\omega = F(I_1)$.

Если параметры эквивалентной схемы АД с фазным ротором не известны, их можно приближенно определить по каталожным данным.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$R_2 = R_{2 \text{ ном}} S_{\text{ном}}, \quad (115)$$

$$\text{где } R_{2 \text{ ном}} = \frac{U_{2 \text{ ном}}}{\sqrt{3} I_{2 \text{ ном}}}, \quad (116)$$

$$S_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0},$$

$n_0, n_{\text{ном}}$ – синхронная и номинальная частота вращения ротора, об/мин;

$\omega_0, \omega_{\text{ном}}$ – синхронная и номинальная угловые скорости, рад/с;

$R_{2 \text{ ном}}$ – номинальное сопротивление ротора АД, Ом;

$U_{2 \text{ ном}}$ – номинальное линейное напряжение на кольцах ротора при неподвижном роторе, В;

$I_{2 \text{ ном}}$ – номинальный ток фазы ротора при соединении обмотки в звезду, А.

Приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора

$$R'_2 = R_2 k_e^2, \quad (117)$$

где

$$k_e \approx 0,95 \frac{U_{\text{л. ном}}}{U_{2 \text{ ном}}}, \quad (118)$$

k_e – коэффициент трансформации ЭДС,

$U_{\text{л. ном}}$ – номинальное линейное напряжение обмотки статора, В.

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$R_1 = \frac{\gamma_1 \Delta P_{ном}}{3I_{1ном}^2}, \quad (119)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{\Delta P_{пер.1ном}}{\Delta P_{ном}} = 0,25 \div 0,40; \quad (120)$$

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном}(1-\eta_{ном})}{\eta_{ном}}; \quad (121)$$

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3U_{\phi.ном} \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}}; \quad (122)$$

$\Delta P_{пер.1ном}$ - переменные номинальные потери мощности в обмотке статора,

$\Delta P_{ном}$ - номинальные потери мощности АД;

$\Delta P_{ном}$ - номинальная мощность АД, кВт;

$I_{1ном}$ - номинальный ток статора, А;

$\eta_{ном}$ - номинальный к.п.д. двигателя;

$\cos \varphi_{ном}$ - номинальный коэффициент мощности.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = \frac{R_1}{aS_k} \sqrt{1 - (aS_k)^2}, \quad (123)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{R_1}{R_2'}; \\ S_k &= \frac{S_{ном}(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - B})}{B}; \\ B &= 1 - 2aS_{ном}(\lambda_m - 1). \end{aligned} \right\} \quad (124)$$

Принимаем $x_1 \approx x_2' = \frac{x_k}{2}$.

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура

$$x_\mu = \frac{U_{\phi.ном} \sin \varphi_0}{I_0} - x_1;$$

где

$$I_0 = I_{1ном} \sqrt{1 - \cos \varphi_{ном}};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{3U_{\phi.ном} I_0};$$

$$\Delta P_0 = \Delta P_{ном} - 3(I_{1ном}^2 R_1 + I_{2ном}^2 R_2) - 0,005 \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}}. \quad (125)$$

Естественные механическая и электромеханическая характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором имеют вид, соответствующий рис.4б и рис.5, с тем лишь отличием, что пусковой момент M_n будет меньше, что, как указывалось выше, не имеет значения для реального использования двигателя, так как для пуска АД с фазным ротором в цепь ротора вводят добавочные сопротивления.

9.4. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

Естественная механическая характеристика ДПТ НВ выражается уравнением прямой

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}; \quad (126)$$

где

$$\omega_0 = \frac{U_{я.ном}}{c} = \frac{U_{ном} - \Delta U_{щ}}{c}; \quad (127)$$

$$c = k\Phi_{ном} = \frac{U_{ном} - I_{я.ном}R_{я,о} - \Delta U_{щ}}{\omega_{ном}}; \quad (128)$$

$$\beta = \frac{R_{я,о}}{c^2}; \quad (129)$$

ω_0 - угловая скорость идеального холостого хода электродвигателя, рад/с;

$\omega_{ном}$ - номинальная угловая скорость, рад/с;

$U_{ном}$ - номинальное напряжение двигателя, В;

$\Delta U_{щ}$ - падение напряжения на щетках, обычно $\Delta U_{щ} = 2В$;

$R_{я,о}$ - собственное сопротивление обмотки якоря, Ом;

c – постоянная двигателя, В·с/рад;

β - модуль жесткости механической характеристики, Н·м·с/рад;

$I_{я.ном}$ - номинальный ток якоря, А;

ω, M – текущие значения угловой скорости и электромагнитного момента ДПТ.

Если собственное сопротивление якоря неизвестно, то его можно определить по приближенной формуле

$$R_{я,о} \approx 0,5R_{ном}(1 - \eta_{ном}), \quad (130)$$

где
$$R_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}}, \quad (131)$$

$R_{ном}$ – номинальное сопротивление якоря,

$\eta_{ном}$ – номинальный к.п.д. двигателя.

Естественная механическая характеристика строится по двум точкам:

а) $M = 0$; $\omega = \omega_0$;

б) $M = cI_{я.ном} = M_{э.ном}$; $\omega = \omega_{ном}$.

Естественная электромеханическая характеристика ДПТ НВ также описывается уравнением прямой

$$\omega = \omega_0 - \frac{I_{я}R_{я}}{c}. \quad (132)$$

Поскольку электромагнитный момент ДПТ НВ

$$M = cI_{я}, \quad (133)$$

то обе характеристики могут быть построены на одном графике при разных масштабах по оси абсцисс (рис.б).

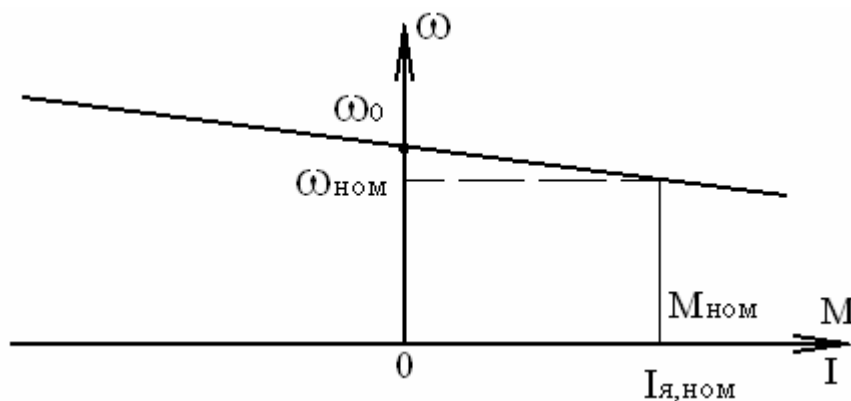


Рис. 6. Естественные механическая и электромеханическая характеристики ДПТ НВ

9.5. Расчет и построение естественной механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ)

Естественная электромеханическая характеристика реального ДПТ ПВ не имеет аналитического выражения и поставляется заводом-изготовителем двигателя или в абсолютных единицах $\omega_e = F(I_{яe})$ или рассчитывается на основе обобщенной характеристики, представляемой в относительных единицах (рис.7). Используя эту характеристику, рассчитываем и строим так называемую переходную характеристику

$$(K\Phi)_e = \left(\frac{E}{\omega}\right)_e = \frac{U_{ном} - I_{яe} R_{я,o}}{\omega_e}, \quad (134)$$

позволяющую для каждого значения тока якоря $I_{яe}$ на естественной электромеханической характеристике рассчитать электромагнитный момент

$$M_e = \left(\frac{E}{\omega}\right)_e \cdot I_{яe}, \quad (135)$$

а затем найти зависимость $\omega_e = F(M_e)$ и построить естественную механическую характеристику ДПТ ПВ (Рис.8).

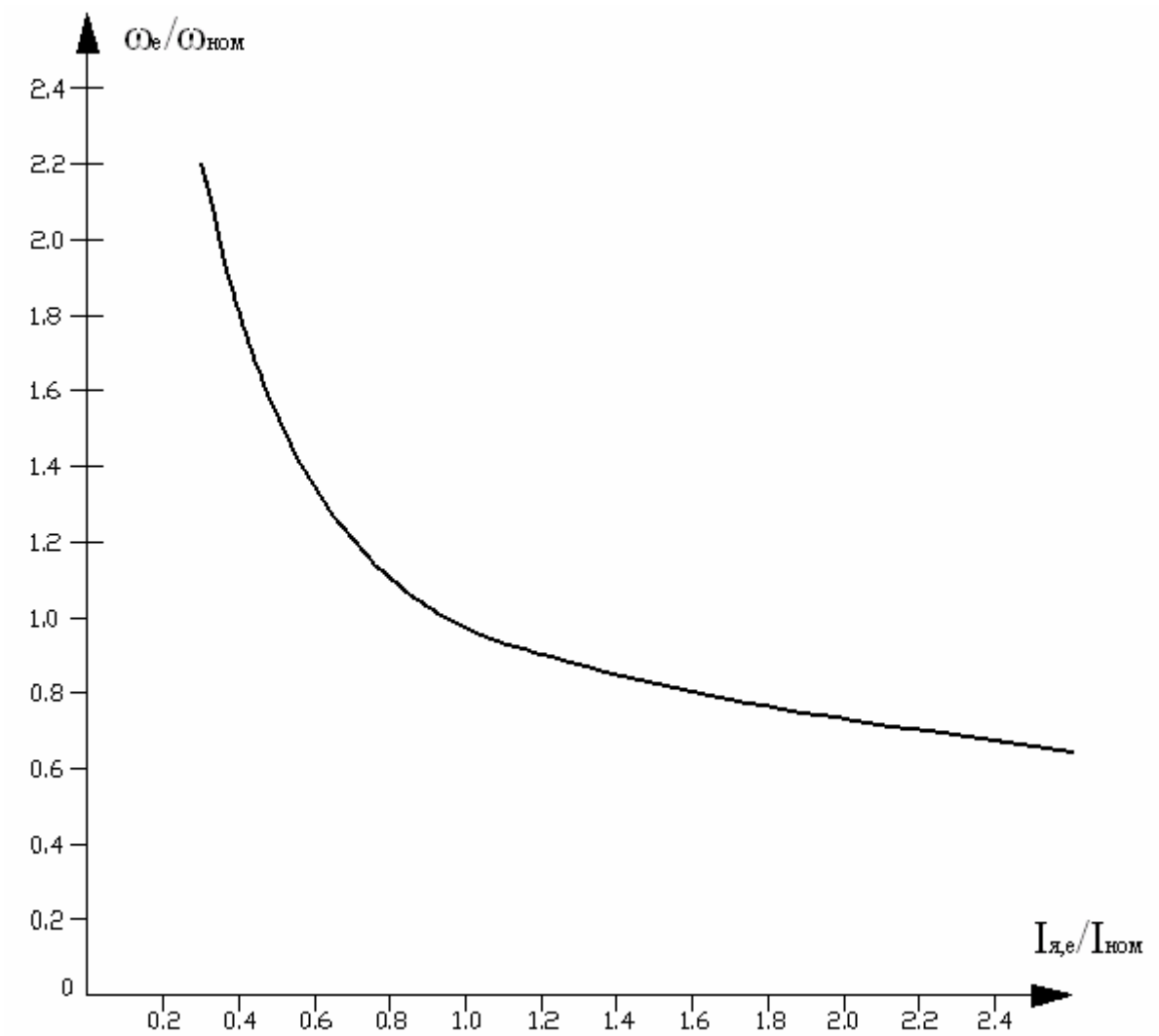


Рис.7. Естественная электромеханическая характеристика ДПТ ПВ в относительных единицах

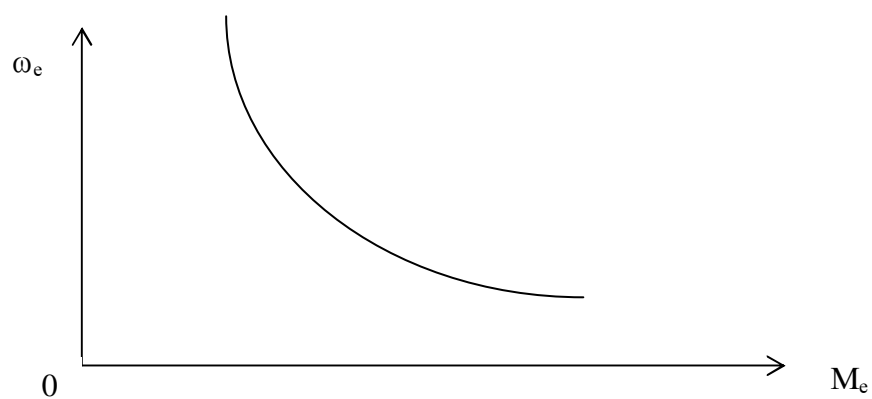


Рис.8. Естественная механическая характеристика ДПТ ПВ.

Расчеты проводят, применяя таблицу № 2.

Таблица № 2

Расчет переходной и естественной механической характеристики ДПТ ПВ с использованием рис.7.

$\frac{\omega_e}{\omega_{ном}}$	$\frac{I_{я,e}}{I_{ном}}$	$\omega_e, рад/с$	$I_{я,e}, А$	$E_e, В$	$\left(\frac{E}{\omega}\right)_e$ $В \cdot с / рад$	$M_e, Н \cdot м$
2,2	0,3					
1,79	0,4					
1,50	0,5					
1,32	0,6					
1,20	0,7					
1,1	0,8					
1,03	0,9					
1	1					
0,92	1,1					
0,90	1,2					
0,87	1,3					
0,83	1,4					
0,80	1,6					
0,77	1,8					
0,72	2,0					
0,70	2,2					
0,68	2,4					
0,65	2,6					

Если сопротивление якорной цепи не известно, его можно определить приближенно по формуле

$$R_{я,о} \approx 0,75R_{ном} (1 - \eta_{ном}) \quad (136)$$

10. Расчет и построение искусственных механических характеристик, обеспечивающих выполнение технологических операций

Необходимые искусственные механические характеристики определяются задаваемой в проекте системой электропривода. В настоящее время наибольшее распространение среди регулируемых электроприводов с умеренными требованиями к показателям регулирования получили системы:

- 1) асинхронный двигатель с фазным ротором и ступенчатым регулированием добавочного сопротивления;
- 2) система «импульсный регулятор сопротивления – асинхронный двигатель с фазным ротором» (ИРС-АД);
- 3) система «преобразователь частоты – асинхронный короткозамкнутый двигатель» со стабилизацией потокосцепления (статора ψ_1 , взаимоиндукции ψ_m или ротора ψ_2) – система ПЧ - АД;
- 4) система «тиристорный (или транзисторный) преобразователь напряжения - двигатель постоянного тока независимого возбуждения» (система ТП – ДПТ НВ).

10.1 Расчет искусственных механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором и ступенчатым регулированием добавочного сопротивления.

Ступенчатое изменение сопротивления в цепи ротора применяется для регулирования среднего пускового и тормозного моментов и регулирования скорости при наличии статического момента.

Для расчета пусковых (тормозных) сопротивлений широко применяется приближенный способ, когда механическая характеристика АД в рабочем диапазоне считается линейной, т.е.

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta},$$

или в относительных единицах

$$v = 1 - \mu \cdot \rho, \quad (137)$$

где

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{\omega}{\omega_0}; & \mu &= \frac{M}{M_{ном}}; & \rho &= \frac{R_{2\Sigma}}{R_{ном}}; \\ R_{ном} &= \frac{U_{2ном}}{\sqrt{3}I_{2ном}}; & \beta &= \frac{M_{ном}}{\omega_0 S'_{ном}}; \end{aligned} \right\} \quad (138)$$

$S'_{ном}$ - скольжение на искусственной характеристике при номинальном моменте;

ω_0 - синхронная угловая скорость АД;

$R_{2\Sigma}$ - суммарное активное сопротивление фазы ротора;

$I_{2ном}$ - номинальный ток ротора;

$U_{2ном}$ - номинальная линейная ЭДС ротора.

Поскольку

$$S'_{ном} = S_{ном} \frac{R_{2\Sigma}}{R_{2,0}}, \quad (139)$$

то

$$1 - v = S = \mu \cdot \rho; \quad (140)$$

где $R_{2,0}$ – собственное сопротивление фазы ротора.

При номинальном моменте $\mu = 1$ и

$$S'_{ном} = \rho, \quad (141)$$

т.е. при номинальном моменте суммарное относительное сопротивление ротора численно равно скольжению ротора.

Пусковой реостат рассчитывается таким образом, чтобы при пуске (торможении) электромагнитный момент АД находился в пределах от μ_1 до μ_2 , при этом

$$\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\rho_n}{\rho_{n-1}} = \dots = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\rho_1}{\rho_e}, \quad (142)$$

где

$$\rho_e = \frac{R_{2,0}}{R_{ном}} = S_{ном}; \quad (143)$$

тогда

$$\rho_n = \rho_e \lambda^n = \lambda^n \cdot S_{ном}, \quad (144)$$

где n – число ступеней пускового реостата.

Числа λ , μ_1 , n и $S_{ном}$ связаны соотношением (рис.9)

$$\lambda = n \sqrt[n]{\frac{1}{\mu_1 S_{ном}}}. \quad (145)$$

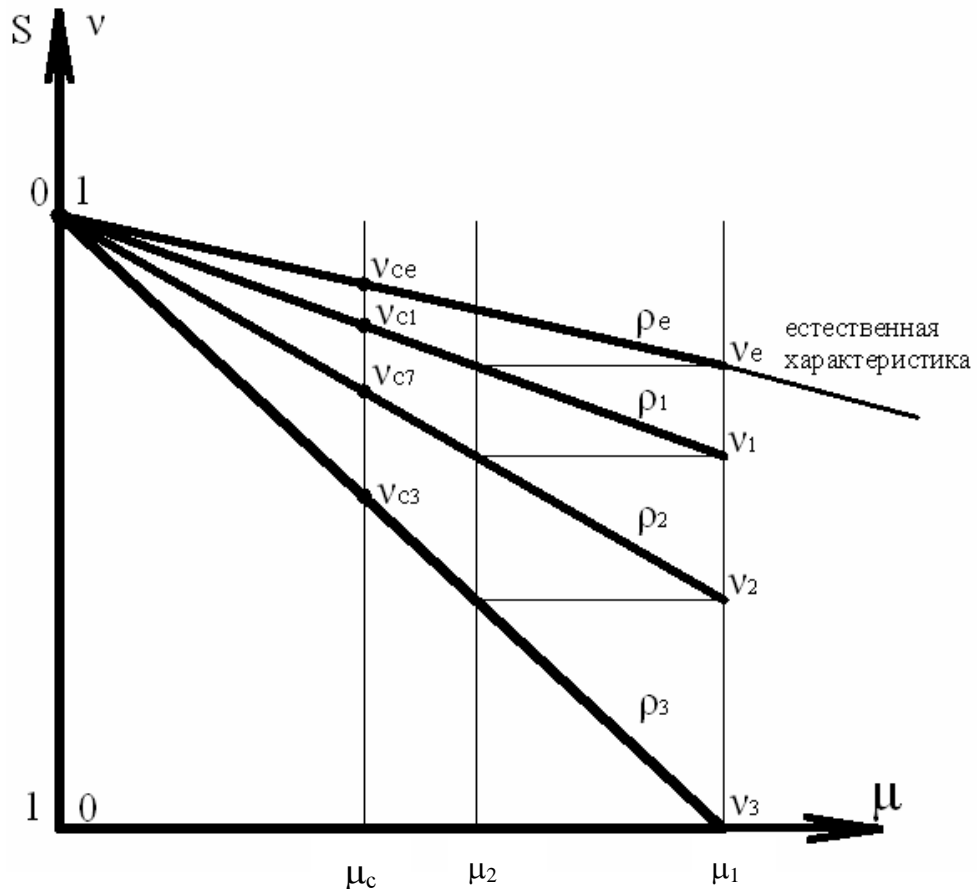


Рис. 9. Механические характеристики АД с фазным ротором

При расчетах обычно задаются величиной

$$\mu_1 = (0,8 - 0,9)\lambda_m$$

и числом ступеней n ($n = 3 - 5$), а затем вычисляют отношение моментов

$$\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2} = n \sqrt{\frac{1}{\mu_1 S_{ном}}}$$

и находят

$$\mu_2 = \frac{\mu_1}{\lambda},$$

при этом должно выполняться условие

$$\mu_2 > \mu_c.$$

В рассчитанном таким образом реостате относительные значения сопротивлений пусковых ступеней будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \rho_e \lambda = S_{ном} \lambda, \\ \rho_2 &= S_{ном} \lambda^2, \\ \vdots & \\ \rho_n &= S_{ном} \lambda^n. \end{aligned} \right\} \quad (146)$$

Сопротивления секций реостата вычисляются таким образом:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{с,1} &= (\lambda - 1) S_{ном}, \\ \rho_{с,2} &= \lambda (\lambda - 1) S_{ном}, \\ \vdots & \\ \rho_{с,n} &= \lambda^{n-1} (\lambda - 1) S_{ном}. \end{aligned} \right\} \quad (147)$$

10.2 Расчет искусственных механических характеристик двигателя в системе электропривода ИРС – АД

Линеаризованные механические характеристики в замкнутой по скорости системе ИРС – АД (Рис.10) представляют собой семейство параллельных прямых, ограниченных линиями 1 – 3 (Рис.11).

Они описываются уравнениями прямых

$$\omega = \omega_{o,3} - \frac{M}{\beta_{3,c}}, \quad (148)$$

где
$$\omega_{o,3} = \frac{U_{3,c}}{k_{oc}}; \quad (149)$$

$$\beta_{3,c} = \frac{k_m k_{pc} k_{oc}}{k_{OT}}; \quad (150)$$

$$\left. \begin{aligned} k_m &= \frac{M_{ном}}{I_{d,ном}}, & k_{oc} &= \frac{U_{oc}}{\omega}; \\ I_{d,ном} &= \frac{E_{do} \cdot S_{ном} - 2(\Delta U_{щ} + \Delta U_{\epsilon})}{R_{\gamma} + x_{\gamma} S_{ном}}; \\ E_{do} &= 1,35 U_{л.ном}; \\ R_{\gamma} &= 2R_2 + 2R'_1 S_{ном} + R_{др}; \\ R'_1 &= R_1 \cdot \frac{1}{k_e^2}; & k_e &= 0,95 \frac{U_{2ном}}{U_{л.ном}}; \\ x'_1 &= x_1 \cdot \frac{1}{k_e^2}; & x_{\gamma} &= \frac{3}{\pi} (x_2 + x'_1), \end{aligned} \right\} \quad (151)$$

$U_{3,c}$ - заданное напряжение в системе управления, которое определяет скорость $\omega_{o,3}$;

$\beta_{3,c}$ - модуль жесткости механической характеристики в замкнутой системе;

k_{oc} - коэффициент обратной связи по скорости, определяемый параметрами датчика скорости ДС;

k_{OT} - коэффициент обратной связи по току, определяемый параметрами датчика тока ДТ;

$U_{л.ном}, U_{2ном}$ - линейные напряжения статора и ротора АД;

R_1, x_1 - активное и индуктивное сопротивления обмотки статора;

R_2, x_2 - активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора;

$\Delta U_{щ}, \Delta U_{\epsilon}$ - падение напряжения на щетках и диодах, $\Delta U_{щ} \approx \Delta U_{\epsilon} \approx 1B$;

$R_{др}$ - активное сопротивление дросселя;

$S_{ном}$ - номинальное скольжение АД;

$M_{ном}$ - номинальный момент АД;

k_{pc} - коэффициент усиления регулятора скорости РС.

