

О.С. Качин

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

*Рекомендовано в качестве методического пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В целях снижения времени переходных процессов в электроприводе целесообразно на стадии его проектирования и выбора электродвигательного устройства оценивать быстродействие электропривода, которое определяется как совокупностью инерционных свойств элементов механической части электропривода, так и механическими характеристиками электродвигателя и механизма, а также предполагаемой организацией цикла работы электропривода и применяемыми способами регулирования его координат.

Существующий способ выбора оптимального передаточного числа редуктора [1], основанный на достижении максимума ускорения вращения вала электродвигателя, не учитывает многих из перечисленных выше факторов, определяющих характер переходных процессов, особенно в его упрощенном варианте [2]. Кроме того, сама величина максимума ускорения, достигаемого в какой-либо момент времени переходного процесса, не позволяет однозначно судить о времени неустановившегося режима работы, а условия достижения максимума меняются при изменении динамического момента в течение времени переходного процесса.

Более точный результат оценки быстродействия электропривода может дать метод, основанный на определении средних ускорений неустановившихся режимов и суммарного времени переходных процессов за цикл работы. В этом случае методика оптимизации механической части электропривода может выполняться в следующей последовательности:

- расчет мощности электродвигателя и предварительный выбор ряда типов электродвигателей в соответствии с расчетной мощностью и другими требованиями к электроприводе;
- предварительный выбор способов пуска, торможения и регулирования скорости в пределах цикла;
- упрощенный расчет времени переходных процессов (на основе средних ускорений) в предварительно организованном цикле для выбранных типов электродвигателей;
- выбор электродвигателя, обеспечивающего минимальное суммарное время переходных процессов в организованном цикле.

Методы приближенной оценки времени переходных процессов для электроприводов с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения при постоянной величине нагрузки и реостатном способе регулирования координат могут быть следующими:

2 ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Приближенный расчет времени пуска электропривода при двигательной нагрузке

Время пуска электропривода может быть определено на основе уравнения для линейной зависимости изменения динамического момента от частоты вращения вала электродвигателя [3]:

$$t = T_m \cdot \ln \frac{\omega_{уст.} - \omega_{нач.}}{\omega_{уст.} - \omega_{кон.}}, \quad (2.1)$$

где $T_m = \frac{J_\omega \cdot R}{(k \cdot \Phi)^2} = \frac{J_\omega \cdot \Delta\omega}{\Delta M}$ – электромеханическая постоянная времени

переходного процесса;

J_ω – эквивалентный момент инерции вращающихся масс механической части электропривода;

R – суммарное сопротивление якорной цепи на естественной механической характеристике электродвигателя при заданной рабочей температуре обмоток;

k – конструктивная постоянная электродвигателя;

Φ – магнитный поток электродвигателя;

$\Delta\omega$ – приращение угловой скорости;

механической характеристики электродвигателя;

ΔM – приращение момента между двумя точками механической характеристики электродвигателя;

$\omega_{уст.}$ – расчетное значение угловой скорости вала электродвигателя в установившемся режиме работы электропривода;

$\omega_{нач.}$ – начальное значение угловой скорости вала электродвигателя;

$\omega_{кон.}$ – конечное значение угловой скорости вала электродвигателя.

Процессы пуска в двигательный режим работы могут протекать по двум вариантам.

Первый вариант имеет место при возможности прямого пуска на рабочую характеристику как это изображено на рисунке 2.1. Данный вариант имеет место при выполнении условия:

$$M_{кз.1} \leq M_{доп.}, \quad (2.2)$$

где $M_{кз.1} = \frac{M_c \cdot \omega_0}{\omega_0 - \omega_p}$ – момент короткого замыкания рабочей

характеристики 1, на которой обеспечивается устойчивая

установившаяся работа электропривода в точке А с частотой ω_p ;

$M_c = M_{с.мех.} + M_n$ – момент на валу электродвигателя в двигательном режиме работы;