При расчетах обычно задаются величиной модуля жесткости на искусственных характеристиках $\beta_{3,c}$, равной модулю жесткости естественной механической характеристики β_e , т.е.

$$\beta_{3,c} = \frac{k_m k_{pc} k_{oc}}{k_{OT}} = \beta_e = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k}, \quad (152)$$

где M_k, S_k - критический момент и критическое скольжение АД.

Параметры k_{oc}, k_{OT} определяются выбираемыми датчиками скорости ДС и тока ДТ (см. рис.10). Тогда из (152) находится необходимый коэффициент усиления регулятора скорости

$$k_{pc} = \frac{\beta_e k_{OT}}{k_m k_{oc}} . \quad (153)$$

Величина добавочного сопротивления R_δ в цепи выпрямленного тока (см. рис.10) рассчитывается, исходя из минимального значения статического момента $M_{c.min}$:

$$R_\delta \geq 2R_{2,0} \left(\frac{2M_k}{M_{c.min} \cdot S_k} - 1 \right), \quad (154)$$

где $R_{2,0}$ - собственное активное сопротивление фазы ротора.

Следует также рассчитать величину напряжения $U_{ПК}$ на полупроводниковом коммутаторе ПК при номинальном токе

$$U_{ПК} = \sqrt{2} U_{2ном} S_{ном} \left(\frac{2M_k}{M_{c.min} S_k} - 1 \right), \quad (155)$$

чтобы потом выбрать силовой ключ ПК соответствующего класса.

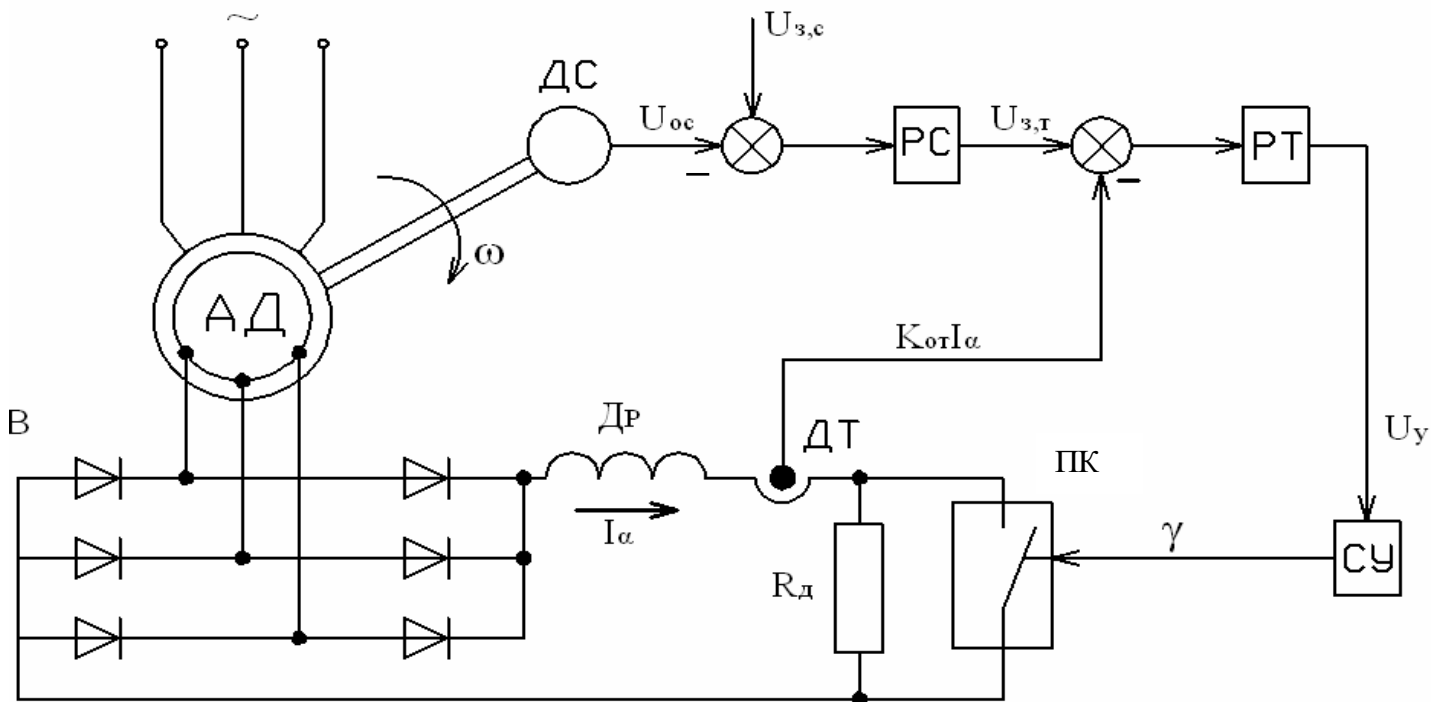


Рис.10. Система ИРС - АД

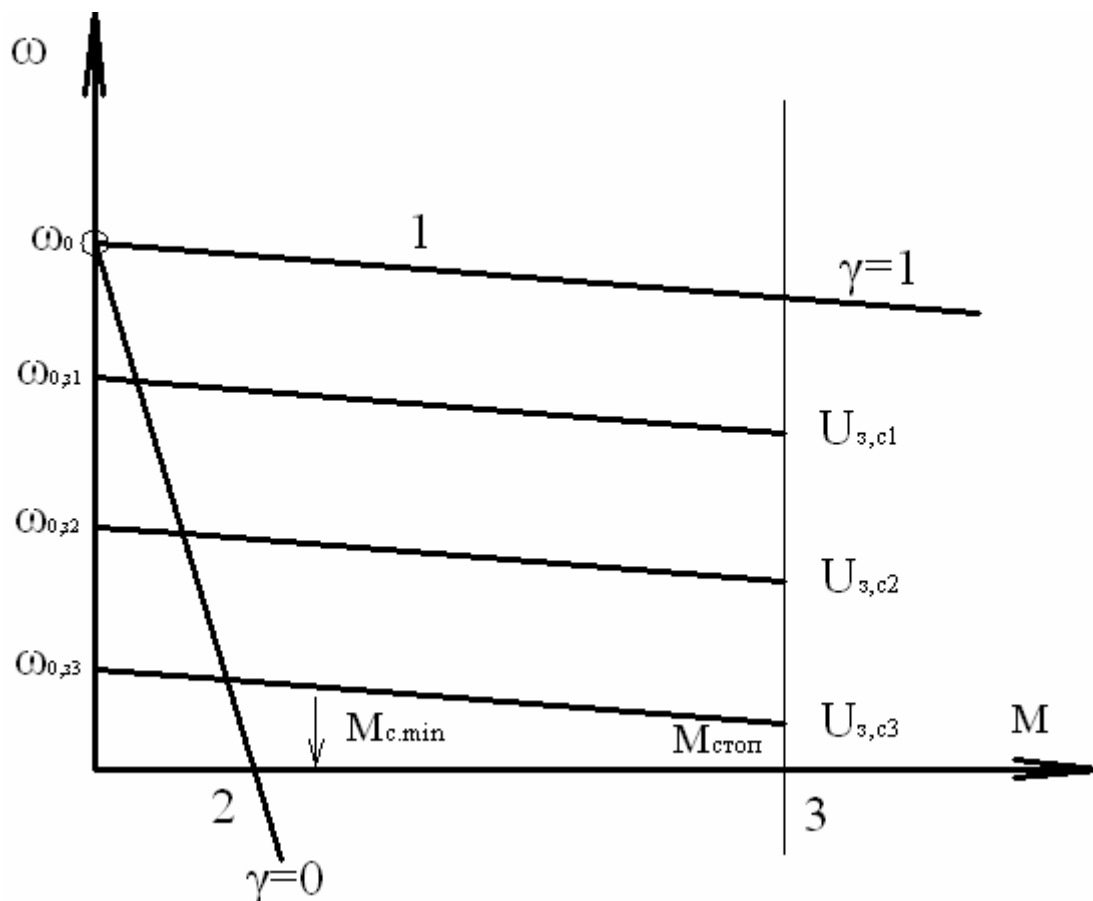


Рис.11. Механические характеристики в системе ИРС – АД

10.3. Расчет искусственных механических характеристик в системе ПЧ – АД.

Для многих производственных механизмов с умеренными требованиями к диапазону регулирования ($D \leq 50$) и динамическим показателям рациональными оказываются системы скалярного частотного управления со стабилизацией потокосцепления статора ψ_1 , взаимоиנדукции ψ_m и ротора ψ_2 . Особенно это касается высокоинерционных механизмов, таких как – механизмы подъема и передвижения кранов, транспортеры, центрифуги и т.п. Для таких механизмов скалярные системы частотного управления со стабилизацией потокосцепления без обратной связи по скорости обеспечивают выполнение всех технологических операций, удовлетворяя требованиям плавного пуска и торможения, плавного регулирования скорости, получения посадочных (пониженных) скоростей с высокой жесткостью механических характеристик, возможностью работы в 4-х квадрантах плоскости $\omega - M$.

А. Механические характеристики АД в системе ПЧ-АД при частотном управлении по закону $\psi_1 = const$.

Семейство механических характеристик может быть представлено параметрическим уравнением

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{2M_k}{\frac{S_a}{S_{ak}} + \frac{S_{ak}}{S_a}}, \\ \omega &= \omega_{0ном}(\alpha - S_a), \end{aligned} \right\} \quad (156)$$

где
$$M_k = \frac{3E_{с.ном}^2}{2\omega_{0ном}x'_{к.ном}}; \quad (157)$$

$$S_{ak} = \pm \frac{R_2''}{x'_{k.ном}}, \quad (158)$$

$$x'_{k.ном} = \sigma_1 x_{1.ном} + \sigma_{1.ном}^2 x'_{2.ном}; \quad (159)$$

$$R_2'' = \sigma_1^2 R_2'; \quad (160)$$

$$\sigma_1 = 1 + \frac{x_1}{x_\mu}; \quad (161)$$

$$E_{s.ном} = \sqrt{(U_{\phi.ном} \sin \varphi_{ном})^2 + (U_{\phi.ном} \cos \varphi_{ном} - I_{1.ном} R_1)^2}; \quad (162)$$

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1.ном}}; \quad (163)$$

$\omega_{0.ном}$ - синхронная угловая скорость АД при номинальной частоте $f_{1.ном}$;

$x_{1.ном}, x'_{2.ном}$ - индуктивные сопротивления статора и ротора (приведенное) при номинальной частоте;

R_2' - приведенное активное сопротивление ротора в Т-образной эквивалентной схеме АД;

$U_{\phi.ном}$ - номинальное фазное напряжение АД;

$\cos \varphi_{ном}$ - номинальный коэффициент мощности;

$I_{1.ном}$ - номинальный ток статора;

R_1 - активное сопротивление обмотки статора;

α - относительная частота питающего двигателя напряжения;

$E_{s.ном}$ - номинальная ЭДС статора АД;

S_a - абсолютное скольжение (параметр).

Вид механических характеристик АД при частотном управлении по закону $\psi_1 = \text{const}$ показан на рис.12.

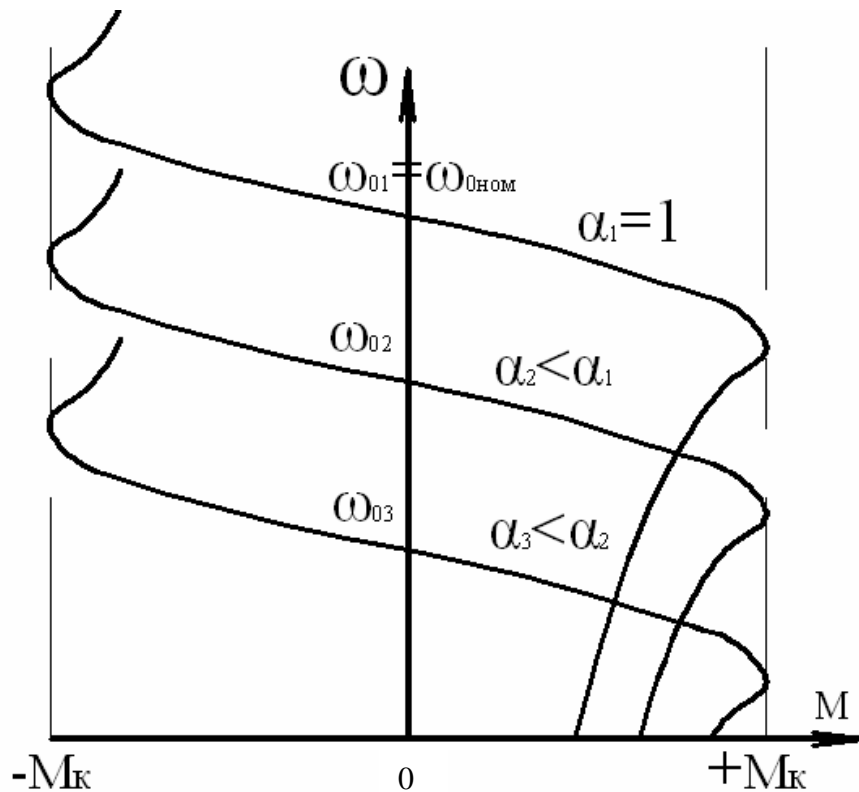


Рис.12. Механические характеристики АД при частотном управлении по закону $\psi_1 = \text{const}$

При реализации закона частотного управления $\psi_1 = \text{const}$ необходимо обеспечивать на обмотках статора АД фазное напряжение

$$U = \alpha \cdot E_{s, \text{ном}} \cdot \frac{Z'_{\text{АД}}}{\sqrt{R_{\sigma, a}^2 + (x_{1, \text{ном}} + x_{\sigma, a})^2}} \quad (164)$$

где

$$Z'_{\text{АД}} = \sqrt{\left(\frac{R_1}{\alpha} + R_{\sigma, a}\right)^2 + (x_{1, \text{ном}} + x_{\sigma, a})^2}, \quad (165)$$

$$R_{\sigma, a} = \frac{x_{\mu, \text{ном}}^2 R'_2 S_a}{R_2'^2 + (x'_{2, \text{ном}} + x_{\mu, \text{ном}})^2 S_a^2}, \quad (166)$$

$$x_{\sigma, a} = x_{\mu, \text{ном}} \frac{R_2'^2 + x'_{2, \text{ном}} (x'_{2, \text{ном}} + x_{\mu, \text{ном}}) S_a^2}{R_2'^2 + (x'_{2, \text{ном}} + x_{\mu, \text{ном}})^2 S_a^2}. \quad (167)$$

Зависимость $U(S_a)$ следует рассчитывать и строить до $S_a = S_{a, \text{max}}$, чаще всего $S_{a, \text{max}} \leq S_{\text{ак}}$.

Б. Механические характеристики АД в системе ПЧ-АД при частотном управлении по закону $\psi_m = \text{const}$.

Семейство механических характеристик при различных значениях α описывается параметрическим уравнением (156), однако, критический момент M_k и абсолютное критическое скольжение $S_{\text{ак}}$ здесь будут другие:

$$M_k = \frac{3E_{1, \text{ном}}^2}{2\omega_{0, \text{ном}} \cdot x'_{2, \text{ном}}}; \quad (168)$$

$$S_{\text{ак}} = \pm \frac{R'_2}{x'_{2, \text{ном}}}; \quad (169)$$

где

$$E_{1, \text{ном}} = \sqrt{(U_{\phi, \text{ном}} \sin \varphi_{\text{ном}} - I_{1, \text{ном}} x_{1, \text{ном}})^2 + (U_{\phi, \text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} - I_{1, \text{ном}} R_1)^2}, \quad (170)$$

$E_{1, \text{ном}}$ – номинальная ЭДС взаимоиндукции АД.

Вид механических характеристик будет такой же, как на рис.12, с той лишь разницей, что критический момент M_k будет значительно больший.

Необходимая величина фазного напряжения на обмотках АД при частотном управлении по закону $\psi_m = \text{const}$ может быть вычислена по выражению:

$$U = \alpha E_{1, \text{ном}} \cdot \frac{Z'_{\text{АД}}}{Z_{\sigma, a}}, \quad (171)$$

где

$$Z_{\sigma, a} = \sqrt{R_{\sigma, a}^2 + x_{\sigma, a}^2}, \quad (172)$$

$Z'_{\text{АД}}$ рассчитывается по (165), а $R_{\sigma, a}$ и $x_{\sigma, a}$ – соответственно по (166) и (167).

В. Механические характеристики АД в системе ПЧ-АД при частотном управлении по закону $\psi_2 = \text{const}$.

Если не учитывать насыщения магнитной системы АД при ограничении потокосцепления ротора ψ_2 на уровне

$$\psi_2 \leq \psi_{m, \text{дон}} \frac{S_{\text{ак}}}{\sqrt{S_{\text{ак}}^2 + S_{a, \text{max}}^2}}, \quad (173)$$

то механические характеристики двигателя при разных α будут выражаться семейством параллельных прямых (рис.13)

$$\omega = \alpha\omega_{0ном} - \frac{M}{\beta}, \quad (174)$$

где

$$\beta = \frac{3(p_{II}\psi_2)^2}{R'_2}, \quad (175)$$

$$S_{ак} = \frac{R'_2}{x'_{2,ном}},$$

$\psi_{m,доп}$ - допустимое значение потокосцепления взаимоиндукции;

$S_{a,маx}$ - максимальная величина абсолютного скольжения, соответствующая наибольшему моменту АД при частотном управлении по закону $\psi_m = const$.

β - модуль жесткости механических характеристик,

p_{II} - число пар полюсов АД.

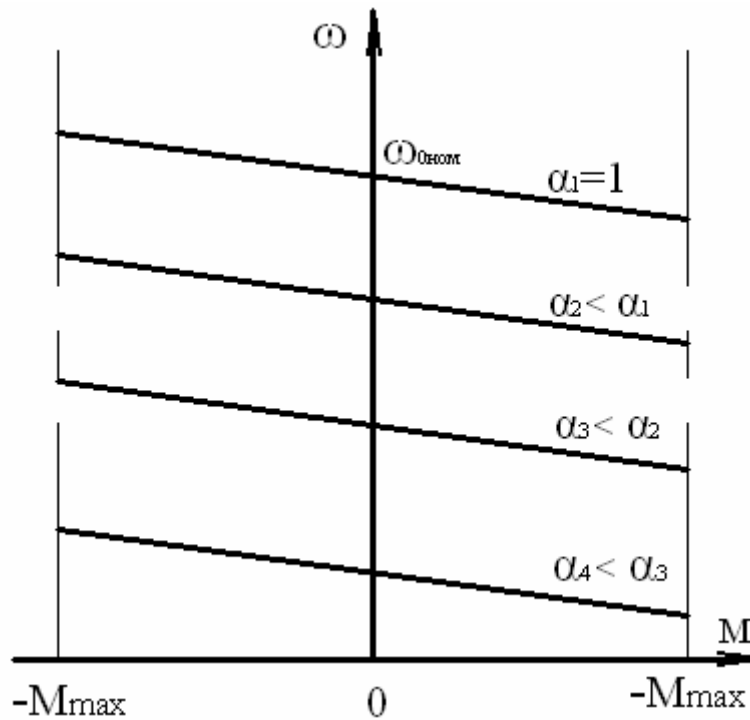


Рис. 13. Механические характеристики АД при частотном управлении по закону $\psi_2 = const$

10.4. Расчет искусственных механических характеристик в системе ТП-ДПТ НВ

В системе электропривода ТП-ДПТ НВ регулирование скорости осуществляется за счет изменения подводимого к якорю напряжения при неизменном сопротивлении якорной цепи и постоянном магнитном потоке двигателя. Уравнения механических характеристик выражают семейством параллельных прямых (рис.14).

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}, \quad (176)$$

где

$$\omega_0 = \frac{U_{я}}{c}; \quad (177)$$

$$c = \frac{E_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{U_{ном} - I_{я.ном} R_{я,0} - \Delta U_{щ}}{\omega_{ном}};$$

$$\beta = \frac{c^2}{R_{я,0}}, \quad (178)$$

ω_0 – скорость идеального холостого хода двигателя при данном напряжении $U_{я}$;

c – постоянная двигателя;

β - модуль жесткости механических характеристик;

$R_{я,0}$ – собственное сопротивление обмотки якоря;

$\Delta U_{щ}$ - падение напряжения на щетках.

Величина напряжения $U_{я}$ рассчитывается, исходя из требуемой угловой скорости ω_c двигателя при данном статическом моменте

$$U_{я} = c(\omega_c + \frac{M_c}{\beta}). \quad (179)$$

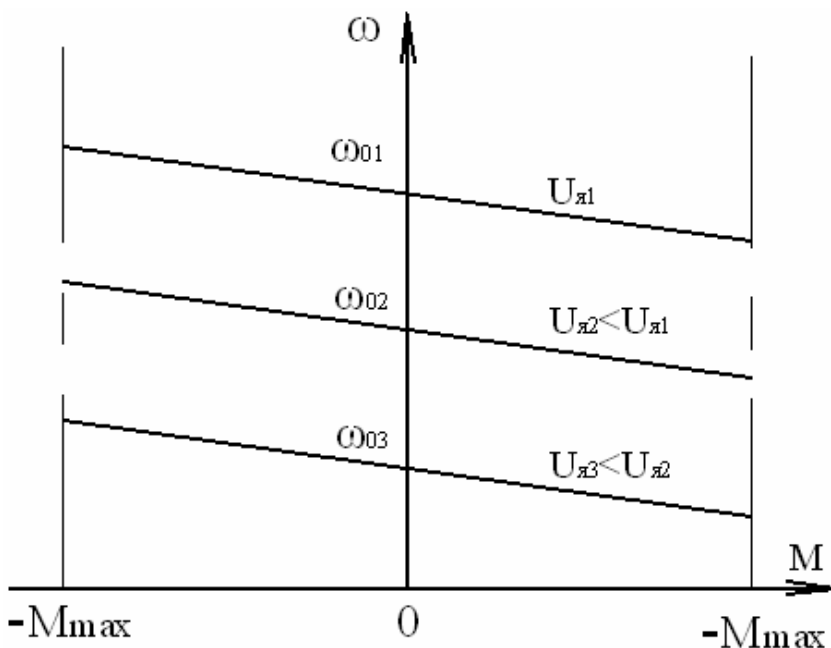


Рис.14 Механические характеристики в системе ТП – ДПТ - НВ

11. Расчет переходных процессов

В силу особенностей производственных механизмов, обладающих значительной инерцией, и по ограничению решаемых в данном проекте вопросов рассматриваются только механические переходные процессы одномассовой модели электропривода. Характер механических переходных процессов электропривода зависит от вида управляющего воздействия и динамического момента.

11.1. Расчет переходных процессов в нерегулируемом электроприводе с асинхронным короткозамкнутым двигателем

В нерегулируемом электроприводе с асинхронным короткозамкнутым двигателем, где управляющее воздействие является ступенчатым, а динамический момент нелинейным, механические переходные процессы рассчитываются или методом кусочно-линейной аппроксимации или методом конечных разностей.

А. Метод кусочно-линейной аппроксимации.

Нелинейный динамический момент показан на рис. 15. На кривой $M_{\text{дин}}(\omega)$ выбираем такое количество n точек, чтобы ломаная кусочно-линейная кривая 1-2-3-4-5-6 наиболее близко отражала реальную функцию $M_{\text{дин}}(\omega)$. Для j -го отрезка $i - (i + 1)$, где $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, n - 1$ можно записать выражения :

- жесткости

$$\beta_j = \frac{M_{\text{дин},i+1} - M_{\text{дин},i}}{\omega_{i+1} - \omega_i}, \quad (180)$$

- электромеханической постоянной времени

$$T_{Mj} = \frac{J}{|\beta_j|}, \quad (181)$$

- установившегося значения скорости

$$\omega_{y,j} = \omega_i - \frac{M_{\text{дин},i}}{\beta_j}, \quad (182)$$

- времени переходного процесса

$$t_j = T_{Mj} \ln \frac{M_{\text{дин},i+1}}{M_{\text{дин},i}}, \quad \text{при } \beta_j > 0, \quad (183)$$

$$t_j = T_{Mj} \ln \frac{M_{\text{дин},i}}{M_{\text{дин},i+1}}, \quad \text{при } \beta_j < 0. \quad (184)$$

Уравнения скорости $\omega(t)$ и электромагнитного момента $M(t)$ выражаются суммами

$$\omega = \sum_{i=1}^n \left(\omega_{y,j} + \frac{M_{\text{дин},i}}{\beta_j} e^{\pm t/T_{Mj}} \right), \quad (185)$$

$$M = \sum_{i=1}^n (M_c + M_{\text{дин},i} e^{\pm t/T_{Mj}}), \quad (186)$$

где $0 \leq t \leq t_j$,

знак (+) относится к $\beta_j > 0$, а (-) к $\beta_j < 0$.

Суммарное время переходного процесса

$$t_{n,n} = \sum_{i=1}^{n-1} t_j. \quad (187)$$

Число фиксированных значений времени t на каждом отрезке j выбирается, исходя из длительности t_j переходного процесса на отрезке и в общем случае включает два-три промежуточных значения между начальным и конечным.

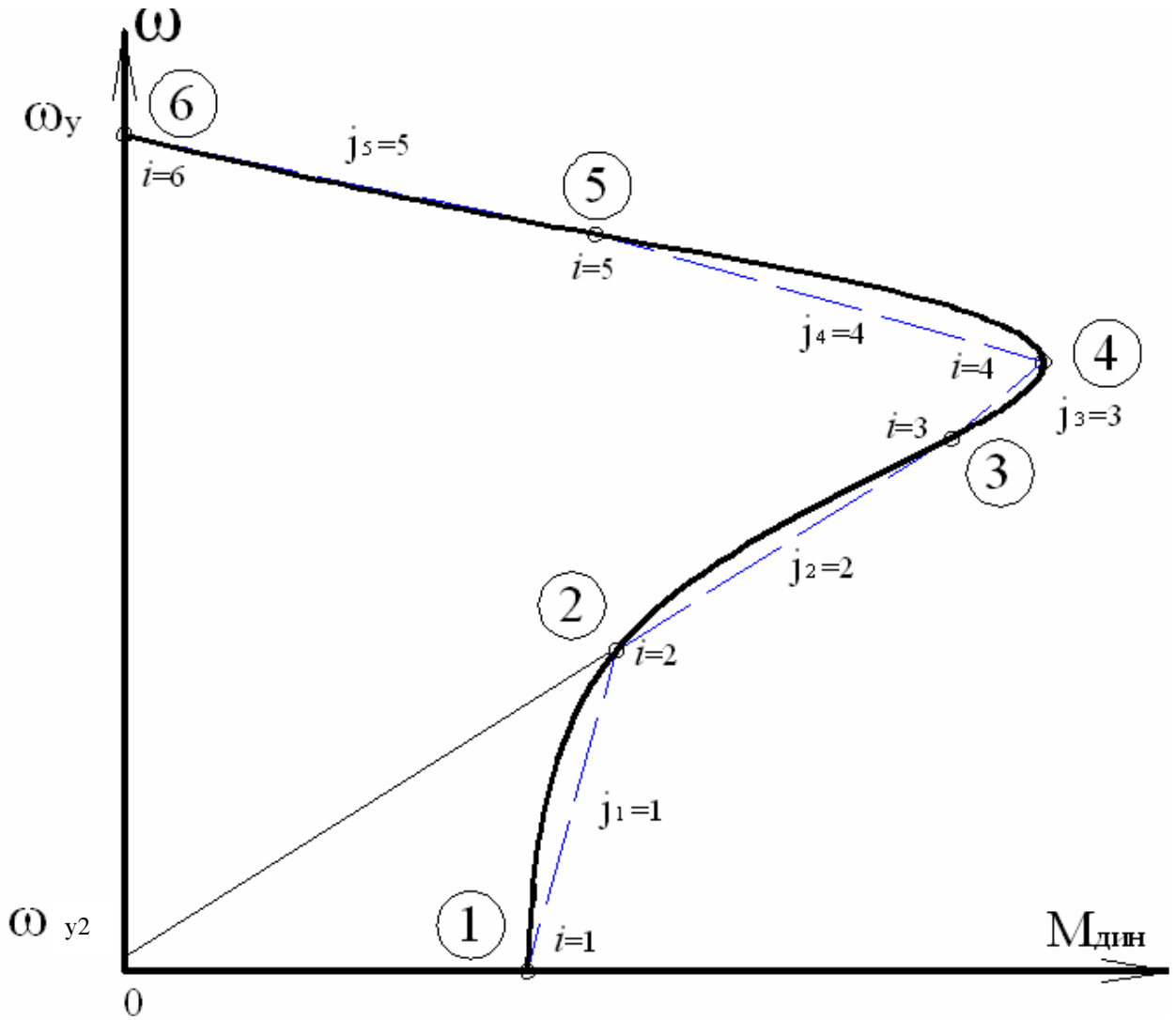


Рис.15. Нелинейный динамический момент

Б. Метод конечных разностей.

При данном статическом моменте M_c строят зависимость динамического момента от скорости

$$M_{\text{дин}}(\omega) = M(\omega) - M_c(\omega). \quad (188)$$

Весь диапазон изменения скорости разбивают на 15-20 участков, равных значений $\Delta\omega = \Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \dots = \Delta\omega_n$ (рис.16). Для каждого значения $\Delta\omega$ определяют среднее значение динамического момента

$$M_{\text{дин},i} = \frac{M_{\text{дин,нач},i} + M_{\text{дин,кон},i}}{2} \quad (189)$$

и время переходного процесса

$$\Delta t = J \frac{\Delta\omega}{M_{\text{дин},i}}. \quad (190)$$

На i -м интервале $0 \leq t \leq \Delta t_i$ угловая скорость ω_i изменяется по линейному закону

$$\omega_i = \omega_{\text{нач},i} + \frac{M_{\text{дин},i}}{J} t, \quad (191)$$

а электромагнитный момент M_i равен

$$M_i = M_{c,i} + M_{\text{дин},i}, \quad (192)$$

где $\omega_{нач,i}$ - начальная угловая скорость на i -м интервале,

$M_{c,i}$ – статический момент на i -м интервале.

Кривые $\omega(t)$, $M(t)$ переходного процесса находят в виде сумм

$$\left. \begin{aligned} \omega(t) &= \sum_{i=1}^n \omega_i ; & M(t) &= \sum_{i=1}^n M_i ; \\ t &= \sum_{i=1}^n \Delta t_i . \end{aligned} \right\} \quad (193)$$

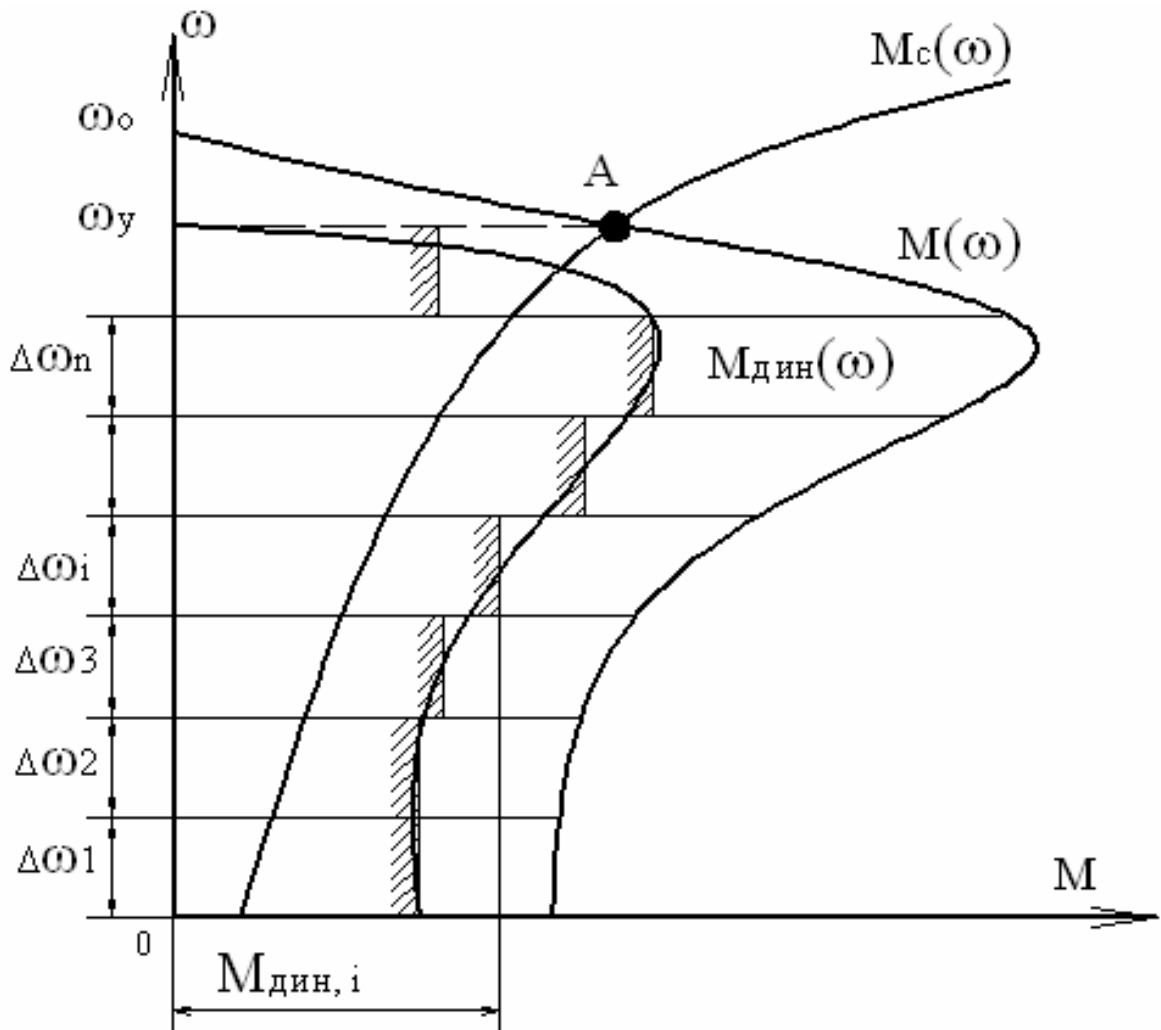


Рис.16. К расчету переходного процесса методом конечных разностей

11.2 Расчет переходных процессов электропривода при ступенчатом пуске асинхронного двигателя с фазным ротором

При линеаризации механических характеристик и постоянном статическом моменте (см.п.10.1) разгон электропривода будет происходить при линейном динамическом моменте. Время разгона на i -й ступени

$$t_i = T_{mi} \ln \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c}, \quad (194)$$

где

$$\left. \begin{aligned} T_{mi} &= \rho_i T_\delta, \\ \rho_i &= \frac{R_{2\Sigma,i}}{R_{ном}}, \\ T_\delta &= \frac{J\omega_0}{M_{ном}}, \end{aligned} \right\} \quad (195)$$

ρ_i - относительное сопротивление на i -й ступени ротора;

T_{mi} - электромеханическая постоянная времени электропривода при работе на i -й ступени.

Относительная скорость $v_i(t)$ на i -ступени изменяется в соответствии с выражением

$$v_i(t) = v_{c,i} + (v_{нач,i} - v_{c,i})e^{-t/T_{m,i}}, \quad (196)$$

где

$$\begin{aligned} 0 \leq t \leq t_i, \\ v_{c,i} = 1 - \mu_c \cdot \rho_i, \end{aligned} \quad (197)$$

$v_{нач,i}, v_{c,i}$ - относительные скорости на i -й ступени при μ_1 и μ_c (см. рис.9).

Относительный момент $\mu_i(t)$ на i -й ступени рассчитывается по уравнению (см. рис.9)

$$\mu_i(t) = \mu_c + (\mu_1 - \mu_c)e^{-t/T_{m,i}}, \quad (198)$$

где

$$0 \leq t \leq t_i.$$

Изменения скорости $\omega(t)$ и момента $M(t)$ за время пуска

$$t_n = T_\delta \ln \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c} \sum_{i=1}^n \rho_i + 4T_{me} \quad (199)$$

будут определяться суммами

$$\omega(t) = \omega_0 \sum_{i=1}^n v_i(t), \quad (200)$$

$$M(t) = M_{ном} \sum_{i=1}^n \mu_i(t), \quad (201)$$

где

$$T_{me} = T_\delta \cdot S_{ном}. \quad (202)$$

Аналогично рассчитываются переходные процессы при динамическом ступенчатом торможении электропривода и линеаризации механических характеристик двигателя.

Вид кривых момента и скорости при ступенчатом пуске электропривода с асинхронным двигателем с фазным ротором показан на рис.17.

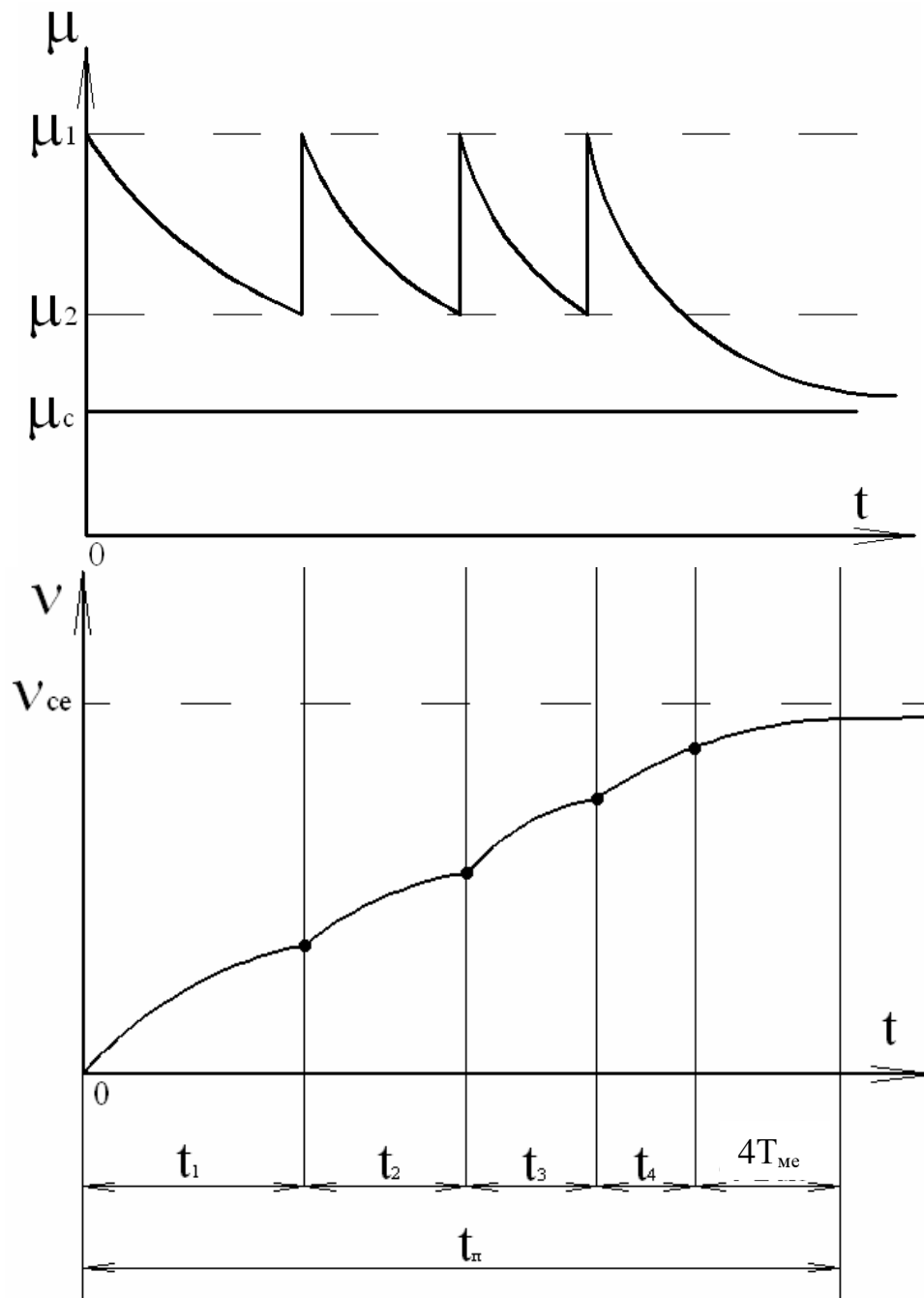


Рис.17. Изменение момента и скорости при ступенчатом пуске асинхронного двигателя с фазным ротором

11.3. Расчет переходных процессов электропривода в системе ИРС-АД

В системе ИРС-АД имеются обратные связи по току и скорости (см.рис.10). Полагая, что регуляторы скорости и тока обеспечивают поддержание постоянства электромагнитного момента $M = k_M I_d$ в переходном процессе электропривода. Тогда при постоянном статическом моменте M_c динамический момент $M_{дин}$ будет тоже постоянным, т.е.

$$M_{дин} = M - M_c = const$$

и угловая скорость двигателя будет изменяться по линейному закону (рис.18)

$$\omega = \omega_{нач} + \varepsilon t, \quad (203)$$

где
$$\varepsilon = \frac{M_{дин}}{J}, \quad (204)$$

ε - угловое ускорение;

J - момент инерции электропривода;

$\omega_{нач}$ - начальная угловая скорость.

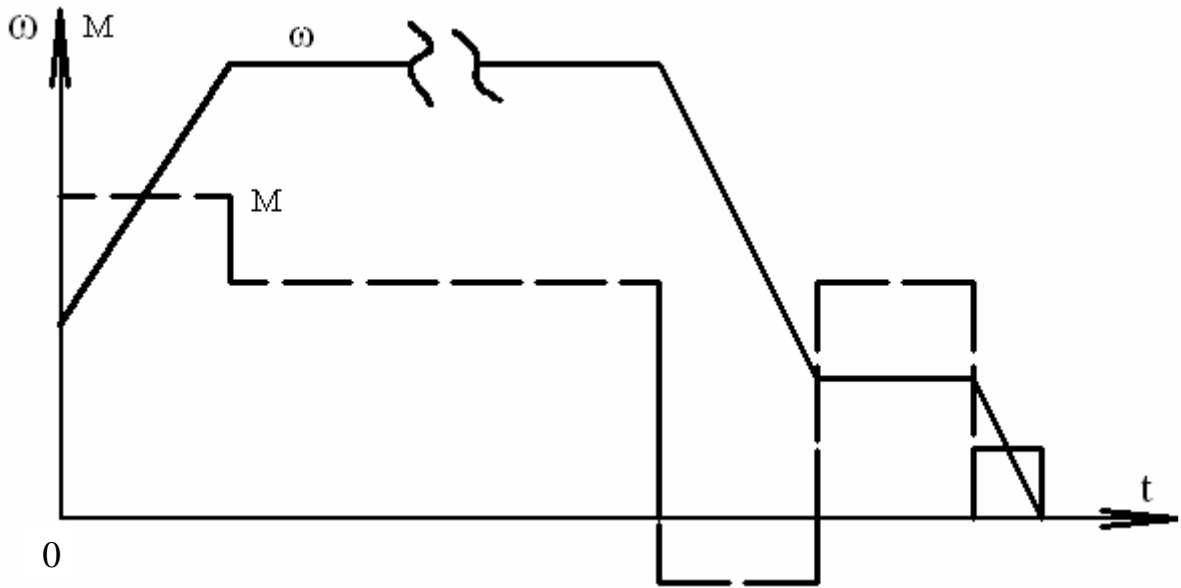


Рис.18. Изменение момента M и угловой скорости ω асинхронного двигателя в системе ИРС - АД

11.4. Расчет переходных процессов электропривода в системах ТП-ДПТ НВ и ПЧ-АД при линейном управляющем воздействии

В системах ТП-ДПТ НВ и ПЧ-АД при $\psi = \text{const}$ магнитный поток электродвигателя поддерживается на постоянном уровне и рабочие участки имеют постоянную величину модуля жесткости β . Формирование динамики электропривода осуществляется за счет линейного задания скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$ в переходном процессе

$$\omega_0(t) = \omega_{0нач} + \varepsilon_0 t, \quad (205)$$

где
$$t_0 = \frac{\omega_{0кон} - \omega_{0нач}}{\varepsilon_0}, \quad (206)$$

ε_0 – задаваемое угловое ускорение вала электродвигателя,

t_0 – время линейного изменения скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$,

$\omega_{0нач}$, $\omega_{0кон}$ – начальное и конечное значения угловой скорости идеального холостого хода.