$M_{с.мех.} = \frac{M_{мех.}}{i_{ст.} \cdot \eta_{п}}$ – момент нагрузки в двигательном режиме работы в

соответствии с заданием на проектирование электропривода, приведенный к валу электродвигателя;

$M_{мех.}$ – момент, развиваемый механизмом;

$i_{ст.}$ – стандартное передаточное число редуктора ($i_{ст.} < i$; $i = \frac{\omega_{н}}{\omega_{мех.мах.}}$ –

передаточное число редуктора; $\omega_{н} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{н}}{60}$ – номинальная угловая

скорость вала электродвигателя; $\omega_{мех.мах.}$ – максимальная угловая скорость механизма);

$\eta_{п}$ – КПД механического передаточного устройства электропривода;

$M_{п} = M_{эм.н} - M_{н}$ – момент потерь электродвигателя (принимается равным моменту потерь в номинальном режиме работы);

$M_{эм.н} = C_{н} \cdot I_{н}$ – номинальный электромагнитный момент электродвигателя;

$C_{н} = \frac{U_{н} - I_{н} \cdot R}{\omega_{н}}$ – коэффициент связи электродвигателя в номинальном

режиме работы;

$M_{н} = \frac{P_{н}}{\omega_{н}}$ – номинальный момент на валу электродвигателя;

$\omega_{0} = \frac{U_{н}}{C_{н}}$ – угловая скорость идеального холостого хода;

$\omega_{р}$ – рабочая угловая скорость вала электродвигателя в установившемся режиме

в соответствии с заданием на проектирование электропривода;

$U_{н}$ – номинальное значение напряжения электродвигателя;

$I_{н}$ – номинальное значение тока электродвигателя;

$M_{доп.}$ – момент короткого замыкания предельной характеристики 2, по которой еще может быть осуществлен прямой пуск электродвигателя в соответствии с заданием (равен предельно допустимому значению электромагнитного момента электродвигателя в соответствии с заданием на проектирование электропривода).

Сопротивление обмоток при заданной рабочей температуре (T_2) определяется согласно известной зависимости

$$R_{T_2} = R_{T_1} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)], \quad (2.3)$$

где R_{T_1} – сопротивление при температуре T_1 ;

$\alpha = 0,004 \text{ град}^{-1}$ – температурный коэффициент для медных проводов.

Стандартное передаточное число редуктора принимается в соответствии с выражением

$$i_{ст.} = i_{ст.б} \cdot 10^n, \quad (2.4)$$

где $i_{ст.б}$ – стандартное передаточное число базового ряда (таблица 2.1);
 $n = 0, 1, 2 \dots$

Таблица 2.1 - Стандартные ряды передаточных чисел цилиндрических зубчатых передач

Ряд	Передаточные числа $i_{ст.}$									
I	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8,0
II	1,12	1,4	1,8	2,24	2,8	3,55	4,5	5,6	7,1	9,0

Следовательно, процесс пуска в рассматриваемом случае может быть выполнен с использованием механической характеристики 1, либо с использованием предельной механической характеристики 2. Причем в первом случае переходный процесс будет завершённым (расчетное значение установившейся скорости соответствует фактическому установившемуся значению рабочей скорости ω_p в точке А), а во втором случае переходный процесс будет незавершённым (в точке m осуществляется переход в точку А на характеристике 1). Во втором случае время пуска до рабочей скорости будет меньше вследствие использования начального участка переходного процесса на механической характеристике 2 и большей величины среднего динамического момента. При этом динамические свойства электропривода могут быть оценены путем расчета времени пуска по усредненной механической характеристике 3, обеспечивающей средний динамический момент (среднее ускорение) рассмотренных вариантов пуска.