Для ДПТ НВ изменение $\omega_0(t)$ осуществляется за счет линейного задания напряжения на якоре двигателя

$$\omega_0(t) = \frac{U_{я}(t)}{k\Phi} = \frac{U_{я}(t)}{c}, \quad (207)$$

а для асинхронного двигателя – линейного задания частоты питающего напряжения

$$\omega_0(t) = \frac{2\pi}{p_{II}} f_1(t) \quad (208)$$

при соблюдении закона управления $\psi = \text{const}$, где p_{II} – число пар полюсов АД.

Общие выражения скорости $\omega(t)$ и электромагнитного момента $M(t)$ в переходном процессе имеют вид

$$\omega(t) = \varepsilon_0 t + (\Delta\omega_c + \Delta\omega_{дин,0} - \Delta\omega_{нач})e^{-t/T_m} + \omega_{0нач} - \Delta\omega_c - \Delta\omega_{дин,0}, \quad (209)$$

$$M(t) = M_c + M_{дин,0} - (M_c + M_{дин,0} - M_{нач})e^{-t/T_m}, \quad (210)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta\omega_c &= \frac{M_c}{\beta}; & \Delta\omega_{\text{дин},0} &= \frac{M_{\text{дин},0}}{\beta}; \\
 \Delta\omega_{\text{нач}} &= \frac{M_{\text{нач}}}{\beta}; & T_m &= \frac{J}{\beta}; \\
 \beta &= \frac{2M_k}{\omega_{\text{ном}} S_{\text{ак}}} - \text{для АД}; \\
 \beta &= \frac{M_{\text{ном}}}{\Delta\omega_{\text{ном}}} = \frac{c^2}{R_{\text{я},0}} - \text{для ДПТ НВ}, \\
 M_{\text{дин},0} &= J\varepsilon_0,
 \end{aligned} \right\} \quad (211)$$

M_c - статический момент;

$M_{\text{дин},0}$ - задаваемый динамический момент;

$M_{\text{нач}}$ - начальный электромагнитный момент;

$\Delta\omega_c$ - статическое падение скорости;

$\Delta\omega_{\text{дин},0}$ - падение скорости, обусловленное заданным динамическим моментом ($\Delta\omega_{\text{дин},0} > 0$ при $\varepsilon_0 > 0$ и $\Delta\omega_{\text{дин},0} < 0$ при $\varepsilon_0 < 0$),

$\Delta\omega_{\text{нач}}$ - падение скорости, обусловленное начальным электромагнитным моментом;

$\omega_{\text{ном}}$ - синхронная угловая скорость АД при номинальной частоте;

$M_k, S_{\text{ак}}$ - критический момент и абсолютное критическое скольжение АД для принятого закона частотного управления ($\psi_1 = \text{const}, \psi_m = \text{const}$);

T_m - электромеханическая постоянная времени электропривода.

Если переходной процесс начинается с установившегося состояния, то

$$\Delta\omega_{\text{нач}} = \Delta\omega_c \quad \text{и} \quad M_{\text{нач}} = M_c.$$

В этом случае выражения для скорости и момента приобретают вид:

$$\omega(t) = \varepsilon_0 t + \Delta\omega_{\text{дин},0} e^{-t/T_m} + \omega_{\text{нач}} - \Delta\omega_c - \Delta\omega_{\text{дин},0}, \quad (212)$$

$$M(t) = M_c + M_{\text{дин},0} - M_{\text{дин},0} e^{-t/T_m}. \quad (213)$$

Рассмотрим характерные для курсового проекта переходные процессы:

А. Пуск при постоянном статическом моменте.

Этот случай соответствует разгону электропривода при реактивном M_c и активном M_c для подъема груза. Переходный процесс разбивается на 3 этапа:

Первый этап: $M < M_c$, $\omega = 0$; $0 \leq t \leq t_3$,

$$M(t) = \beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t.$$

Время задержки движения

$$t_3 = \frac{M_c}{\beta \varepsilon_0} = \frac{\Delta\omega_c}{\varepsilon_0}. \quad (214)$$

Второй этап: $0 \leq t' \leq t'_0$,

где $t' = t - t_3$; $t'_0 = t_0 - t_3$;

$$\omega(t') = \varepsilon_0 t' + \Delta\omega_{\text{дин},0} e^{-t'/T_m} - \Delta\omega_{\text{дин},0}, \quad (215)$$

$$M(t') = M_c + M_{\text{дин},0} - M_{\text{дин},0} e^{-t'/T_m}. \quad (216)$$

При $t' = t'_0$ или $t = t_3 + t'_0 = t_0$ имеем:

$$\omega(t'_0) = \omega_{\text{кон}} - \Delta\omega_c - \Delta\omega_{\text{дин},0}, \quad (217)$$

$$M(t'_0) = M_c + M_{\text{дин},0}. \quad (218)$$

Третий этап: $0 \leq t'' \leq 4T_M$,

где $t'' = t - t_0$;

$$\omega(t'') = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c)e^{-t''/T_M}, \quad (219)$$

$$M(t'') = M_c + (M_{нач} - M_c)e^{-t''/T_M}, \quad (220)$$

$$\omega_{нач} = \omega(t'_0); \quad M_{нач} = M(t'_0);$$

$$\omega_c = \omega_{0кон} - \Delta\omega_c.$$

Кривые $\omega(t)$, $M(t)$ и статическая и динамическая характеристики показаны на рис.19.

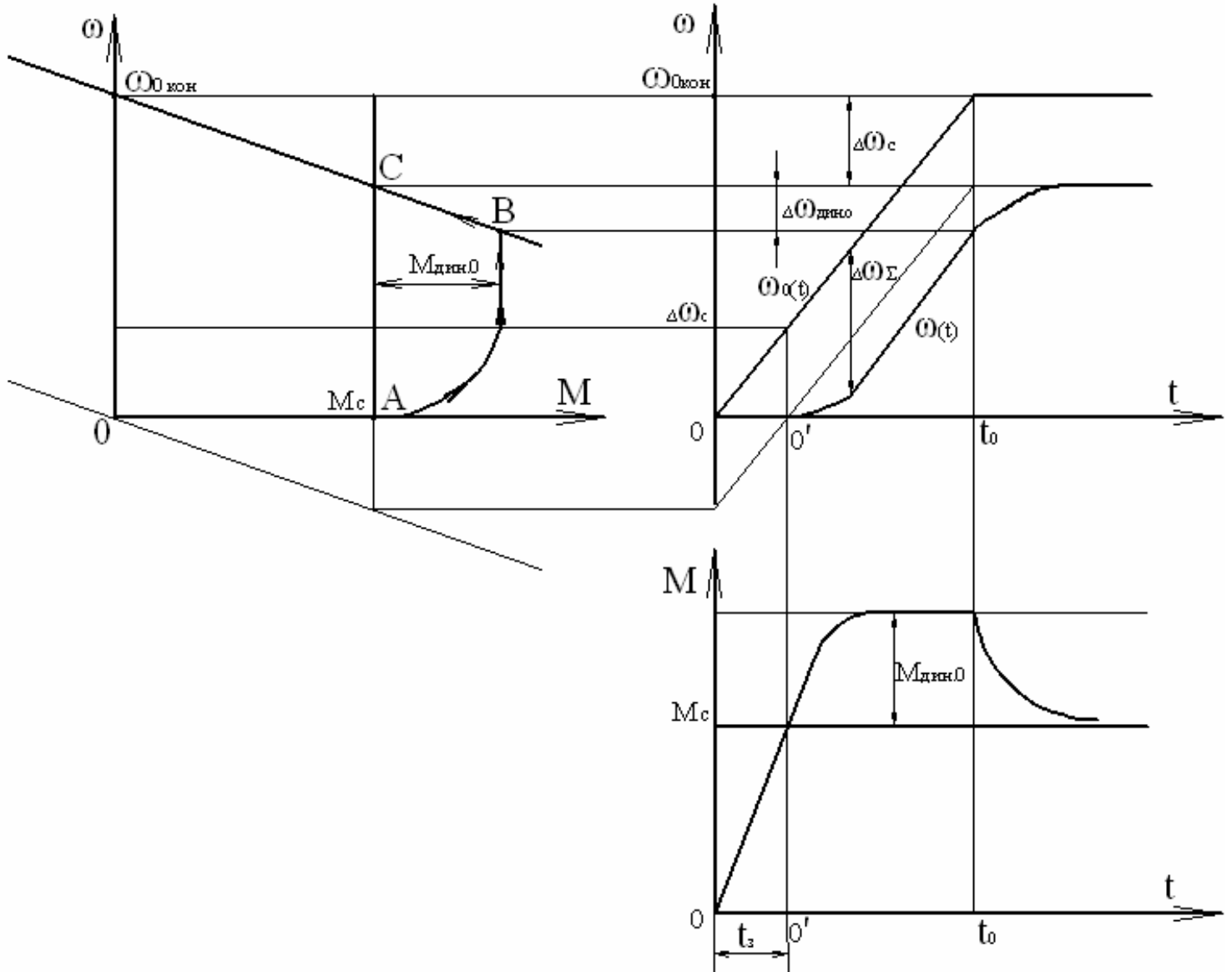


Рис.19. Разгон электропривода при $M_c = \text{const}$

Б. Торможение электропривода при постоянном статическом моменте.

При торможении

$$\varepsilon_0 < 0; \quad M_{дин.0} = J\varepsilon_0 < 0; \quad \Delta\omega_{дин.0} = \varepsilon_0 T_M < 0;$$

$$\omega_0(t) = \omega_{0нач} - \varepsilon_0 t.$$

Процесс торможения будет зависеть от соотношения M_c и $M_{дин.0}$. Если $|M_{дин.0}| > M_c$, торможение будет проходить в два этапа:

первый этап: $0 \leq t \leq t_0$, $M_{\text{дин},0} = \text{const}$.

второй этап: $0 \leq t^n \leq 4T_M$, $M_{\text{дин},0} = \text{var}$.

При $M_c > |M_{\text{дин},0}|$ торможение электропривода происходит в один этап. Этот случай чаще встречается в регулируемом электроприводе производственных механизмов, поэтому мы его здесь рассмотрим.

Если торможение электропривода начинается с установившегося состояния, то уравнения скорости и момента имеют вид:

$$\omega(t) = \omega_{\text{нач}} - \varepsilon_0 t - \Delta\omega_{\text{дин},0} e^{-t/T_M} + \omega_{\text{дин},0} - \Delta\omega_c, \quad (221)$$

$$M(t) = M_c - M_{\text{дин},0} + M_{\text{дин},0} e^{-t/T_M}. \quad (222)$$

При некотором времени $t_{\text{кон}} < t_0$ скорость двигателя достигнет нулевого значения, т.е. $\omega(t_{\text{кон}}) = 0$. Если статический момент реактивный, то электропривод остановится, так как при этом $M < M_c$.

Если же статический момент активный, то при $\omega(t_{\text{кон}}) = 0$ надо электродвигатель отключить и наложить тормоз, чтобы не начался разгон в противоположном направлении.

Кривые торможения электропривода при $M_c = \text{const}$ показаны на рис. 20.

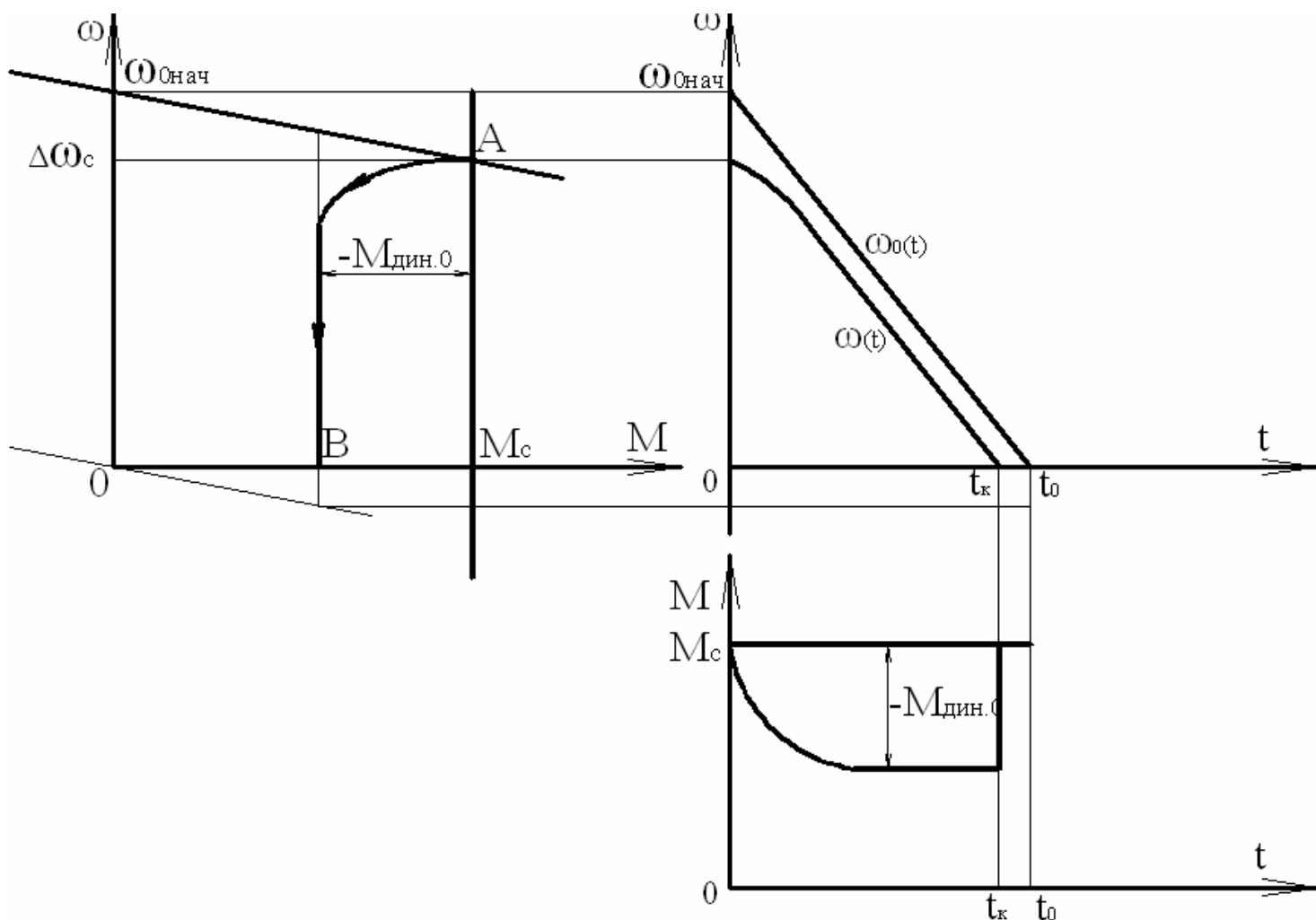


Рис.20 Торможение электропривода при $M_c = \text{const}$ и $M_{\text{дин}} < M_c$

В. Разгон электропривода при опускании груза в подъемных механизмах.

Переходный процесс начинается с растормаживания электропривода и задания линейного нарастания скорости в направлении опускания груза (рис. 21). При этом имеем следующие начальные условия:

$$\omega_{\text{нач}} = 0; \quad \varepsilon_{\text{нач}} = 0; \quad \Delta\omega_{\text{нач}} = 0; \quad M_{\text{нач}} = 0; \quad \varepsilon_0 < 0.$$

Используя их в (209) и (210), получаем

$$\omega_0(t) = -\varepsilon_0 t ; \quad (223)$$

$$\omega(t) = -\varepsilon_0 t + (\Delta\omega_c - \Delta\omega_{дин,0})e^{-t/T_M} - \Delta\omega_c + \Delta\omega_{дин,0} , \quad (224)$$

$$M(t) = M_c - M_{дин,0} - (M_c - M_{дин,0})e^{-t/T_M} . \quad (225)$$

По уравнениям (224) и (225) будет происходить разгон электропривода на интервале времени $0 \leq t \leq t_0$. При $t = t_0$ достигается заданное значение скорости идеального холостого хода $\omega_0(t) = -\omega_{0кон}$ и далее переходный процесс идет по линейной механической характеристике АВ в соответствии с уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \omega(t'') &= \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c)e^{-t''/T_M} , \\ M(t'') &= M_c + (M_{нач} - M_c)e^{-t''/T_M} , \end{aligned} \right\} \quad (226)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \omega_c &= -\omega_{0кон} - \Delta\omega_c , \\ \omega_{нач} &= \omega(t_0) = -\Delta\omega_c + \Delta\omega_{дин,0} , \\ M_{нач} &= M_c - M_{дин,0} , \end{aligned} \right\} \quad (227)$$

$$\left. \begin{aligned} t'' &= t - t_0 , \\ 0 \leq t'' &\leq 4T_M . \end{aligned} \right\}$$

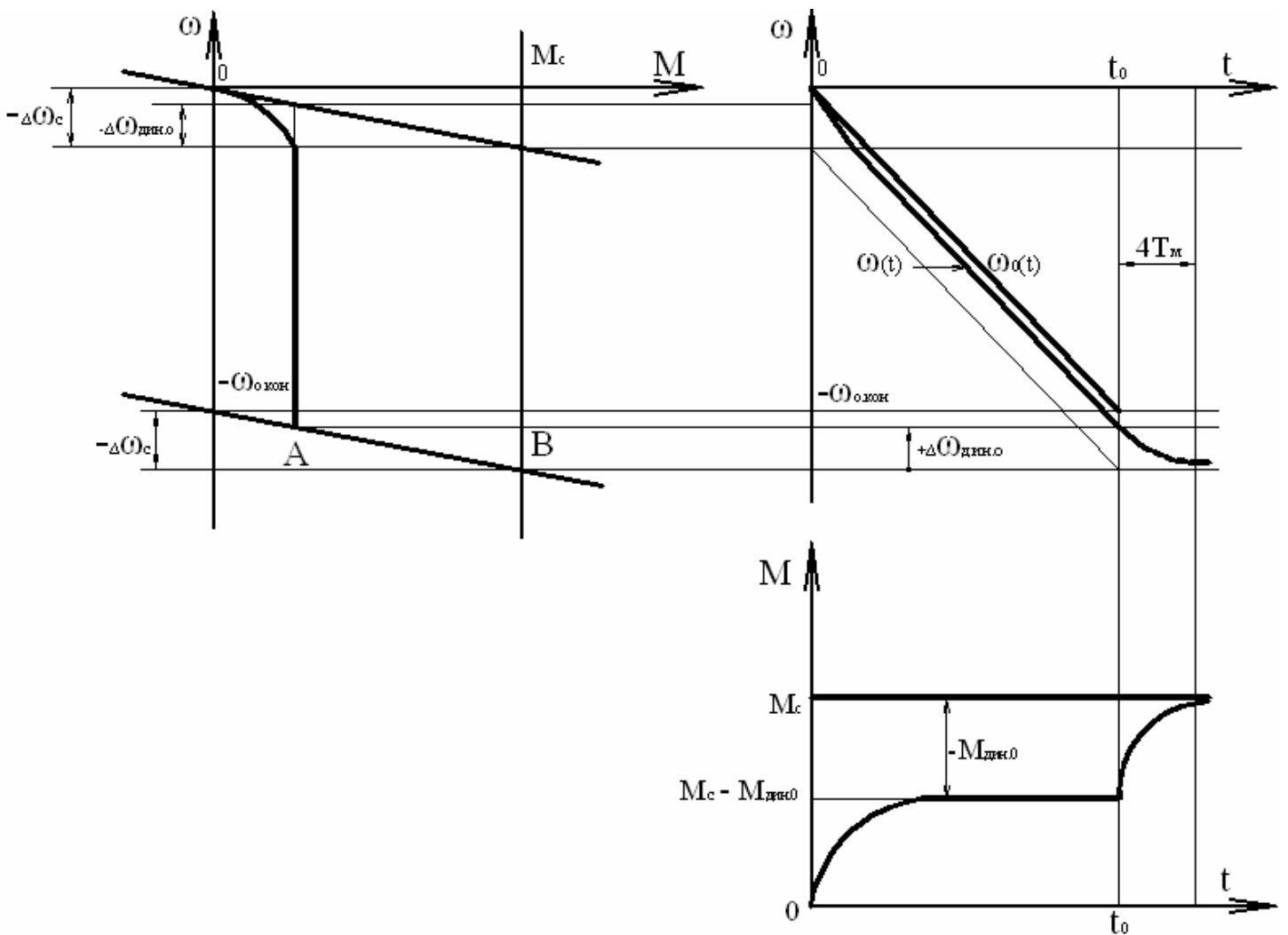


Рис.21. Разгон электропривода при опускании груза

Г. Торможение электропривода при опускании груза в подъемных механизмах.

Рассматриваем торможение с установившегося состояния, когда $M_{нач} = M_c$ и $\Delta\omega_{нач} = \Delta\omega_c$. Для торможения опускающегося груза задаем линейное нарастание скорости идеального холостого хода:

$$\omega_0(t) = -\omega_{нач} + \varepsilon_0 t, \quad (228)$$

при этом выбираем время линейного изменения таким, чтобы при $t = t_0$ скорость двигателя равнялась нулю, т.е. $\omega(t_0) = 0$ (рис.22). Это условие дает величину

$$t_0 = \frac{\omega_{нач} + \Delta\omega_c}{\varepsilon_0} + T_m. \quad (229)$$

Угловая скорость $\omega(t)$ и электромагнитный момент $M(t)$ при торможении электропривода будут изменяться в соответствии с уравнениями:

$$\omega(t) = \varepsilon_0 t + \Delta\omega_{дин.0} e^{-t/T_m} - \omega_{нач} - \Delta\omega_c - \Delta\omega_{дин.0}, \quad (230)$$

$$M(t) = M_c + M_{дин.0} - M_{дин.0} e^{-t/T_m}. \quad (231)$$

При $t = t_0$, когда $\omega(t_0) = 0$, необходимо отключить двигатель от преобразователя и наложить механический тормоз, чтобы не начался подъем груза.

Кривые переходного процесса электропривода при торможении опускающегося груза показаны на рис. 22.

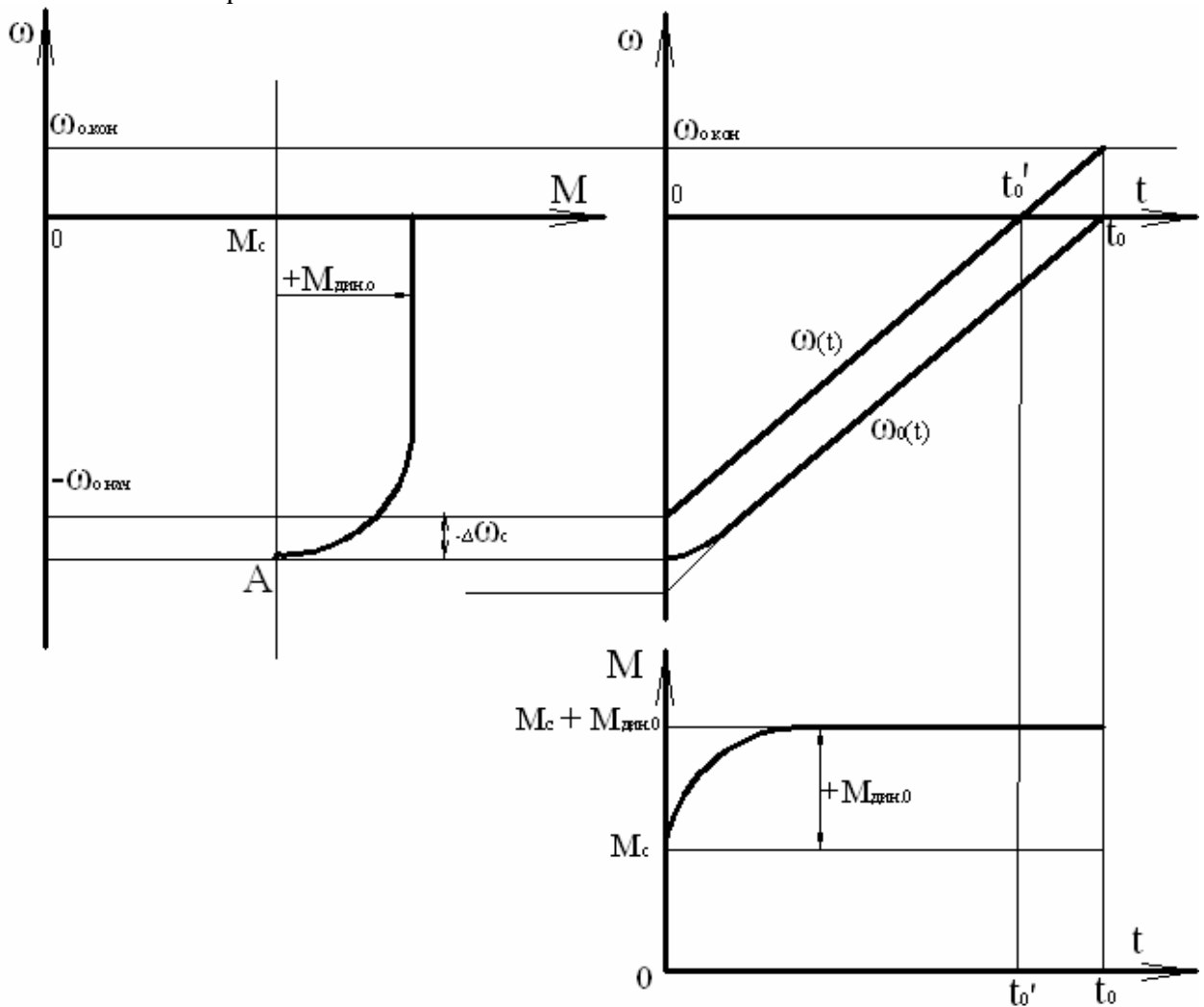


Рис.22. Торможение электропривода при опускании груза

12. Расчет потерь мощности в установившихся и переходных режимах электроприводов

Потери мощности в установившихся и переходных процессах электроприводов зависят от системы электропривода и способа управления. Рассмотрим эти потери применительно к системам электроприводов, которые применяются в курсовом проектировании.

12.1. Расчет потерь мощности в нерегулируемом электроприводе с асинхронным короткозамкнутым двигателем.

Определим сначала составляющие потерь мощности для номинального режима (рис. 23):

$$\Delta P_{ном} = \Delta P_{пост.ном} + \Delta P_{пер.ном}, \quad (232)$$

где
$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном}(1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}},$$

$$\Delta P_{пер.ном} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) M_{ном} (\omega_0 - \omega_{ном}), \quad (233)$$

$$\Delta P_{пост.ном} = \Delta P_{ном} - \Delta P_{пер.ном}, \quad (234)$$

$$\Delta P_{пост.ном} = \Delta P_{ст.ном} + \Delta P_{мх.ном} + \Delta P_{\mu.ном}, \quad (235)$$

$$\Delta P_{ст.ном} = \Delta P_{ст.1ном} (1 + S_{ном}^{1,5}), \quad (236)$$

$$\Delta P_{ст.1ном} = (0,15 - 0,25) \Delta P_{ном}, \quad (237)$$

$$\Delta P_{мх.ном} = (0,02 - 0,1) \Delta P_{ном}, \quad (238)$$

$$\Delta P_{\mu.ном} = 3 I_{\mu.ном} R_1, \quad (239)$$

$$I_{\mu.ном} \approx I_{1.ном} \sqrt{1 - \cos \varphi_{ном}}, \quad (240)$$

$\omega_0, \omega_{ном}$ - синхронная и номинальная угловые скорости АД;

$S_{ном}$ - номинальное скольжение АД;

R_1, R_2' - активные сопротивления фазы статора и ротора (приведенные);

$I_{\mu.ном}$ - номинальное значение намагничивающего тока АД;

$\Delta P_{ст.1ном}$ - номинальные потери мощности в стали статора;

$\Delta P_{мх.ном}$ - номинальные механические потери мощности;

$\Delta P_{пост.ном}$ - номинальные постоянные потери мощности;

$\Delta P_{пер.ном}$ - номинальные переменные потери мощности;

$M_{ном}$ - номинальный электромагнитный момент, который в первом приближении может быть принят равным номинальному моменту на валу двигателя.

Для асинхронного короткозамкнутого двигателя можно принять, что постоянные потери мощности примерно равны номинальным:

$$\Delta P_{пост} \approx \Delta P_{пост.ном}.$$

На участках нагрузочной диаграммы, где АД работает с установившейся скоростью ω_c , соответствующей статическому моменту M_c , переменные потери мощности вычисляются по формуле

$$\Delta P_{пер} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) M_c (\omega_0 - \omega_c). \quad (241)$$

В переходных процессах переменные потери мощности рассчитываются таким образом

$$\Delta P_{пер}(t) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) M(t) [\omega_0 - \omega(t)], \quad (242)$$

где $M(t)$, $\omega(t)$ – электромагнитный момент и угловая скорость ротора АД в данный момент времени t .

Зависимость потерь мощности от времени

$$\Delta P(t) = \Delta P_{пост.ном} + \Delta P_{пер}(t) \quad (243)$$

рассчитывается и строится за цикл работы механизма. Она используется затем при проверке АД по нагреву методом средних потерь.

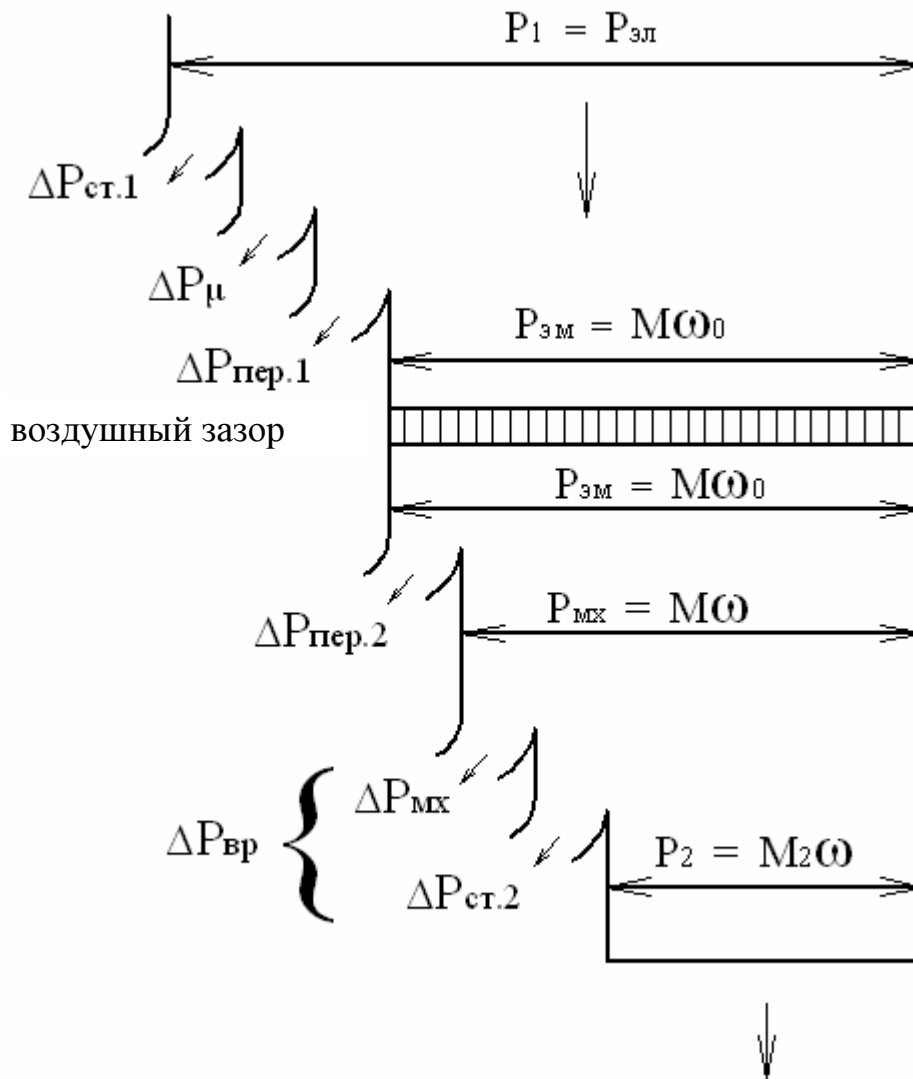


Рис.23. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

12.2. Расчет потерь мощности в электроприводе с асинхронным двигателем с фазным ротором.

Энергетическая диаграмма остается прежней (см. рис.23), однако, переменные потери в цепи ротора $\Delta P_{пер.2}$ распределяются между обмоткой ротора и реостатом:

$$\Delta P_{пер.2} = \Delta P_{пер.2}(АД) + \Delta P_{пер.2}(R_{2,\delta}). \quad (244)$$

Рассматривая механические характеристики линеаризованными (см.п.10.1), можем найти:

$$\Delta P_{пер.2}(АД) = \frac{M^2}{\beta_e}, \quad (245)$$

$$\Delta P_{пер.2}(R_{2,\delta}) = \frac{M^2}{\beta_e} \cdot \frac{R_{2,\delta}}{R_{2,0}}, \quad (246)$$

где

$$\beta_e = \frac{M_{ном}}{\Delta \omega_{ном}} = \frac{M_{ном}}{\omega_0 S_{ном}},$$

β_e - модуль жесткости естественной линеаризованной механической характеристики АД;

$R_{2,0}, R_{2,\delta}$ - собственное и добавочное сопротивление фазы ротора;

M – текущее значение электромагнитного момента.

Для асинхронного двигателя с фазным ротором можно также принять $\Delta P_{пост} \approx \Delta P_{пост.ном}$. Тогда суммарные потери мощности, которые нагревают статор и ротор, можно вычислить по выражениям:

- для установившегося режима

$$\Delta P_{АД} = \Delta P_{пост.ном} + \left(1 + \frac{R_1}{R'_{2,0}}\right) \cdot \frac{M_c^2}{\beta_e}, \quad (247)$$

- для переходного процесса

$$\Delta P_{АД}(t) = \Delta P_{пост.ном} + \left(1 + \frac{R_1}{R'_{2,0}}\right) \cdot \frac{M^2(t)}{\beta_e}, \quad (248)$$

где $R'_{2,0}$ - приведенное к статору собственное активное сопротивление фазы ротора;

$M(t)$ – текущее значение электромагнитного момента АД в момент времени t .

Кривая $\Delta P_{АД}(t)$ используется затем для проверки двигателя по нагреву методом средних потерь.

12.3. Расчет потерь мощности в электроприводе по системе ИРС-АД.

Потери мощности, определяющие нагрев статора и ротора АД, рассчитываются по формулам (247) и (248).

Потери мощности, которые выделяются в добавочное сопротивление R_δ ротора (см.рис.10), можно определить по выражению

$$\Delta P_{пер.2}(R_\delta) = M(\omega_0 - \omega) - \frac{M^2}{\beta_e}. \quad (249)$$

12.4. Расчет потерь мощности асинхронного двигателя при частотном управлении по законам $\psi_l = const$ и $\psi_m = const$.

При переменной частоте изменяются составляющие постоянных потерь мощности АД:

$$\Delta P_{ст.1} = \Delta P_{ст.1ном} \cdot \alpha^{1,5}, \quad (250)$$

$$\Delta P_{мх} = \Delta P_{мх.ном} \cdot \alpha^2, \quad (251)$$

где

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1ном}},$$

$\Delta P_{ст.1ном}$ определяется по формуле (237), а $\Delta P_{мх.ном}$ - по (238).

При постоянном потокоцеплении потери мощности ΔP_μ тоже остаются постоянными и рассчитываются по (239).

В переходном процессе при линейном изменении относительной частоты α от α_1 до α_2 (рис.24) можно найти средние потери в стали статора

$$\Delta P_{ст.1,ср} = 0,4\Delta P_{ст.1ном} \frac{\alpha_2^{5/2} - \alpha_1^{5/2}}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (252)$$

и средние механические потери

$$\Delta P_{мх.ср} = \Delta P_{мх.ном} \frac{\alpha_2^2 + \alpha_1\alpha_2 + \alpha_1^2}{3} . \quad (253)$$

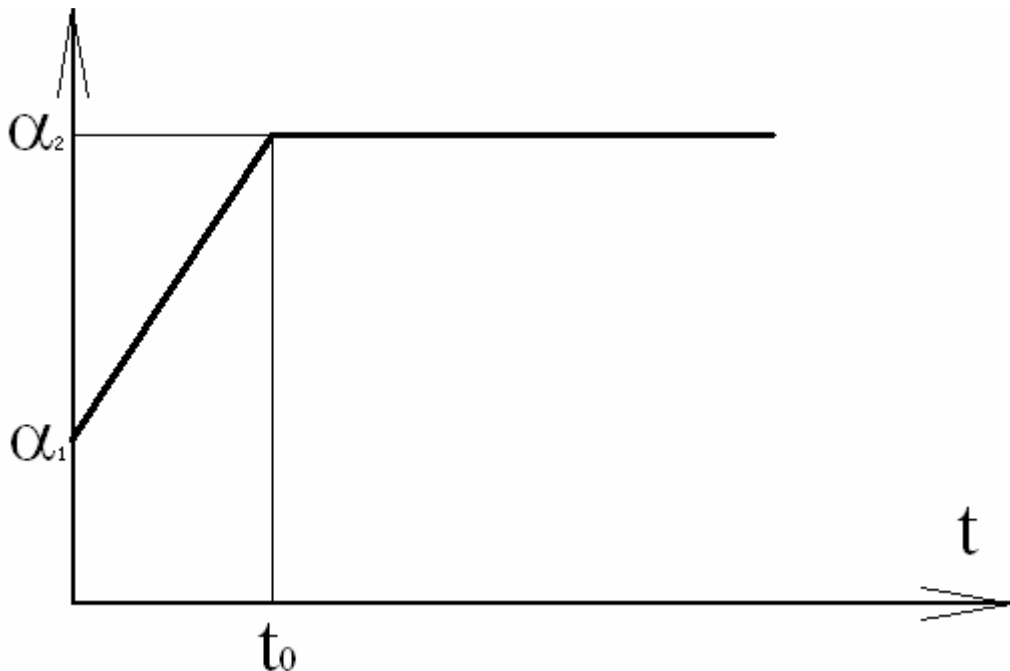


Рис.24. Линейное изменение относительной частоты в переходном процессе

В установившемся режиме системы ПЧ-АД переменные потери мощности в асинхронном двигателе рассчитываются по выражению

$$\Delta P_{пер} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \cdot \frac{M_c^2}{\beta}, \quad (254)$$

где
$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_{0ном} S_{ак}},$$

для $\psi_1 = \text{const}$:

M_k рассчитывается по (157);

$S_{ак}$ — (158);

для $\psi_m = \text{const}$

M_k рассчитывается по (168),

$S_{ак}$ — (169),

β - модуль жесткости линеаризованной механической характеристики АД для принятого закона частотного управления.

В переходном процессе, когда изменяются синхронная скорость $\omega_0(t)$, скорость ротора $\omega(t)$ и электромагнитный момент двигателя $M(t)$, как это рассмотрено в п.11.4, переменные потери мощности рассчитываются таким образом

$$\Delta P_{пер}(t) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \cdot M(t) \cdot [\omega_0(t) - \omega(t)]. \quad (255)$$

Суммарные потери мощности, нагревающие АД, рассчитываются по выражению

$$\Delta P(t) = \Delta P_{CT.1}(t) + \Delta P_{мх}(t) + \Delta P_{\mu} + \Delta P_{пер}(t). \quad (256)$$

12.5. Расчет потерь мощности в двигателе постоянного тока в системе ТП-ДПТ НВ.

Составляющие потерь мощности в двигателе постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения показаны на энергетической диаграмме рис.25.

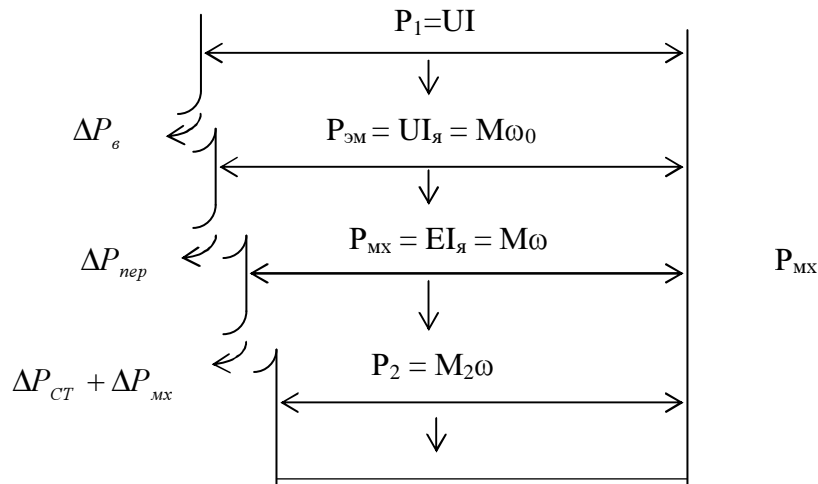


Рис. 25. Энергетическая диаграмма ДПТ НВ

Суммарные потери мощности складываются из постоянных и переменных

$$\Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер}.$$

Постоянные потери мощности включают :

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{\epsilon} + \Delta P_{мх} + \Delta P_{СТ},$$

где

ΔP_{ϵ} - потери мощности на возбуждение;

$\Delta P_{мех}$ - механические потери;

$\Delta P_{СТ}$ - потери в стали.

Переменные потери мощности обусловлены протеканием тока по обмотке якоря

$$\Delta P_{пер} = I_{я}^2 R_{я}, \quad (257)$$

где $R_{я}$ - сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии.

В регулируемом электроприводе ТП-ДПТ НВ при номинальном магнитном потоке постоянные потери мощности рассчитываются по выражению

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{\epsilon, ном} + (\Delta P_{мх} + \Delta P_{СТ})_{ном} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (258)$$

где

$$\Delta P_{\epsilon, ном} = I_{\epsilon, ном}^2 R_{\epsilon, 75^\circ}, \quad (259)$$

$$(\Delta P_{мх} + \Delta P_{СТ})_{ном} = \Delta P_{пост, ном} - \Delta P_{\epsilon, ном}, \quad (260)$$

$$\Delta P_{пост, ном} = \Delta P_{ном} - \Delta P_{пер, ном}, \quad (261)$$

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}}, \quad (262)$$

$$\Delta P_{пер, ном} = I_{я, ном}^2 R_{я, 75^\circ}, \quad (263)$$

$$I_{я.ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \eta_{ном}} - I_{в.ном}, \quad (264)$$

$$I_{в.ном} = \frac{U_{ном}}{R_{в.75^\circ}}, \quad (265)$$

ω - текущее значение угловой скорости;

$\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость двигателя;

$R_{в.75^\circ}$, $R_{я.75^\circ}$ - сопротивление обмотки возбуждения и якоря в нагретом состоянии;

$P_{ном}$, $U_{ном}$, $\eta_{ном}$ – номинальные мощность, напряжение и к.п.д. двигателя.

Суммарные потери мощности ΔP нагревают электродвигатель. Рассчитав и построив кривую $\Delta P(t)$ за цикл, можно найти средние потери мощности и сравнить их с номинальными.

13. Окончательная проверка двигателя по нагреву и перегрузочной способности

Расчет переходных процессов электродвигателя за цикл и построение кривых $M(t)$ и $\Delta P(t)$ позволяет провести окончательную проверку двигателя по нагреву и перегрузочной способности. Метод средних потерь является общим методом, поэтому рекомендуется рассчитать средние потери мощности за цикл независимо от системы электропривода

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{ox,i} t_i} \quad (266)$$

и затем сравнить их с номинальными.

Если условие

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном} \quad (ПВ = 100\%) \quad (267)$$

выполняется, то средняя температура двигателя не будет превышать допустимую.

Рекомендуется также дополнительно проверить двигатель по нагреву методом эквивалентного момента, где магнитный поток постоянный, и методом эквивалентного тока, где он переменный.

Проверку по перегрузочной способности определяют сопоставлением наибольшего электромагнитного момента в кривой $M(t)$ с допустимым кратковременным моментом для данного электродвигателя:

$$M_{max} \leq M_{доп. max} \quad (268)$$

где

$$M_{доп. max} = \lambda_m M_{ном};$$

λ_m – кратность максимального момента, которая обычно указывается в справочных данных для конкретного типа электродвигателя.

Если для ДПТ НВ величина λ_m не указана, то ее можно принимать, равной 2 – 2,5.