Поскольку переходный процесс пуска электропривода в данном случае является незавершённым, то время переходного процесса определяется по выражению

$$t_{пуск.} = T_{м3} \cdot \ln \frac{\omega_{уст.3}}{\omega_{уст.3} - \omega_p}, \quad (2.5)$$

где $T_{м3} = \frac{J_{э} \cdot \omega_0}{M_{кз.3}}$ – электромеханическая постоянная времени переходного

процесса для механической характеристики 3;

$$J_{э} = \sigma \cdot J_{д} + \frac{J_{мех.}}{i_{ст.}^2};$$

σ – коэффициент, учитывающий влияние момента инерции механического передаточного устройства на работу механической части электропривода в динамических режимах (для предварительных расчетов рекомендуется принимать равным 1,1 - 1,3);

$J_{д}$ – момент инерции вращающихся масс ротора двигателя;

$J_{\text{мех.}}$ – момент инерции вращающихся масс механизма;

$$M_{\text{кз.3}} = 0,5 \cdot M_{\text{доп.}} + 0,5 \cdot M_c \cdot \left(\frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_p} \right) - \text{момент короткого замыкания}$$

усредненной механической характеристики 3;

$$\omega_{\text{уст.3}} = \frac{\omega_0 \cdot (M_{\text{кз.3}} - M_c)}{M_{\text{кз.3}}} - \text{угловая скорость установившегося режима при работе на характеристике 3.}$$

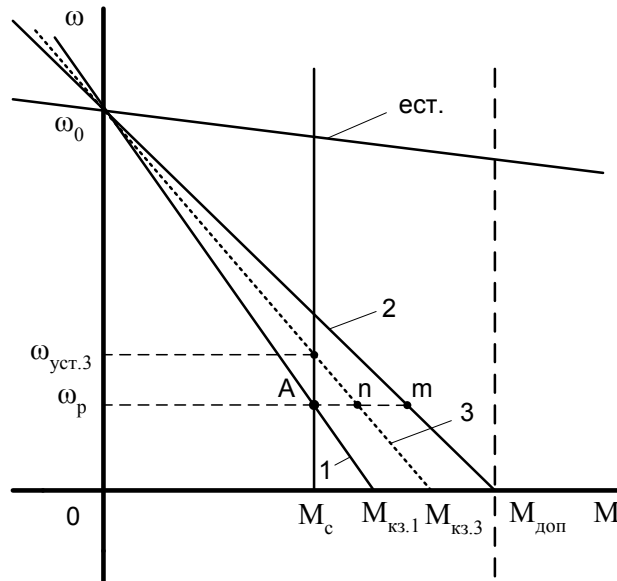


Рисунок 2.1

В ряде случаев (когда условие (2) не выполняется) возможен пуск электропривода в двигательный режим с использованием пусковой диаграммы.

Механические характеристики, используемые для расчета времени переходного процесса во втором варианте пуска, представлены на рисунке 2.2.