Для асинхронных двигателей следует учитывать допустимое снижение напряжения на 10%, тогда

$$M_{доп} = 0,81 \lambda_m M_{ном}.$$

14. Выбор преобразователя напряжения или частоты для регулируемого электропривода

Выбор преобразователя для регулируемого электропривода выполняется по номинальному напряжению и току на входе и выходе, максимально допустимому моменту и току в переходном процессе:

$$\left. \begin{aligned} I_{\max, np.} &\geq I_{\max, \partial} , \\ M_{\max, np.} &\geq M_{\max} , \end{aligned} \right\} \quad (269)$$

где $I_{\max, np.}$, $M_{\max, np.}$ - максимально допустимые ток и момент в течение указываемого в данных преобразователя времени;

$I_{\max, \partial}$, M_{\max} - максимальные ток и момент двигателя в цикле работы.

Данные некоторых современных преобразователей приведены в Приложении.

15. Расчет расходуемой и потребляемой электродвигателем энергии за цикл работы механизма. Цикловой к.п.д. электродвигателя

В рассматриваемых системах электропривода возможна работа в установившемся и переходных режимах с направлением энергии как к электродвигателю, так и от него.

При работе двигателя в рекуперативном режиме, энергия, за вычетом потерь, возвращается в сеть при двухсторонней проводимости преобразователя, уменьшая потребление энергии из сети электроэнергии. Однако преобладающее число современных преобразователей частоты и напряжения из-за наличия неуправляемого выпрямителя на входе имеют одностороннее направление энергии, что обуславливает использование резистивного торможения, когда рекуперированная энергия рассеивается в двигателе, преобразователе и добавочном сопротивлении. В сеть энергия не возвращается. Поэтому в данном курсовом проекте, где используются, в основном, преобразователи с резистивным торможением, потребляемую электромагнитную энергию за цикл работы механизма будем рассчитывать по формуле

$$A_{эм} = \int_0^{t_y} |P_{эм}(t)| dt = \int_0^{t_y} |M(t) \cdot \omega_0(t)| dt . \quad (270)$$

Полную механическую энергию, затраченную на выполнение работы электродвигателем, тоже будет считать, как это принято, положительной

$$A_{мх} = \int_0^{t_y} |P_{мх}(t)| dt = \int_0^{t_y} |M(t) \cdot \omega(t)| dt . \quad (271)$$

Теперь, исходя из рассматриваемых в проекте систем электропривода, дадим выражение для расчета потребляемой A_1 и затраченной A_2 энергии за цикл:

1) Нерегулируемый электропривод с асинхронным короткозамкнутым двигателем

$$A_1 = \int_0^{t_y} |M(t) \omega_0| dt + 3R_1 \int_0^{t_y} I_1^2(t) dt + \Delta P_{СТ} \cdot t_p , \quad (272)$$

$$A_2 = \int_0^{t_y} |M(t) \omega(t)| dt - \left[\Delta P_{мх.ном} + \Delta P_{СТ.1ном} \cdot S^{1,5}_{ном} \right] \cdot t_p , \quad (273)$$

где t_p – время работы (включенного состояния АД) за цикл.

2) Регулируемый асинхронный двигатель с фазным ротором и ступенчатым регулированием сопротивления, а также система ИРС – АД:

$$A_1 = \int_0^{t_y} |M(t) \cdot \omega_0| dt + \frac{R_1}{\beta_e R'_{2,0}} \int_0^{t_y} M^2(t) dt + \Delta P_{CT. \lambda_{ном}} t_p, \quad (274)$$

A_2 вычисляется по (273).

3) Система ПЧ-АД, $\psi = \text{const}$:

$$A_1 = \int_0^{t_y} |M(t) \omega_0(t)| dt + \frac{R_1}{\beta R'_{2,0}} \int_0^{t_y} M^2(t) dt + \int_0^{t_y} \Delta P_{CT}(t) dt + \Delta P_{\mu} \cdot t_p, \quad (275)$$

$$A_2 = \int_0^{t_y} |M(t) \omega(t)| dt - \int_0^{t_w} \Delta P_{мх}(t) dt, \quad (276)$$

где
$$\beta = \frac{2M_{\kappa}}{\omega_{0ном} S_{ак}},$$

M_{κ} рассчитывается по (168)
 $S_{ак}$ рассчитывается по (169) } для $\psi_m = \text{const}$,

M_{κ} рассчитывается по (157)
 $S_{ак}$ рассчитывается по (158) } для $\psi_1 = \text{const}$.

4) Система ТП-ДПТ НВ

$$A_1 = \int_0^{t_y} |M(t) \omega_0(t)| dt + \Delta P_{\epsilon} t_{ц}, \quad (277)$$

$$A_2 = \int_0^{t_y} |M(t) \omega(t)| dt + \frac{(\Delta P_{мх} + \Delta P_{CT})_{ном}}{\omega_{ном}^2} \int_0^{t_y} \omega^2(t) dt. \quad (278)$$

Цикловой к.п.д. электродвигателя, как коэффициент использования электроэнергии, представляет собой отношение

$$\eta_{ц} = \frac{A_2}{A_1}. \quad (279)$$

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

электродвигателей, редукторов, управляемых преобразователей напряжения постоянного тока и преобразователей частоты.

Таблица 1

Технические данные асинхронных двигателей серии
4А закрытого исполнения (1Р44) напряжение 380/220 В

Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	$S_{\text{ном}}$, %	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{II}}}{M_{\text{ном}}}$	$S_{\text{к}}$ %	$\frac{I_{\text{II}}}{I_{\text{ном}}}$	$J_{\text{о}},$ кгм ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронная частота вращения 3000 об/мин									
4АА50А2У3	0,09	8,6	60	0,7	2,2	2	50	5	$2,5 \cdot 10^{-5}$
4АА50В2У3	0,12	9,7	63	0,7	2,2	2	51	5	$2,8 \cdot 10^{-5}$
4АА56А2У3	0,18	8	66	0,76	2,2	2	46	5	$4,2 \cdot 10^{-4}$
4АА56В2У3	0,25	8	68	0,77	2,2	2	51	5	$4,7 \cdot 10^{-4}$
4А63А2У3	0,37	8,3	70	0,86	2,2	2	50,5	5	$7,6 \cdot 10^{-4}$
4А63В2У3	0,55	8,5	73	0,86	2,2	2	54,5	5	$9 \cdot 10^{-4}$
4А71А2У3	0,75	5,3	77	0,87	2,2	2	38	5,5	$9,7 \cdot 10^{-4}$
4А71В2У3	1,1	6,3	77,5	0,87	2,2	2	39	5,5	$1,1 \cdot 10^{-3}$
4А80А2У3	1,5	5	81	0,85	2,2	2	35,5	6,5	$1,8 \cdot 10^{-3}$
4А80В2У3	2,2	5	83	0,87	2,2	2	38	6,5	$2,1 \cdot 10^{-3}$
4А90L2У3	3	5,4	84,5	0,88	2,2	2	32,5	6,5	$3,5 \cdot 10^{-3}$
4А100S2У3	4	4	86,5	0,89	2,2	2	28	7,5	$5,9 \cdot 10^{-3}$
4А100L2У3	5,5	4	87,5	0,91	2,2	2	29	7,5	$7,5 \cdot 10^{-3}$
4А112M2У3	7,5	2,6	87,5	0,88	2,2	2	17	7,5	0,01
4А132M2У3	11	3,1	88	0,9	2,2	1,6	19	7,5	0,023
4А160S2У3	15	2,3	88	0,91	2,2	1,4	12	7,5	0,048
4А160M2У3	18,5	2,3	88,5	0,92	2,2	1,4	12,5	7,5	0,053
4А180S2У3	22	2	88,5	0,91	2,2	1,4	12,5	7,5	0,07
4А180M2У3	30	1,9	90,5	0,90	2,2	1,4	12,5	7,5	0,085
4А200M2У3	37	1,9	90	0,89	2,2	1,4	12,5	7,5	0,15
4А200L2У3	45	1,8	91	0,9	2,2	1,4	11,5	7,5	0,17
4А225M2У3	55	2,1	91	0,92	2,2	1,2	11	7,5	0,25
4А250S2У3	75	1,4	91	0,89	2,2	1,2	10	7,5	0,47
4А250M2У3	90	1,4	92	0,9	2,2	1,2	10	7,5	0,52
4А280S2У3	110	2	91	0,89	2,2	1,2	8,5	7	1,1
4А280M2У3	132	2	91,5	0,89	2,2	1,2	8,5	7	1,2
4А315S2У3	160	1,9	92	0,9	1,9	1	8,5	7	1,4
4А315M2У3	200	1,9	92,5	0,9	1,9	1	9	7	1,6
4А355S2У3	250	1,9	92,5	0,9	1,9	1	7	7	2,9
4А355M2У3	315	2	93	0,91	1,9	1	7,5	7	3,2
Синхронная частота вращения 1500 об/мин									
4АА50А4У3	0,06	8,1	50	0,6	2,2	2	58,5	5	$2,9 \cdot 10^{-5}$
4АА50В4У3	0,09	8,6	55	0,6	2,2	2	59	5	$3,3 \cdot 10^{-5}$
4АА56А4У3	0,12	8	63	0,66	2,2	2	49	5	$7,7 \cdot 10^{-4}$
4АА56В4У3	0,18	8,7	64	0,64	2,2	2	50,5	5	$7,9 \cdot 10^{-4}$
4АА63А4У3	0,25	8	68	0,65	2,2	2	48	5	$1,2 \cdot 10^{-3}$
4АА63В4У3	0,37	9	68	0,69	2,2	2	48	5	$1,4 \cdot 10^{-3}$
4А71А4У3	0,55	8,7	70,5	0,70	2,2	2	39	4,5	$1,3 \cdot 10^{-3}$
4А71В4У3	0,75	8,7	72	0,73	2,2	2	40	4,5	$1,4 \cdot 10^{-3}$
4А80А4У3	1,1	6,7	75	0,81	2,2	2	34	5	$3,2 \cdot 10^{-3}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4A80B4Y3	1,5	6,7	77	0,83	2,2	2	34,5	5	$3,3 \cdot 10^{-3}$
4A90L4Y3	2,2	5,4	80	0,83	2,2	2	33	6	$5,6 \cdot 10^{-3}$
4A100S4Y3	3	5,3	82	0,83	2,2	2	31	6,5	$8,7 \cdot 10^{-3}$
4A100L4Y3	4	5,3	84	0,84	2,2	2	31,5	6	0,011
4A112M4Y3	5,5	5	85,5	0,86	2,2	2	25	7	0,017
4A132S4Y3	7,5	3	87,5	0,86	2,2	2	19,5	7,5	0,028
4A132M4Y3	11	2,8	87,5	0,87	2,2	2	19,5	7,5	0,04
4A160S4Y3	15	2,7	89	0,88	2,2	1,4	16	7	0,1
4A160M4Y3	18,5	2,7	90	0,88	2,2	1,4	16	7	0,13
4A180S4Y3	22	2	90	0,9	2,2	1,4	14	7	0,19
4A180M4Y3	30	2	91	0,89	2,2	1,4	14	7	0,23
4A200M4Y3	37	1,7	91	0,9	2,2	1,4	10	7	0,37
4A200L4Y3	45	1,8	92	0,9	2,2	1,4	10	7	0,45
4A225M4Y3	55	2	92,5	0,9	2,2	1,2	10	7	0,64
4A250S4Y3	75	1,4	93	0,9	2,2	1,2	9,5	7	1,0
4A250M4Y3	90	1,3	93	0,91	2,2	1,2	9,5	7	1,2
4A280S4Y3	110	2,3	92,5	0,90	2	1,2	8,5	7	2,3
4A280M4Y3	132	2,3	93	0,9	2	1,2	6,5	6,5	2,5
4A315S4Y3	160	2	93,5	0,91	1,9	1	6,5	7	3,1
4A315M4Y3	200	1,7	94	0,92	1,9	1	5,0	7	3,6
4A355S4Y3	250	1,7	94,5	0,92	1,9	1	4,0	7	6,0
4A355M4Y3	315	1,7	94,5	0,92	1,9	1	4,0	7	7,0
Синхронная частота вращения 1000 об/мин									
4AA63A6Y3	0,18	11,5	56	0,62	2,2	2	55,5	4	0,0018
4AA63B6Y3	0,25	10,8	59	0,62	2,2	2	62,5	4	0,0022
4AA71A6Y3	0,37	8	64,5	0,69	2,2	2	49	4	0,0017
4AA71B6Y3	0,55	8	67,5	0,71	2,2	2	49	4	0,002
4A80A6Y3	0,75	8	69	0,74	2,2	2	37	4	0,0031
4A80B6Y3	1,1	8	74	0,74	2,2	2	38	4	0,0046
4A90L6Y3	1,5	6,4	75	0,74	2,2	2	31	5,5	0,0073
4A100L6Y3	2,2	5,1	81	0,73	2,2	2	25,5	5,5	0,013
4A112M6Y3	3	5,5	81	0,76	2,2	2	37	6	0,017
4A112MB6Y3	4	5,1	82	0,81	2,2	2	38	6	0,021
4A132S6Y3	5,5	4,1	85	0,8	2,2	2	36	7	0,04
4A132M6Y3	7,5	3,2	85,5	0,81	2,2	2	26	7	0,058
4A160S6Y3	11	3	86	0,86	2,0	1,2	15	6	0,14
4A160M6Y3	15	3	87,5	0,87	2	1,2	14	6	0,18
4A180M6Y3	18,5	2,7	88	0,87	2	1,2	13,5	6	0,22
4A200M6Y3	22	2,5	90	0,9	2	1,2	13,5	6,5	0,4
4A200L6Y3	30	2,3	90,5	0,9	2	1,2	13,5	6,5	0,45
4A225M6Y3	37	2	91	0,89	2	1,2	11,5	6,5	0,74
4A250S6Y3	45	1,5	91,5	0,89	2	1,2	9	7	1,2
4A250M6Y3	55	1,5	92	0,88	2	1,2	9,5	7	1,3
4A280S6Y3	75	2	92	0,88	1,9	1,2	8,3	7	2,9
4A280M6Y3	90	2	92,5	0,89	1,9	1,2	8,3	7	3,4
4A315S6Y3	110	2	93	0,9	1,9	1	8,2	7	4
4A315M6Y3	132	2	93,5	0,9	1,9	1	8,2	7	4,5
4A355S6Y3	160	1,8	93,5	0,9	1,9	1	6,5	7	7,3
4A355M6Y3	200	1,8	94	0,9	1,9	1	6,4	7	8,8

Таблица 2

Параметры схемы замещения асинхронных двигателей
серии 4А закрытого исполнения (IP44) – в относительных единицах

Тип	x_{μ}^*	R_1^*	x_1^*	R_2^*	x_2^*
Синхронная частота вращения 1500 об/мин					
4AA50A4Y3	1,2	0,16	0,17	0,22	0,17
4AA50B4Y3	1,2	0,13	0,16	0,21	0,17
4AA56A4Y3	1,2	0,18	0,087	0,15	0,15
4AA56B4Y3	1,3	0,18	0,090	0,16	0,17
4AA63A4Y3	1,4	0,15	0,082	0,14	0,17
4AA63B4Y3	1,4	0,17	0,086	0,14	0,18
4AA71A4Y3	1,6	0,13	0,086	0,11	0,20
4AA71B4Y3	1,5	0,11	0,084	0,11	0,20
4A80A4Y3	1,7	0,12	0,078	0,068	0,12
4A80B4Y3	1,9	0,12	0,078	0,069	0,12
4A90L4Y3	2,1	0,098	0,076	0,060	0,13
4A90S4Y3	2,2	0,078	0,079	0,053	0,13
4A100L4Y3	2,4	0,067	0,079	0,053	0,14
4A112M4Y3	2,8	0,064	0,078	0,041	0,13
4A132S4Y3	3,0	0,048	0,085	0,033	0,13
4A132M4Y3	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13
4A160M4Y3	4,0	0,047	0,086	0,025	0,13
4A160M4Y3	4,3	0,042	0,085	0,024	0,13
4A180S4Y3	4,0	0,041	0,080	0,021	0,12
4A180M4Y3	3,9	0,034	0,068	0,018	0,12
4A200M4Y3	4,4	0,039	0,086	0,018	0,14
4A200L4Y3	4,6	0,034	0,082	0,017	0,14
4A225M4Y3	4,2	0,027	0,086	0,015	0,14
4A250S4Y3	4,4	0,025	0,089	0,014	0,11
4A250M4Y3	5,0	0,024	0,093	0,014	0,12
4A280S4Y3	4,9	0,023	0,122	0,019	0,16
4A280M4Y3	4,5	0,021	0,115	0,018	0,15
4A315S4Y3	4,6	0,018	0,107	0,017	0,15
4A315M4Y3	4,1	0,014	0,086	0,014	0,12
4A355S4Y3	4,6	0,013	0,090	0,013	0,13
4A355M4Y3	5,7	0,012	0,099	0,014	0,14

Таблица 3

Параметры схемы замещения асинхронных двигателей
серии 4А закрытого исполнения (IP44) – в относительных единицах

Тип	x_{μ}^*	R_1^*	x_1^*	$R_2'^*$	$x_2'^*$
Синхронная частота вращения 3000 об/мин					
4AA50A2Y3	2,5	0,15	0,092	0,14	0,16
4AA50B2Y3	2,3	0,11	0,076	0,12	0,14
4AA56A2Y3	2,0	0,178	0,052	0,094	0,067
4AA56B2Y3	2,4	0,16	0,053	0,11	0,079
4AA63A2Y3	2,5	0,14	0,052	0,096	0,080
4AA63B2Y3	2,5	0,13	0,049	0,096	0,083
4A71A2Y3	2,6	0,12	0,052	0,064	0,077
4A71B2Y3	2,8	0,13	0,054	0,069	0,084
4A80A2Y3	2,5	0,084	0,051	0,049	0,081
4A80B2Y3	2,7	0,076	0,050	0,049	0,087
4A90L2Y3	3,4	0,072	0,057	0,047	0,10
4A100S2Y3	3,4	0,054	0,055	0,036	0,099
4A100L2Y3	3,8	0,050	0,054	0,036	0,11
4A112M2Y3	3,7	0,046	0,058	0,028	0,14
4A132M2Y3	4,2	0,040	0,061	0,025	0,12
4A160S2Y3	4,0	0,052	0,092	0,022	0,12
4A160M2Y3	4,5	0,049	0,092	0,022	0,12
4A180S2Y3	3,6	0,039	0,091	0,020	0,11
4A180M2Y3	3,8	0,030	0,073	0,018	0,11
4A200M2Y3	4,1	0,029	0,094	0,021	0,12
4A200L2Y3	4,9	0,027	0,088	0,020	0,13
4A225M2Y3	5,6	0,026	0,092	0,019	0,12
4A250S2Y3	4,8	0,021	0,080	0,015	0,13
4A250M2Y3	5,2	0,020	0,078	0,016	0,13
4A280S2Y3	3,8	0,017	0,097	0,013	0,10
4A280M2Y3	4,2	0,017	0,095	0,013	0,10
4A315S2Y3	5,0	0,015	0,093	0,012	0,12
4A315M2Y3	4,9	0,012	0,080	0,011	0,19
4A355S2Y3	5,7	0,013	0,091	0,011	0,10
4A355M2Y3	6,1	0,013	0,088	0,011	0,11

Таблица 4

Параметры схемы замещения асинхронных двигателей
серии 4А закрытого исполнения (IP44) – в относительных единицах

Тип	x_{μ}^*	R_1^*	x_1^*	$R_2'^*$	$x_2'^*$
Синхронная частота вращения 1000 об/мин					
4AA63A6Y3	1,3	0,24	0,15	0,22	0,18
4AA63B5Y3	1,4	0,18	0,13	0,21	0,19
4AA71A6Y3	1,3	0,17	0,12	0,15	0,16
4AA71B6Y3	1,4	0,16	0,11	0,15	0,17
4AA80A6Y3	1,5	0,16	0,12	0,120	0,20
4A80B6Y3	1,6	0,12	0,11	0,11	0,19
4A90L6Y3	1,8	0,11	0,11	0,088	0,21
4A100L6Y3	1,9	0,090	0,11	0,067	0,21
4A112MA6Y3	1,9	0,085	0,074	0,063	0,10
4A112MB6Y3	2,0	0,077	0,073	0,062	0,11
4A132S6Y3	1,9	0,067	0,072	0,041	0,11
4A132M6Y3	2,1	0,060	0,070	0,040	0,11
4A160S6Y3	3,0	0,073	0,11	0,030	0,15
4A160M6Y3	3,0	0,062	0,10	0,028	0,16
4A180M6Y3	2,9	0,056	0,11	0,026	0,13
4A200M6Y3	4,1	0,050	0,11	0,024	0,14
4A200L6Y3	3,7	0,046	0,12	0,022	0,13
4A225M6Y3	3,7	0,042	0,10	0,019	0,13
4A250S6Y3	3,8	0,037	0,090	0,015	0,14
4A250M6Y3	3,4	0,034	0,083	0,014	0,13
4A280S6Y3	3,7	0,032	0,12	0,021	0,13
4A280M6Y3	3,5	0,030	0,11	0,019	0,12
4A315S6Y3	3,9	0,026	0,10	0,018	0,12
4A315M6Y3	3,5	0,023	0,099	0,018	0,12
4A355S6Y3	3,8	0,020	0,10	0,015	0,14
4A355M6Y3	3,6	0,018	0,091	0,014	0,13

Таблица 5

Технические данные электродвигателей серии 4МТК
с короткозамкнутым ротором, ПВ = 40%, 380 В, 50 Гц

Тип	$J_{\partial},$ кгм ²	2р	$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/мин	$I_1,$ А	$\cos\varphi$	$\eta_{ном},$ %	$M_{max},$ Н·м	$M_{п},$ Н·м	$I_{п},$ А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4МТКF(Н)112L6	0,035	6	2,2	880	6,8	0,73	64	64	62	22,7
4МТКF(Н)112LB6	0,045	6	3,7	870	10,6	0,75	67	114	114	37,2
4МТКF(Н)132L6	0,09	6	5,5	900	13,6	0,75	74	155	145	57
4МТКF(Н)132LB6	0,11	6	7,5	900	18,3	0,7	76	225	216	79
4МТКF(Н)160L6	0,23	6	11	910	29	0,76	77,5	395	340	148
4МТКF(Н)160LB6	0,28	6	15	930	36,5	0,78	81	560	480	203

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4МТКF(H)200L6	0,57	6	22	935	51	0,79	82,5	760	706	275
4МТКF(H)200LB6	0,68	6	30	935	70	0,78	83,5	980	932	380
4МТКF(H)160L8	0,23	8	7,5	690	24	0,71	73,5	310	260	91,5
4МТКF(H)160LB8	0,29	8	11	700	33,5	0,74	76,5	500	420	141
4МТКF(H)200L8	0,62	8	15	695	40	0,71	80	657	638	185
4МТКF(H)200LB8	0,74	8	2,2	700	60	0,69	80,5	981	932	295
4МТКН225М8	1,07	8	30	700	68	0,77	84	1128	1128	336
4МТКН225L8	1,42	8	37	710	86	0,78	84,5	1470	1390	460