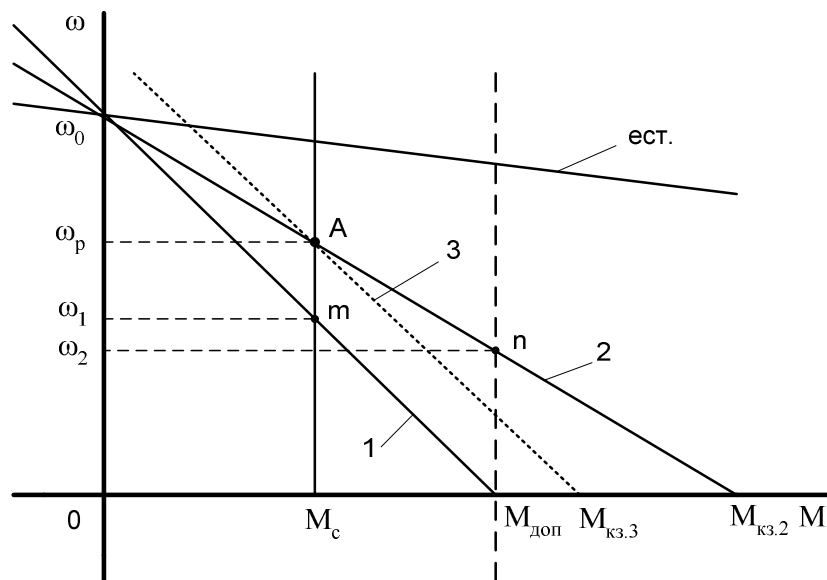


Рисунок 2.2

В данном случае процесс пуска начинается с использованием механической характеристики 1, а завершается с использованием рабочей характеристики 2. Точка А является точкой устойчивого установившегося режима работы электропривода в соответствии с условиями технического задания. Количество механических характеристик, расположенных между прямыми 1 и 2, в общем случае может быть различным в зависимости от организации пусковой диаграммы при проектировании электропривода. Ориентировочно динамические свойства усредненной пусковой диаграммы можно определить используя усредненную механическую характеристику 3. Жесткость механической характеристики 3 выбирается из условия равенства средних динамических моментов (средних ускорений) при пусках с использованием характеристики 3 и усредненной пусковой диаграммы. При данных допущениях электромеханическая постоянная времени переходного процесса будет определяться по выражению

$$T_{м3} = J_э \cdot \frac{\omega_p}{M_{кз.3} - M_c}, \quad (2.6)$$

где $M_{кз.3}$ – момент короткого замыкания для расчетной характеристики 3.

Расчет эквивалентного момента инерции вращающихся масс здесь (и в последующих вариантах) осуществляется в соответствии с формулой (2.5).

Момент короткого замыкания для характеристики 3 равен:

$$M_{кз.3} = \frac{(\omega_p + \omega_1 + \omega_2) \cdot (M_{доп.} - M_c)}{2 \cdot \omega_p} + M_c, \quad (2.7)$$

$$\text{где } \omega_1 = \frac{\omega_0 \cdot (M_{доп.} - M_c)}{M_{доп.}};$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_0 \cdot (M_{кз.2} - M_{доп.})}{M_{кз.2}};$$

$$M_{кз.2} = \frac{M_c \cdot \omega_0}{(\omega_0 - \omega_p)}.$$

Поскольку переходный процесс пуска электропривода в данном случае является завершённым, то время переходного процесса с использованием усредненной механической характеристики 3 будет приближенно равно:

$$t_{пуск.} = 3 \cdot T_{м3} = 3 \cdot \left(\sigma \cdot J_d + \frac{J_{мех.}}{i_{ст.}^2} \right) \cdot \left(\frac{\omega_p}{M_{кз.3} - M_c} \right). \quad (2.8)$$

2.2 Приближенный расчет времени пуска электропривода при генераторной нагрузке

Механические характеристики, используемые для расчета времени переходного процесса в рассматриваемом случае, представлены на рисунке 2.3.

В данном случае процесс пуска может осуществляться с использованием механической характеристики 1, либо с использованием семейства пусковых характеристик, расположенных между характеристикой 1 и характеристикой 2, которая является граничной. Последний вариант наиболее предпочтителен с точки зрения увеличения среднего динамического момента в переходном режиме и сокращения времени пуска. Динамические свойства усредненного семейства пусковых характеристик можно оценить используя усредненную механическую характеристику 3, удовлетворяющую условию равенства средних динамических моментов (средних ускорений) при пусках с использованием характеристики 3 и усредненного семейства пусковых характеристик, расположенных между прямыми 1 и 2.

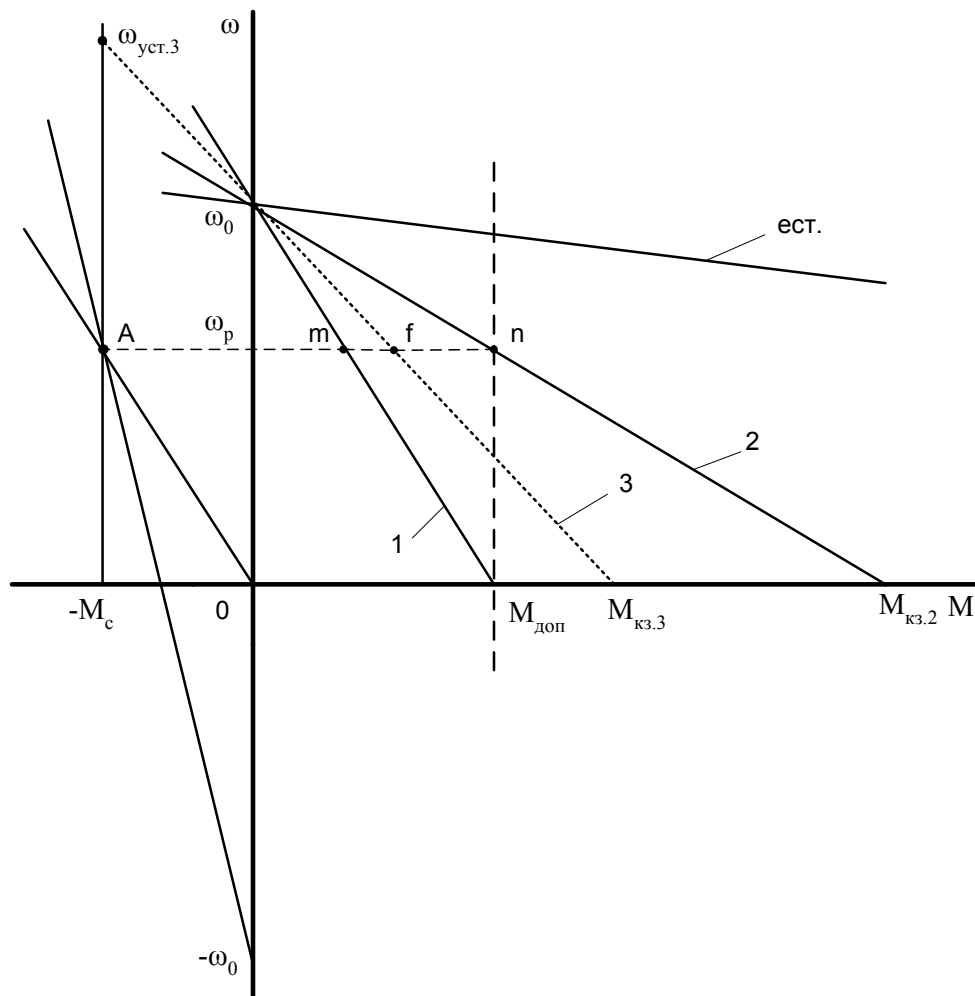


Рисунок 2.3

Время пуска в этом случае может быть ориентировочно рассчитано, как время переходного процесса по усредненной характеристике 3 от нулевой скорости до рабочей скорости ω_p , которой соответствует точка f, после чего осуществляется переключение на одну из тормозных характеристик (динамического торможения или противовключения), обеспечивающих работу электропривода в генераторном режиме в точке А.

Выражение (1) при данных допущениях имеет вид:

$$t_{\text{пуск}} = T_{\text{м3}} \cdot \ln \frac{\omega_{\text{уст.3}}}{\omega_{\text{уст.3}} - \omega_p} . \quad (2.9)$$

Электромеханическая постоянная времени переходного процесса при этом определяется по выражению

$$T_{\text{м3}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\omega_0}{M_{\text{кз.3}}} , \quad (2.10)$$

где $M_{\text{кз.3}} = \frac{M_{\text{доп.}} \cdot (4 \cdot \omega_0 - \omega_p)}{(4 \cdot \omega_0 - 2 \cdot \omega_p)}$ – момент короткого замыкания характеристики 3.