Таблица 6

Расчетные данные асинхронных короткозамкнутых двигателей серии 4МТК, 380 В, 50 Гц

Тип 4МТКF, 4МТКН	I_0 , А	R_k , Ом	x_k , Ом	$k_r = k_e^2$	$t^0 = 20^0C$ R_1 , Ом
112L6	4,81	9,66	5,87	5,9	2,97
112LB6	7,97	5,7	3,34	2,44	1,55
132L6	8	3,36	2,87	1,97	1,07
132LB6	10,1	2,37	1,91	1,2	0,68
160L6	20,4	1,15	1,18	0,695	0,35
160LB6	22,7	0,81	0,864	0,39	0,236
200L6	31,3	0,5	0,63	0,319	0,235
200 LB6	42,1	0,36	0,455	0,173	0,132
160L8	16,4	1,81	2,24	1,67	0,48
160LB8	25,2	1,1	1,43	0,79	0,265
200L8	25,4	0,77	0,9	0,546	0,235
200 LB8	43,3	0,47	0,58	0,293	0,14
225M8	38,8	0,45	0,57	0,386	0,14

Таблица 7

Технические данные односкоростных двигателей серии МАП в режиме работы 1 час

Тип электродвигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$\cos \varphi_0$	M_{max} , Нм	$M_{\text{п}}$, Нм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МАП121-4	2,4	380/220	6,0/10,4	1450	80	0,75	0,103	55	42
МАП122-4	4,4	380/220	10,5/18,2	1420	82	0,8	0,091	94	86
МАП211-4	7,0	380/220	15,3/26,5	1440	86	0,82	0,082	159	118
МАП421-4	10,0	380/220	19,2/33,2	1425	87	0,9	0,082	216	157
МАП421-4	14,0	380/220	28,0/48,5	1425	85	0,87	0,077	314	255
МАП422-4	20,0	380/220	39,5/68,5	1450	89	0,88	0,078	549	373
МАП511-4	34,0	380/220	61,0/105	1450	91	0,92	0,083	883	785
МАП621-4	67,0	380/220	125/215	1455	93	0,9	0,07	1619	981
МАП622-4	90,0	380	165	1435	93	0,91	0,125	2452	1864
Синхронная скорость вращения 1000 об/мин									
МАП121-6	1,2	380/220	4,6/8,0	890	66	0,64	0,129	41	41
МАП122-6	2,2	380/220	8,0/13,8	890	69	0,61	0,10	83	83
МАП211-6	4,0	380/220	11,8/20,5	905	84	0,67	0,089	147	147
МАП421-6	8,0	380/220	22,3/38,6	925	80	0,68	0,088	353	353
МАП422-6	15,0	380/220	36/62,2	880	79	0,8	0,073	540	540
МАП511-6	25,0	380/220	49,5/85,5	930	89	0,9	0,075	834	589
МАП621-6	50,0	380/220	100/173	960	90	0,85	0,065	1619	1275
МАП622-6	65,0	380/220	130/225	970	89	0,85	0,068	2650	1570

Продолжение таблицы 7

Тип электро- двигателя	I_n , А	R_1 , Ом	R'_2 , Ом	x_1 , Ом	x'_2 , Ом	$I_{ор}$, А	$I_{оа}$, А	ΔP_0 , Вт	$\Delta P_{ст}$, Вт	GD^2 , кгм ²
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
МАП121-4	37/64	2,46	1,675	2,83	1,66	4,07	0,42	277	155	0,07
МАП122-4	61/105	1,3	1,045	1,76	1,09	5,25	0,478	315	207	0,12
МАП211-4	100/173	0,628	0,64	1,4	0,855	7,95	0,655	432	312	0,21
МАП421-4	130/225	0,439	0,541	0,914	0,473	7,1	0,586	387	320	0,5
МАП421-4	185/320	0,276	0,387	0,653	0,34	11,3	0,875	577	463	0,5
МАП422-4	320/555	0,168	0,20	0,387	0,198	15,4	1,21	797	677	0,8
МАП511-4	550/865	0,076	0,093	0,256	0,115	19,5	1,63	1080	980	2,3
МАП621-4	1000/1720	0,032	0,053	0,152	0,069	41,6	2,92	1921	1755	4,45
МАП622-4	1510	0,062	0,096	0,273	0,128	28,3	3,56	2350	2200	5,8
Синхронная скорость вращения 1000 об/мин										
МАП121-6	15,5/26,8	4,55	7,65	5,1	3,12	3,68	0,475	313	128	0,07
МАП122-6	28/48,5	1,556	4,44	3,01	1,84	5,95	0,595	392	198	0,12
МАП211-6	48/83	0,877	2,36	2,12	1,345	8,58	0,765	505	312	0,21
МАП421-6	115/200	0,438	0,97	0,888	0,442	15,9	1,4	923	590	0,5
МАП422-6	160/277	0,258	0,80	0,612	0,308	19,15	1,41	930	645	0,8
МАП511-6	280/485	0,146	0,185	0,524	0,211	16,3	1,23	811	695	2,3
МАП621-6	700/1210	0,053	0,07	0,207	0,089	44,0	2,87	1890	1580	4,45
МАП622-6	1000/1730	0,03	0,05	0,141	0,065	57,3	3,89	2565	2220	5,8

Таблица 8

Технические данные крановых электродвигателей серии 4 МТФ(Н) с фазным ротором:
380 / 220 В, 50 Гц, ПВ = 40 %

Тип	2p	P _{ном} , кВт	n _{ном} , об/мин	I _{1ном} , А	cos φ _{ном}	I _{2ном} , А	U _{2ном} , В	M _{max} , Нм	J _δ , кгм ²	R ₁ при t=20°С, Ом	η _{ном} , %	R ₂ при t=20°С, Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4МТФ(Н)112L6	6	2,2	810	7,2	0,76	11	144	55	0,035	2,97	64	0,565
4МТФ(Н)112LB6	6	3,7	900	11,2	0,79	13,8	190	88	0,045	1,55	70	0,462
4МТФ(Н)132L6	6	5,5	915	14,8	0,74	18,3	213	135	0,09	1,07	74	0,306
4МТФ(Н)132L6B6	6	7,5	935	18,2	0,77	20,7	242	190	0,11	0,68	77	0,3
4МТФ(Н)160L6	6	11	910	32	0,76	41	179	325	0,23	0,35	79	0,072
4МТФ(Н)160L6B6	6	15	930	39	0,77	48	213	460	0,28	0,236	81	0,073
4МТФ(Н)200L6	6	22	935	55	0,79	60	235	638	0,57	0,235	82	0,054
4МТФ(Н)200LB6	6	30	935	75	0,78	73	235	932	0,68	0,132	84	0,04
4МТФ(Н)225M6	6	37	965	78	0,818	77	293	1000	0,9	0,1	84,5	0,048
4МТН225L6	6	55	970	115	0,9	115	290	1530	1,02	0,053	88	0,026
4МТН280S6	6	75	970	142	0,89	178	270	2160	3,3	0,041	86	0,019
4МТН280M6	6	110	975	205	0,89	160	420	3490	4,1	0,025	88	0,024
4МТФ(Н)160L8	8	7,5	695	25	0,73	22	227	248	0,23	0,48	73	0,095
4МТФ(Н)160LB8	8	11	705	38	0,74	39	185	400	0,29	0,265	76	0,096
4МТФ(Н)200L8	8	15	710	42	0,71	48,8	206	569	0,62	0,235	79	0,082
4МТФ(Н)200LB8	8	22	715	57	0,7	59	241	800	0,74	0,14	80,5	0,068
4МТН225M8	8	30	720	74,6	0,72	71	252	1030	1,07	0,14	83	0,051
4МТН225L8	8	37	725	87,4	0,74	79	302	1390	1,43	0,1	86	0,049
4МТН280S8	8	55	720	112	0,84	170	196	2160	4,3		83	
4МТН280M8	8	75	725	154	0,82	165	277	2940	5,2		86	
4МТН280L8	8	90	730	179	0,84	162	355	3470	6,3		86	
4МТН355S8	8	132	710	270	0,85	-	-	-	-	-	-	
4МТН280S10	10	45	576	103	0,76	146	181	1940	4,3	0,06	85	0,017

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4MTH280M10	10	60	580	124	0,75	135	239	2670	5,2	0,047	85	0,021
4MTH280L10	10	75	582	166	0,77	142	308	3480	6,3	0,031	87	0,024
4MTH355S10	10	110	584	266	0,7	250	272	4560	10,2	0,019	89	0,012
4MTH355M10	10	132	585	315	0,68	250	327	5690	12,8	0,014	89	0,014
4MTH355L10	10	160	586	392	0,61	245	408	7310	15	0,012	90,3	0,015

Расчетные данные электродвигателей серии 4МТ
с фазным ротором: 380 В, 50 Гц

Типы 4МТФ, 4МТН	I_0 , А	$\cos \varphi_0$	x_1 , Ом	σ_1	x_2'' , Ом	$\kappa_e^2 = \kappa_r$
112L6	5,51	0,135	3,11	1,084	3,95	5,9
112LB6	7,7	0,125	1,95	1,073	3,2	3,84
132L6	8,96	0,13	1,3	1,056	2,1	2,82
132LB6	11,1	0,11	0,98	1,053	1,44	2,22
160L6	23,5	0,12	0,59	1,087	1,01	4,31
160LB6	25,6	0,1	0,42	1,051	0,67	2,89
200L6	39,7	0,08	0,27	1,052	0,55	2,37
200LB6	37,3	0,077	0,33	1,049	0,34	1,96
225M6	37,2	0,069	0,23	1,076	0,31	1,45
225L6	55,9	0,07	0,14	1,084	0,197	1,21
280S6	51,1	0,052	0,13	1,071	0,125	1,38
280M6	70	0,05	0,08	1,076	0,083	1
160L8	19,2	0,118	1,08	1,1	1,53	2,37
160LB8	29,9	0,101	0,67	1,1	1,02	3,5
200L8	29,8	0,083	0,51	1,074	0,725	2,96
200LB8	37,3	0,08	0,31	1,076	0,47	2,03
225M8	46,7	0,07	0,23	1,052	0,42	1,65
225L8	52,3	0,08	0,17	1,04	0,31	1,42
280S10	57,8	0,08	0,21	1,06	0,24	3,72
280M10	70,6	0,06	0,15	1,06	0,19	2,1
280L10	89,5	0,06	0,11	1,06	0,146	1,26
355S10	155	0,042	0,078	1,06	0,134	1,74
355M10	183	0,044	0,064	1,06	0,11	1,21
355L10	247	0,042	0,048	1,06	0,085	0,78

Технические данные электродвигателей постоянного тока
серии 2П

P _{ном} , кВт	U _{ном} , В	n, об/мин		η _{ном} , %	Сопротивления обмотки при 15°С, Ом			J _д , кгм ²
		n _{ном}	n _{мах}		R _я	R _{д.н.}	R _ε	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип 2ПО132МУХЛ4, 2ПО132МГУХЛ4								
1,3	110	800	3000	65,5	0,472	0,308	$\frac{175}{46,5}$	0,038
	220	800	2500	66,5	1,88	1,39		
	440	800	1850	66,5	9,1	5,3		
1,8	110	1000	4000	70	0,346	0,224	$\frac{175}{46,5}$	0,038
	220	1000	3000	64,5	1,38	1		
2,8	110	1500	4000	75,5	0,14	0,094	$\frac{175}{46,5}$	0,038
	220	1500	4000	76,5	0,601	0,454		
	440	1500	3750	77	253	1,58		
4,5	110	2200	4000	75,5	0,067	0,049	$\frac{175}{46,5}$	0,038
	220	2240	4000	76,5	0,271	0,204		
	440	2240	4000	77	1,08	0,763		
5,5	220	3000	4000	83	0,185	0,148	$\frac{175}{46,5}$	0,038
	440	3000	4000	83	0,74	0,486		
Тип 2ПО132ЛУХЛ4, 2ПО132ЛГУХЛ4								
1,6	110	800	3000	71	0,322	0,27	$\frac{138}{37,4}$	0,048
	220	750	3000	71	1,57	1,06		
	440	750	1850	70,5	6,42	4,45		
2,2	110	1000	4000	74	0,22	0,196	$\frac{138}{37,4}$	0,048
	220	1000	3000	75,5	0,88	0,64		
	440	1000	2500	75,5	3,84	2,66		
3,4	110	1500	4000	79	0,12	0,089	$\frac{138}{37,4}$	0,048
	220	1600	4000	81	0,412	0,296		
	440	1500	3750	80	1,98	1,38		
5,3	110	2200	4000	83,5	0,055	0,039	$\frac{138}{37,4}$	0,048
	220	2200	4000	83,5	0,22	0,196		
	440	2240	4000	84,5	0,88	0,64		
6,7	220	3000	4000	86	0,12	0,089	$\frac{138}{37,4}$	0,048
	440	3000	4000	86,5	0,518	0,323		
Тип 2ПО160МУХЛ4, 2ПО160МГУХЛ4								
2,5	110	750	3000	75	0,235	0,151	$\frac{148}{40,7}$	0,083
	220	750	2500	76,5	0,836	0,647		
	440	800	1850	77,5	3,15	2,21		

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,2	110	1120	4000	80,5	0,11	0,078	$\frac{148}{40,7}$	0,083
	220	1000	3000	79,5	0,516	0,407		
	440	1120	2500	81	1,78	1,44		
6	220	1600	4000	84,5	0,235	0,151	$\frac{148}{40,7}$	0,083
	440	1500	3750	84,5	0,99	0,72		
8	220	2240	4000	86,5	0,145	0,101	$\frac{148}{40,7}$	0,083
	440	2200	4000	86,5	0,51	0,407		
9,5	110	3000	4000	86	0,02	0,018	$\frac{148}{40,7}$	0,083
	220	3000	4000	87,5	0,081	0,056		
	440	3000	4000	88	0,278	0,175		
Тип 2ПО160L, 2ПО160ЛГ								
3,2	110	750	3000	78	0,13	0,12	$\frac{117}{32,8}$	0,1
	220	750	2500	79	0,525	0,414		
	440	750	1850	78,5	2,27	1,87		
4	110	950	4000	80,5	0,096	0,073	$\frac{130}{32,7}$	0,1
	220	1000	3000	82	0,328	0,227		
	440	1000	2500	82	1,31	1,45		
7,5	110	1500	4000	85	0,044	0,031	$\frac{130}{32,7}$	0,1
	220	1500	4000	85,5	0,171	0,131		
	440	1500	3750	86	0,609	0,526		
10	220	2360	4000	88,5	0,069	0,049	$\frac{117}{32,8}$	0,1
	440	2120	4000	88,5	0,328	0,227		
12	220	3000	4000	89	0,044	0,031	$\frac{117}{32,8}$	0,1
	440	3000	4000	89,5	0,171	0,131		
Тип 2ПО180М, 2ПО180МГ								
4,5	220	750	2500	79,5	0,486	0,292	$\frac{114}{30,2}$	0,2
	440	750	1850	80	1,95	1,17		
6,3	220	1000	3000	82,5	0,232	0,154	$\frac{85,9}{23,1}$	0,2
	440	1000	2500	82,5	0,902	0,54		
10	220	1500	3500	86,5	0,121	0,071	$\frac{150}{23,1}$	0,2
	440	1500	3500	88,5	0,486	0,296		

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип 2ПО180М, 2ПО180МГ								
14	220	2120	3500	89	0,058	0,037	$\frac{98}{23,1}$	0,2
	440	2120	3500	89	0,232	0,154		
17	220	3000	3500	89	0,038	0,025	$\frac{132}{35}$	0,2
	440	3000	3500	90	0,15	0,092		
Тип 2ПО180Л, 2ПО180ЛГ								
5,2	110	800	3000	80,5	0,065	0,044	$\frac{72,5}{20,1}$	0,23
	220	800	2500	81,5	0,26	0,183		
	440	800	1850	82	1,06	0,67		
7,5	110	1000	3500	83	0,042	0,03	$\frac{72,5}{20,1}$	0,23
	220	1000	3000	84	0,168	0,11		
	440	1120	2500	84,5	0,585	0,462		
16	220	2120	3500	89	0,042	0,03	$\frac{72,5}{20,1}$	0,23
	440	2120	3500	89,5	0,168	0,11		
20	220	3000	3500	90	0,025	0,018	$\frac{98,5}{26,6}$	0,23
	440	3150	3500	81	0,094	0,067		
Тип 2ПО200М, 2ПО200МГ								
6	110	750	3000	81,5	0,071	0,041	$\frac{96}{26,6}$	0,25
	220	750	2500	83,5	0,294	0,1		
	440	750	1850	86	1,09	0,594		
9	220	1060	3000	86	0,143	0,073	$\frac{96}{26,6}$	0,25
	440	1060	2500	86	0,57	0,325		
14	220	1500	3500	88	0,0710	0,041	$\frac{96}{26,6}$	0,25
	440	1500	3500	88	0,294	0,172		
20	220	2360	3500	89,5	0,026	0,016	$\frac{96}{26,6}$	0,25
	440	2200	3500	90	0,143	0,073		
Тип 2ПО200Л, 2ПО200ЛГ								
7,1	220	750	2500	83,5	0,22	0,15	$\frac{102}{23,7}$	0,3
	440	750	1850	83,5	0,925	0,652		
11	220	1000	3000	86,5	0,125	0,08	$\frac{102}{23,7}$	0,3
	440	1000	2500	87	0,5	0,264		
17	220	1500	3500	89	0,055	0,037	$\frac{102}{23,7}$	0,3
	440	1500	3500	89	0,22	0,15		
24	220	2360	3500	90	0,031	0,037	$\frac{102}{23,7}$	0,3
	440	2120	3500	90,5	0,125	0,15		

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип 2ПН225М, 2ПН225МГ								
15	220	750	2500	80,5	0,146	0,0637	62,2	0,534
22	220	1000	2500	82	0,086	0,0429	62,6	
37	220	1500	3000	86,5	0,0366	0,0159	45,75	
Тип 2ПН225Л, 2ПН225ЛГ								
18,5	220	750	2500	83	0,095	0,05	52,32	0,616
30	220	1060	2500	84,5	0,049	0,0197	38,6	
45	220	1500	3000	87,5	0,237	0,0125	38,6	
Тип 2ПН250М, 2ПН250МГ								
15	220	530	1500	80	0,142	0,078	37,9	1,05
18	220	630	2100	80,5	0,11	0,054	37,9	
22	220	750	2000	81	0,074	0,039	37,9	
37	220	1060	2500	85	0,035	0,019	28,7	
50	440	1500	1800	87	0,11	0,054	29,8	
55	220	1500	2800	87	0,0185	0,0098	26,8	
Тип 2ПН250Л, 2ПН250ЛГ								
22	220	600	2100	82	0,082	0,047	33,4	1,28
28	440	750	1900	83	0,26	0,11	33,4	
30	220	750	2000	84	0,051	0,031	33,4	
45	220	1000	2500	85,5	0,03	0,016	25,09	
71	440	1500	2800	88,5	0,0653	0,031	31,2	
75	220	1500	2800	89	0,013	0,0077	23,5	
Тип 2ПН280М, 2ПН280МГ								
22	220	530	1250	83	0,062	0,033	39,6	2,2
30	220	600	1500	84,5	0,046	0,022	23	
45	220	750	2000	86	0,034	0,015	28	
75	220	1000	2250	88,5	0,016	0,0083	22,8	
90	440	1500	1500	89				
110	220	1500	2600	89,5	0,0075	0,0038	22,8	
Тип 2ПН280Л, 2ПН280ЛГ								
30	220	500	1250	83,5	0,05	0,025	26,7	2,32
37	220	600	1500	86	0,037	0,017	25,2	
55	220	750	2000	87,5	0,025	0,012	25,2	
85,5	440	1000	2250	88,4	0,05	0,025	19,7	
90	220	1060	2000	88,4	0,012	0,0053	19,7	
132	220	1500	2600	90,6	0,00604	0,034	25,2	

Таблица 11

Технические данные электродвигателей серии Д при ПВ = 40%

Тип		при ПВ=40% кВт при		Последовательное возбуждение				Параллельное возбуждение				P _{ном} при ПВ=25% кВт при		J _о , кгм ²
		220В	440В	I, А при		n, об/мин при		I, А при		n, об/мин		220В	440В	
				220 В	440 В	220 В	440 В	220В	440В	220В	440В			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	13	
Тихоходное исполнение	Д12	2,4	-	15	-	1150	-	14	-	1230	-	3	-	0,05
	Д21	3,6	3,1	22	10	1040	1230	21	10	1080	1300	4,5	4	0,125
	Д22	4,8	-	28	-	970	-	26	-	1150	-	6	-	0,15
	Д31	6,8	5,2	39	16	900	900	37	15	880	910	8,5	7,5	0,3
	Д32	9,5	-	53	-	760	-	57	-	800	-	12	-	0,425
	Д41	13	12,5	21	35	730	760	20	34	720	720	16	15	0,8
	Д806	17	-	92	-	640	-	84	-	710	-	20	-	1
	Д808	24	24	125	63	615	615	112	56	630	630	30	30	2
	Д810	35	35	182	91	610	610	148	74	600	600	40	40	3,65
	Д812	47	45	242	115	560	590	192	92	565	570	53	51	7
	Д814	70	66	356	168	550	565	280	138	560	560	80	80	10,2
	Д816	85	85	430	215	540	540	350	175	535	540	97	97	16,3
Д818	106	100	530	250	500	515	415	205	470	470	130	130	27,5	
Быстроходное исполнение	Д21	4,4	-	26	-	1340	-	25	-	1500	-	5,3	-	0,125
	Д22	6,5	5,6	37	17	1300	1300	34	16	1570	1550	8	7	0,15
	Д31	9,5	-	53	-	1190	-	51	-	1420	-	12	-	0,3
	Д32	13,5	12,6	72	34	1100	1200	68	32	1240	1240	16	15	0,425
	Д41	18	-	96	-	1060	-	91	-	1160	-	22	-	0,8
	Д806	23	23	120	60	1010	1010	110	55	1060	1060	27,5	27,5	1
	Д808	30	-	155	-	850	-	134	-	825	-	35	-	2