Угловая скорость установившегося режима работы на характеристике 3 равна:

$$\omega_{\text{уст.3}} = \frac{\omega_0 \cdot (M_{\text{кз.3}} + M_c)}{M_{\text{кз.3}}} , \quad (2.11)$$

где $M_c = M_{\text{с.мех.}} - M_{\text{п}}$ – момент на валу электродвигателя в генераторном режиме работы;

$M_{\text{с.мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}} \cdot \eta_{\text{п}}}{i_{\text{ст.}}}$ – момент нагрузки в генераторном режиме работы в

соответствии с заданием на проектирование электропривода, приведенный к валу электродвигателя.

2.3 Приближенный расчет времени торможения электропривода в режиме автономного генератора при двигательной нагрузке

Поскольку торможение автономным генератором (динамическое торможение) не может обеспечить полное торможение до нулевой скорости при выходе из генераторного режима работы (имеет место при активной нагрузке), то данный вид торможения рекомендуется использовать при выходе из двигательного режима работы.

Совокупность механических характеристик при данном варианте реализации процесса торможения представлена на рисунке 2.4. В начале динамического торможения осуществляется переход из рабочей точки А (двигательный режим работы) в точку m на механической характеристике 1. Затем под действием динамического момента скорость электропривода снижается вплоть до нулевой скорости, если не выполняется переключение на другую характеристику. В целях снижения времени торможения может использоваться семейство характеристик динамического торможения, ограниченных прямыми 1, 2 и линией допустимого момента. Характеристика 2 представляет собой предельную характеристику динамического торможения при отсутствии дополнительного сопротивления в якорной цепи электродвигателя. Усредненный динамический момент в этом случае может быть приближенно найден как среднее между усредненными динамическими моментами, имеющими место при раздельном использовании характеристики 1 и семейства бесконечно большого числа характеристик между прямыми 1 и 2. Расчетная характеристика 3 обеспечивает средний динамический момент при торможении, эквивалентный усредненному динамическому моменту с использованием семейства характеристик, описанного выше.

Электромеханическая постоянная времени переходного процесса для характеристики 3 определяется по выражению

$$T_{м3} = J_{э} \cdot \frac{\omega_p}{M_f}, \quad (2.12)$$

где $M_f = M_{доп.} \cdot \left[\frac{3}{2} - \frac{M_{доп.} \cdot (\omega_0 - \omega_n)}{2 \cdot \omega_p \cdot M_{эм.н}} \right]$ – момент, соответствующий точке f со скоростью ω_p на расчетной характеристике 3.

Среднее время торможения электропривода автономным генератором из двигательного режима (равно времени торможения по усредненной характеристике 3) будет равно:

$$t_{торм.} = T_{м3} \cdot \ln \frac{-\omega_{уст.3} - \omega_p}{-\omega_{уст.3}}, \quad (2.13)$$

где $\omega_{уст.3} = \omega_p \cdot \frac{M_c}{M_f}$ – расчетное установившееся значение скорости для характеристики 3;

$M_c = M_{c, \text{мех.}} + M_{\Pi}$ – момент нагрузки на валу электродвигателя в двигательном режиме работы;

$M_{c, \text{мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.}} \cdot \eta_{\Pi}}$ – момент нагрузки в двигательном режиме работы в

соответствии с заданием на проектирование электропривода, приведенный к валу электродвигателя.