Таблица 12

Обмоточные данные двигателей последовательного
возбуждения серии Д при ПВ = 40 %

Тип	N	2а	$R_{я} + R_{д.н},$ Ом	w_{ϵ}	$R_{\epsilon},$ Ом	$\Phi,$ 10^{-2} Вб
Напряжение 440 В. Тихоходные двигатели						
Д21	1610	2	2,8	210	1,8	0,55
Д31	1476	2	1,13	142	0,63	0,85
Д41	894	2	0,7	76	0,24	1,58
Д808	556	2	0,21	60	0,14	3,59
Д812	418	2	0,1	40	0,04	5,01
Д814	310	2	0,052	29	0,024	7,38
Д816	504	8	0,035	24	0,018	9,32
Д818	504	8	0,026	22	0,013	9,82
Напряжение 440 В. Быстроходные двигатели						
Д22	1044	2	1,69	140	0,96	0,84
Д32	738	2	0,53	82	0,27	1,36
Д806	492	2	0,2	50	0,1	2,49

Таблица 13

Обмоточные данные двигателей серии Д последовательного
возбуждения при ПВ = 40 %

Тип	N	2а	$R_{я} + R_{д.н},$ Ом	w_{ϵ}	$R_{\epsilon},$ Ом	$\Phi,$ 10^{-2} Вб
Напряжение 220 В. Тихоходные двигатели						
Д12	990	2	1,63	83	0,59	0,45
Д21	920	2	0,94	92	0,28	0,57
Д22	696	2	0,57	82	0,26	0,83
Д31	738	2	0,42	67	0,11	0,86
Д32	558	2	0,28	48	0,097	1,34
Д41	492	2	0,16	40	0,049	1,65
Д806	372	2	0,11	36	0,052	2,5
Д808	278	2	0,054	30	0,031	3,53
Д810	234	2	0,035	24	0,016	4,31
Д812	210	2	0,023	21	0,01	5,28
Д814	608	8	0,13	15	0,007	7,5
Д816	504	8	0,0091	12	0,005	9,26
Д818	505	8	0,0066	11	0,003	9,77
Напряжение 220 В. Быстроходные двигатели						
Д21	690	2	0,53	92	0,28	0,61
Д22	522	2	0,32	63	0,19	0,85
Д31	492	2	0,19	67	0,11	0,95
Д32	372	2	0,12	39	0,05	1,47
Д41	310	2	0,072	40	0,05	1,85
Д806	246	2	0,047	26	0,03	2,48
Д808	210	2	0,029	24	0,02	3,47

Таблица 14

Обмоточные данные двигателей серии Д параллельного возбуждения при ПВ = 40 %

Тип	w_g на полюс	R_g , Ом	I_g , А	$\Phi 10^{-2}$, Вб		$w_{\text{пос}}$ на полюс		$\Phi 10^{-2}$, Вб	
				Тихоходное исполнение	Быстроходное исполнение	220В	440В	Тихоходное исполнение	Быстроходное исполнение
Д12	1800	260	0,7	0,48	-	6,5	0,49	0,49	-
Д21	1790	142	1,2	0,58	0,59	5,5	5,5	0,6	0,6
Д22	1480	130	1,35	0,75	0,76	4,5	-	0,77	0,78
Д31	1870	120	1,45	0,93	0,83	4,5	4,5	0,95	0,87
Д32	1470	94	1,85	1,35	1,37	4,5	-	1,4	1,42
Д41	1480	70	2,5	1,76	1,81	3	3	1,81	1,87
Д806	1400	65	2,7	2,5	2,52	2	-	2,55	2,58
Д808	1250	44	3,93	3,81	3,72	2	2	3,86	3,85
Д810	1500	46	3,9	4,76	-	2	3	4,82	-
Д812	1350	34	5,3	5,71	-	1	2	5,68	-
Д814	1300	34	5,5	8,22	-	1	2	8,33	-
Д816	1140	26	7,1	10,4	-	1	2	10,5	-
Д818	1210	22	8,3	11,1	-	1	2	11,3	-

Таблица 15

Редукторы общего назначения

Тип	Вид редуктора	Передаточное число j	К.п.д. η
ЦУ	Цилиндрические одноступенчатые горизонтальные	2 – 6,3	0,98
Ц2У	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	8 - 40	0,97
2ЦУ-Н	То же с зацеплением Новикова	8 - 50	0,97
Ц3У	Цилиндрические трехступенчатые горизонтальные	45 - 200	0,96
ч	Червячные одноступенчатые универсальные	8 - 80	0,41 – 0,94
РЦ1-150А	Цилиндрические одноступенчатые горизонтальные	1,83 – 6,61	0,97
РЦД-400	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	10 - 40	0,96
РМ	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	8,23 – 48,57	0,96
КЦ1	Коническо-цилиндрические двухступенчатые	6,3 – 27,5	0,94
КЦ2	То же трехступенчатые	28,3 - 182	0,91
ВК	Цилиндрические трехступенчатые вертикальные	19,7 – 109,6	0,91

Таблица 16

Основные технические данные двухступенчатых крановых редукторов с передаточными числами $j = 8,32 – 50,940$

Тип редуктора	n входного вала, об/мин	Максимальная мощность, кВт, на быстроходном валу при передаточном числе j									Масса, кг
		50,94	41,34	32,42	24,9	19,88	16,3	12,41	9,8	8,32	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ц2-250	600	3,9	4,2	5,2	7	9,4	11	15	17	19	85
	750	4,2	5,6	7,6	9,4	11	13	17	20	23	
	1000	6	7,3	9,2	12	14	17	20	24	27,1	
	1500	8,5	9,8	12	16	19	24	25	30	34	
Ц2-300	600	5,6	6,8	8,3	13	15	18	25	29	34	136
	750	7,4	8,3	10	16	18	22	29	36	40	
	1000	10	12	15	18	21	25	31	40	44	
	1500	12	14	19	21	26	31	40	48	56	
Ц2-350	600	9,4	10	12	17	22	27	34	37	46	204
	750	11	13	17	22	26	32	43	52	61	
	1000	14	17	22	27	33	37	51	61	72	
	1500	20	24	30	30	44	51	70	85	97	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ц2-400	600	16	20	25	36	44	48	48	53	63	317
	750	20	26	29	39	46	54	54	59	63	
	1000	24	30	34	44	49	54	54	68	73	
	1500	31	37	37	49	64	81	81	91	102	
Ц2-500	600	32	34	43	63	75	82	113	120	137	505
	750	37	42	52	75	89	103	112	140	163	
	1000	49	58	69	91	104	122	143	178	197	
	1500	63	82	83	116	147	174	189	217	248	

Таблица 17

Технические данные планетарных редукторов
ServoFit фирмы Stöber

Тип			P3	P4	P5	P7	P8	
число ступеней			1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	
динамический момент	$M_{дин}$	н · м	50	100	250	500	1100	
номинальный выходной момент	$M_{2ном}$	н · м	40	80	200	400	800	
максимальная входная скорость	n_{1max}	$\frac{об}{мин}$	6000	6000	6000	6000	4500	
номин. входная скорость: $i > 5 / i < 5$	$n_{1ном}$	$\frac{об}{мин}$	$\frac{4000}{3000}$	$\frac{4000}{3000}$	$\frac{3500}{2800}$	$\frac{3000}{2500}$	$\frac{2500}{2000}$	
углового зазор	$\Delta\varphi$	дуг.мин(°)	1,5-5	1,5-5	1-5	1-4	1-4	
жесткость	c	$\frac{н \cdot м}{угл.мин}$	4	10	25	50	145	
осевая нагрузка	$F_{2,ос}$	Н	1000	1500	2000	3000	4000	
радиальная нагрузка	$F_{2,рад}$	Н	$\frac{3000}{4000}$	$\frac{4500}{6000}$	$\frac{7000}{9000}$	$\frac{9000}{12000}$	$\frac{15000}{18000}$	
к.п.д.	η	%	$\frac{97}{95}$	$\frac{97}{95}$	$\frac{97}{95}$	$\frac{97}{95}$	$\frac{97}{95}$	
масса	m	кг	$\frac{2,6}{4,0}$	$\frac{4,0}{5,3}$	$\frac{6,5}{8,5}$	$\frac{12}{15}$	$\frac{26}{32}$	
передаточное число 1-й ступени	j	о.е.	3, 4, 5, 7, 10					
передаточное число 2-й ступени	j	о.е.	15, 20, 25, 35, 49, 50, 70, 100					

Таблица 18

Максимальные моменты, передаваемые планетарными редукторами ServoFit в зависимости от передаточного числа

Тип редуктора	Передаточное число j												
	3	4	5	7	10	15	20	25	35	49	50	70	100
P3	75	100	100	90	100	75	100	100	100	90	100	100	100
P4	150	200	200	175	200	180	200	200	175	175	200	200	200
P5	375	500	500	350	500	375	500	500	300	400	500	500	500
P7	750	1000	1000	875	1000	750	1000	1000	625	875	1000	1000	1000
P8	1500	2000	1750	2000	1500	2000	2000	1250	1750	2000	2000	2000	2000

Таблица 19

Моменты инерции планетарных редукторов ServoFit, приведенные к входному валу (10^{-4} кгм²), в зависимости от передаточного числа

Тип редуктора	Передаточное число j												
	3	4	5	7	10	15	20	25	35	49	50	70	100
P3	0,84	0,72	0,68	0,34	0,32	0,68	0,68	0,68	0,34	0,34	0,32	0,34	0,32
P4	1,84	1,54	1,43	0,85	0,81	0,70	0,68	0,68	0,68	0,34	0,38	0,34	0,32
P5	5,46	4,44	4,07	2,02	1,87	1,50	1,46	1,44	0,86	0,85	0,94	0,85	0,81
P7	12,49	9,08	7,80	5,01	4,50	4,30	4,16	4,11	2,04	2,02	2,29	2,01	1,87
P8	54,47	34,38	30,04	16,75	13,92	9,12	8,31	8,14	5,19	5,07	6,03	5,01	4,50

Таблица 20

Технические данные управляемых преобразователей напряжения постоянного тока фирмы SEW Eurodrive.
Работа в 4-х квадрантах, перегрузка по току 150%.

Тип преобразователя	Входное напряжение переменного тока, В	Номинальный выходной ток, А	Напряжение якоря, В	Напряжение цепи возбуждения, В	Ток цепи возбуждения, А
МОВИРЕТ 1	1×220/240	14; 22	150	195	0,7; 1,2; 2
МОВИРЕТ 2	1×380/415	14; 22; 35	260	340	1,2; 2; 2
МОВИРЕТ 3	3×380/415	15;28;55;80; 150	400	340	2; 3; 3; 3; 4

Таблица 21

Технические данные управляемых преобразователей напряжения
постоянного тока фирмы Telemecanique.
Работа в 4-х квадрантах, перегрузка по току 150%.

Питающая сеть переменного тока		Номинальный выходной ток, А	Макс. выходной ток, А	Номин. мощность двигателя, кВт	Ток для цепи возбуждения, А	Тип преобразователя	Масса, кг
U, В	I, А						
Напряжение на якоре 150 В							
220	8	6	9	0,5	2	RTV- 44U60M	3,6
220	16	12	18	1	2	RTV- 44D12Q	3,6
220	32	24	36	2	2	RTV- 44D24Q	6,0
220	58	44	66	3,7	2	RTV- 44D44Q	6,0
Напряжение на якоре 260 В							
380	16	12	18	1,8	2	RTV - 44D12Q	3,6
380	32	24	36	3,5	2	RTV- 44D24Q	6,0
380	58	44	66	6,4	2	RTV- 44D44Q	6,0

Таблица 22

Технические данные управляемых преобразователей напряжения
постоянного тока фирмы Telemecanique.
Работа в 4-х квадрантах, допустимая перегрузка по моменту двигателя 120%.
Напряжение питающей сети 380 В, напряжение на якоре 220 В.

Входной переменный ток, А	Выходной номинальный постоянный ток, А	Мощность электродвигателя, кВт	Ток цепи возбуждения, А	Тип преобразователя	Масса, кг
16	12	4,7	2	RTV-84D16Q	6,0
32	24	9,5	15	RTV-84D32Q	6,5
48	36	14	15	RTV-84D48Q	10,0
72	54	21	15	RTV-84D72Q	10,0
180	135	54	15	RTV-84C18Q	11,0
270	203	81	15	RTV-84C27Q	13,0
400	300	120	15	RTV-84C40Q	47,0
650	488	195	15	RTV-84C65Q	47,0
800	600	240	30	RTV-84C80Q	108,0
1250	938	375	30	RTV-84M12Q	108,0
1750	1313	525	30	RTV-84M17Q	120,0
3000	2250	900	30	RTV-84M30Q	298,0

Таблица 23

Технические данные управляемых преобразователей напряжения постоянного тока фирмы Siemens серии SIMORE K.

Работа в 4-х квадрантах, допустимая перегрузка по току 150%. Питающая сеть трехфазная напряжением 400 В.

Номинальное выходное напряжение постоянного тока 485 В.

Напряжение для питания цепи возбуждения электродвигателя 325 или 360 В.

Номинальный выходной ток, А	30	60	90	125	200	250	400	600	850	1200
Номинальный ток возбуждения, А	5	10	10	10	15	15	25	25	30	30

Таблица 24

Технические данные преобразователей частоты серии Altivar 16 фирмы Telemecanique.

Работа в 4-х квадрантах, допустимая перегрузка по моменту асинхронного двигателя 150%.

Питающая сеть		Номинальная мощность АД, кВт	Преобразователь частоты			Тип	Масса, кг	
Напряжение, В	Ток		Ном. выходной ток, А	Макс. выходной ток, А	Номинальная мощность кВт·А			
	1-фазное, А	3-фазное, А						
1-фазное 220В, 50 Гц	4	-	0,37	2,1	3,2	0,9	ATV-16U09M2	1,8
	7	-	0,75	4	5,4	1,8	ATV-16U18M2	1,85
220В, 1-фазное или 3-х фазное	14	10	1,5	7,1	10	2,9	ATV-16U29M2	3,3
	18	14	2,2	10	14	4,1	ATV-16U41M2	4,3
400В, 50 Гц, 3-х фазное	-	3,3	0,75	2,3	3,1	1,8	ATV-16U18N4	3,4
	-	6	1,5	4,1	5,5	2,9	ATV-16U29N4	3,4
	-	9	2,2	5,8	7,9	4,1	ATV-16U41N4	4,4
	-	12	3,0	7,8	11	5,4	ATV-16U54N4	4,4
	-	16	4,0	10,5	14,2	7,2	ATV-16U72N4	5,0
	-	20	5,5	13	17,6	9	ATV-16U90N4	5,2

Таблица 25

Технические данные преобразователей частоты серии
Altivar 66 фирмы Telemecanique.

Работа в 4-х квадрантах, допустимая перегрузка по моменту асинхронного двигателя 150%. Питающая сеть 3-х фазная напряжением 220 В, 50 Гц.

Номинальная мощность двигателя, кВт	Входной ток питающей сети, А	Преобразователь частоты			Тип	Масса, кг
		Максимальный ток (60с), А	Номинальный ток, А	Номинальная мощность кВт·А		
2,2	14,7	15,9	11,7	4,2	ATV-66U41M2	4,7
4	24,2	25	18,4	6,6	ATV-66U72M2	7,3
5,5	32	37	26,6	9,6	ATV-66U90M2	7,3
7,5	41	47	34	12,2	ATV-66D12M2	14
11	57	70	51	18,3	ATV-66D16M2	14
15	71	89	66	23,5	ATV-66D23M2	14
22	97	132	97	34,9	ATV-66D33M2	27
30	126	172	126	45,3	ATV-66D46M2	40

Таблица 26

Технические данные преобразователей частоты серии
Altivar 66 фирмы Telemecanique.

Работа в 4-х квадрантах, допустимая перегрузка по моменту асинхронного двигателя 150%. Питающая сеть 3-х фазная напряжением 400 В, 50 Гц.

Номинальная мощность двигателя, кВт	Входной ток питающей сети, А	Преобразователь частоты			Тип	Масса, кг
		Максимальный ток (60с), А	Номинальный ток, А	Номинальная мощность кВт·А		
37	94	108	79,2	54	ATV-66D54N4	40
45	110	127,5	93,5	64	ATV-66D64N4	41
55	130	157,5	115,5	79	ATV-66D79N4	41
75	171	207	151,8	100	ATV-66C10N4	127
90	198	258	190	130	ATV-66C13N4	136
110	237	307,5	226	150	ATV-66C15N4	136
132	275	367,5	270	190	ATV-66C19N4	136

Таблица 27

Технические данные преобразователей частоты серии
MICRO MASTER фирмы Siemens.

Работа в 4-х квадрантах, допустимая перегрузка по току 150% (60с).

Питающая сеть: 1-фазное напряжение 220 В, 50 Гц.

Тип	Номинальная мощность двигателя, кВт	Номинальный выходной ток преобразователя, А	Размеры, мм	Масса, кг
MM 25	0,25	1,5	112×182×113	1,9
MM 37	0,37	2,0		
MM 55	0,55	2,6		
MM 75	0,75	3,4		
MM 100	1,10	4,8	149×184×152	2,6
MM 150	1,50	6,4		
MM 200	2,20	9,0	185×215×175	5,0

Таблица 28

Технические данные преобразователей частоты серии CX/CXL фирмы Vacon.
 Работа в 4-х квадрантах. Перегрузка по току: 150% в течение 60с и 250% в течение
 2с через каждые 20с.
 Перегрузка по моменту двигателя 200%.
 Питающая сеть: 3-фазное напряжение 380 В, 50 Гц.

Тип	Номинальная мощность двига- теля, кВт	Номинальный выходной ток ПЧ, А	Максимальный выходной ток ПЧ, А	Исполнение	Габариты	Масса, кг
160 CX4	160	325	472	IP 21; IP 54	496×1350×353	153
200 CX4	200	410	615	IP 00	700×1000×390	211
250 CX4	250	510	715	IP 21; IP 54	700×1425×390	230
315CX4	315	600	900	IP 00	989×1000×390	273
400CX4	400	750	1000			
500CX4	500	840	1200	IP 00	(2×700) ×1000×390	430
630CX4	630	1050	1400	IP 00	(2×989) ×1000×390	550
710CX4	710	1270	1500	IP 00	(2×989) ×1000×390	550
800CX4	800	1330	1600	IP 00	(2×989) ×1000×390	550

Литература

1. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 228с.
2. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода: Учебное пособие для вузов. – Мн: «Техноперспектива», 2004.
3. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных установок. – М.: Энергия, 1980. – 360с.
4. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод для общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1976. – 540с.
5. Дранников В.Г., Звягин И.Е. Автоматизированный электропривод подъемно-транспортных машин. – М.: Высшая школа, 1973. – 280с.
6. Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. – М.: Высшая школа, 1979. – 359с.
7. Соколов Н.Г., Елисеев В.А. Расчеты по автоматизированному электроприводу металлорежущих станков. – М.: Высшая школа, 1969.- 296с.
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432с.
9. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 496с.
10. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344с.
11. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред.В.А.Елисеева и А.В.Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616с.
12. Электротехнический справочник: в 3-х томах. Т.2. Электротехнические устройства. – 6 изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981.- 640с.
13. Электротехнический справочник: в 3-х томах. Т.3.Использование электрической энергии. – 7 изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.- 616с.
14. Алиев И.И. Электротехнический справочник. – М.: РадиоСофт, 2000. – 384с.
15. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э.Кравчик и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504с.
16. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. – М.: Солон-Р, 2002.- 304с.
17. Справочник по электрическим машинам: в 2-х томах / Под ред. И.П.Копылова и Б.К.Клопова.
Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456с.
Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688с.
18. Фираго Б.И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода для студ. спец. 21.05. – Мн.: БГПА, 1993. – 127с.

Содержание

1. Общие сведения.
2. Задание на курсовой проект. Требования к проекту.
3. Технологическое описание работы механизма.
4. Расчет и построение упрощенных скоростных и нагрузочных диаграмм механизма. Определение расчетной мощности электродвигателя.
5. Расчет и построение упрощенных скоростных и нагрузочных диаграмм регулируемого электропривода.
6. Предварительная проверка электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности.
7. Расчет и построение упрощенных скоростных и нагрузочных диаграмм механизма нерегулируемого электропривода.
8. Расчет и построение упрощенной скоростной и нагрузочной диаграмм нерегулируемого электропривода.
9. Расчет и построение естественных механических и электромеханических характеристик электродвигателей.
 - 9.1. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя.
 - 9.2. Методика расчета параметров эквивалентной схемы 3-х фазного асинхронного двигателя по каталожным данным для номинального режима.
 - 9.3. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.
 - 9.4. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ).
 - 9.5. Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
10. Расчет и построение искусственных механических характеристик, обеспечивающих выполнение технологических операций.
 - 10.1. Расчет искусственных механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором и ступенчатым регулированием добавочного сопротивления.
 - 10.2. Расчет искусственных механических характеристик двигателя в системе электропривода ИРС-АД.
 - 10.3. Расчет искусственных механических характеристик в системе ПЧ-АД.
 - А. Механические характеристики АД в системе ПЧ-АД при частотном управлении по закону $\psi_1 = \text{const}$.
 - Б. Механические характеристики АД в системе ПЧ-АД при частотном управлении по закону $\psi_m = \text{const}$.
 - В. Механические характеристики в системе ПЧ-АД при частотном управлении по закону $\psi_2 = \text{const}$.
 - 10.4. Расчет искусственных механических характеристик в системе ТП-ДПТ НВ.
11. Расчет переходных процессов.
 - 11.1. Расчет переходных процессов в нерегулируемом электроприводе с асинхронным короткозамкнутым двигателем.
 - А. Метод кусочно-линейной аппроксимации.
 - Б. Метод конечных разностей.
 - 11.2. Расчет переходных процессов электропривода при ступенчатом пуске асинхронного двигателя с фазным ротором.
 - 11.3. Расчет переходных процессов электропривода в системе ИРС-АД.
 - 11.4. Расчет переходных процессов электропривода в системах ПЧ - АД и ТП-ДПТ НВ.
12. Расчет потерь мощности в установившихся и переходных режимах электроприводов.

- 12.1. Расчет потерь мощности в нерегулируемом электроприводе с асинхронным короткозамкнутым двигателем.
- 12.2. Расчет потерь мощности в электроприводе с асинхронным двигателем с фазным ротором.
- 12.3. Расчет потерь мощности в электроприводе по системе ИРС-АД.
- 12.4. Расчет потерь мощности асинхронного двигателя при частотном управлении по законам $\psi_1 = \text{const}$ и $\psi_m = \text{const}$.
- 12.5. Расчет потерь мощности в двигателе постоянного тока в системе ТП-ДПТ НВ.
13. Окончательная проверка двигателя по нагреву и перегрузочной способности.
14. Выбор преобразователя напряжения или частоты для регулируемого электропривода.
15. Расчет расходуемой и потребляемой электродвигателем энергии за цикл работы механизма. Цикловой к.п.д. электродвигателя.
16. Литература.