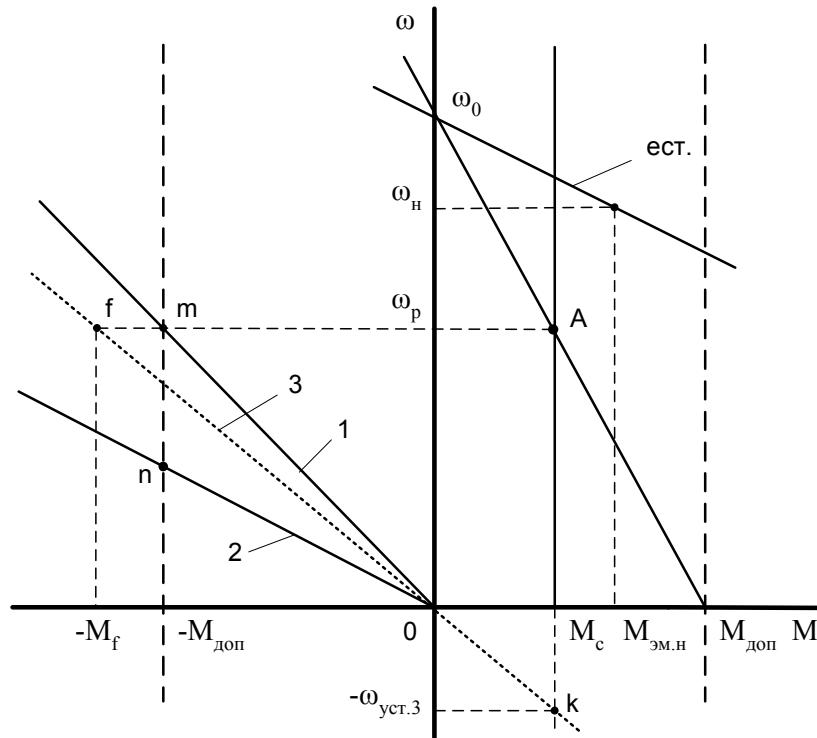


Рисунок 2.4

2.4 Приближенный расчет времени торможения электропривода в режиме противовключения при двигательной нагрузке

Торможение противовключением из рабочей точки А установившегося режима работы с частотой ω_p в общем случае может осуществляться с использованием семейства характеристик, расположенных между граничными механическими характеристиками 1, 2 и линией допустимого момента, представленных на рисунке 2.5. Усредненное значение динамического момента и времени торможения до нулевой скорости в этом случае может быть определено на основе усредненной характеристики торможения противовключением 3, которая проходит через точку идеального холостого хода отрицательного направления вращения $-\omega_0$ и точку режима короткого замыкания с моментом $M_{кз.3}$, значение которого удовлетворяет условию:

$$M_{кз.3} = M_{доп.} \cdot \left(\frac{\omega_0}{2 \cdot \omega_0 + \omega_p} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_0 + 3 \cdot \omega_p}{2 \cdot \omega_0 + 2 \cdot \omega_p} \right). \quad (2.14)$$

Тогда электромеханическая постоянная времени переходного процесса для усредненной характеристики 3 равна:

$$T_{м3} = J_{э} \cdot \frac{\omega_0}{M_{кз.3}}. \quad (2.15)$$

Время торможения при данном варианте торможения вычисляется по выражению

$$t_{торм.} = T_{м3} \cdot \ln \frac{-\omega_{уст.3} - \omega_p}{-\omega_{уст.3}}, \quad (2.16)$$

где $\omega_{уст.3} = \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{M_c}{M_{кз.3}} \right)$ – расчетное значение скорости установившегося

режима работы для переходного процесса от точки n до нулевой скорости по усредненной характеристике 3;

$M_c = M_{с.мех.} + M_n$ – момент нагрузки для двигательного режима работы;

$M_{с.мех.} = \frac{M_{мех.}}{i_{ст.} \cdot \eta_n}$ – момент нагрузки в двигательном режиме работы в

соответствии с заданием на проектирование электропривода, приведенный к валу электродвигателя.

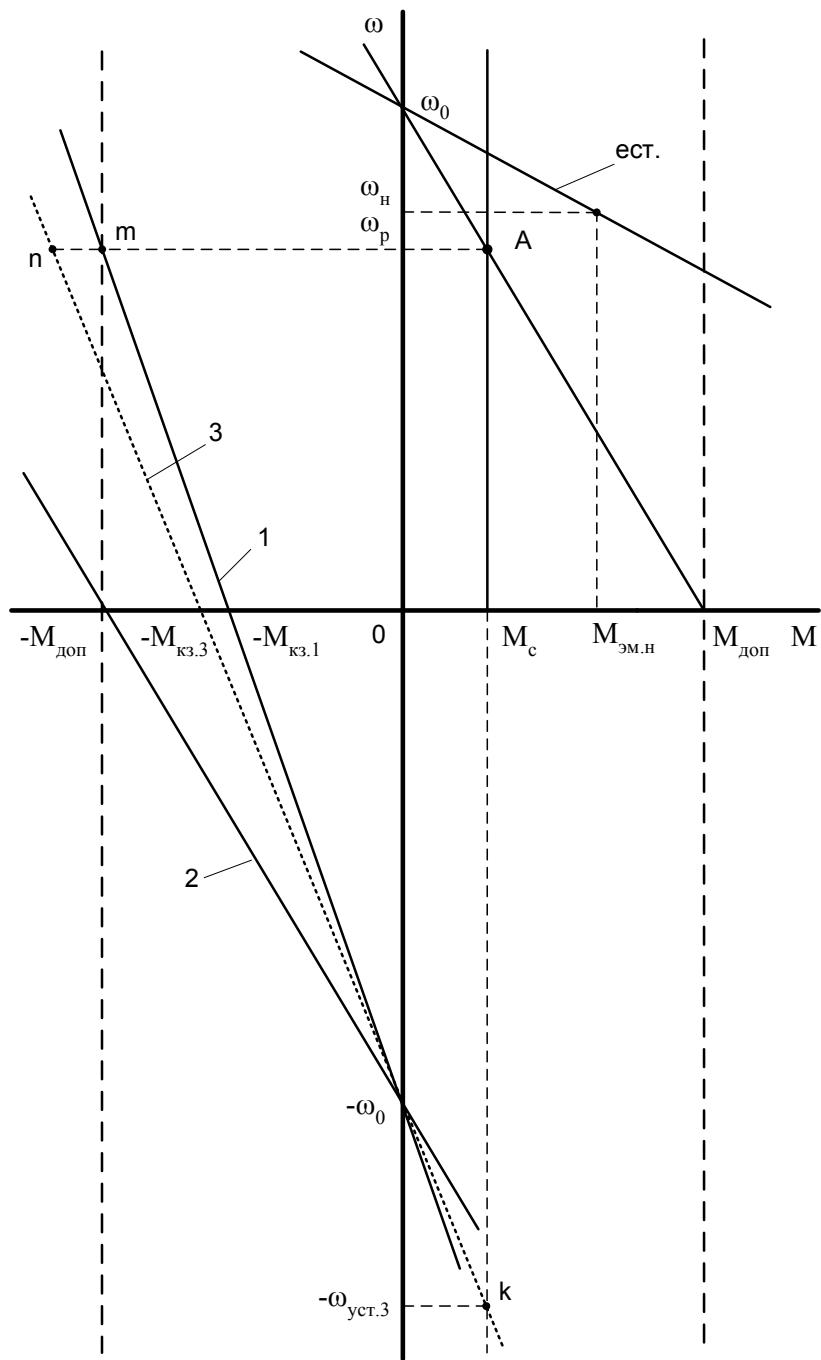


Рисунок 2.5

2.5 Приближенный расчет времени торможения электропривода в режиме противовключения при генераторной нагрузке

Процесс торможения в режиме противовключения из генераторного режима работы аналогичен рассмотренному выше, а совокупность механических характеристик для данного вида торможения представлена на рисунке 2.6. Отличия состоят в определении значений момента нагрузки на валу электродвигателя M_c и расчетной установившейся скорости вращения $\omega_{уст.3}$ для усредненной расчетной механической характеристики 3, на основании которой осуществляется оценка времени торможения:

$$t_{\text{торм.}} = J_3 \cdot \frac{\omega_0}{M_{кз.3}} \cdot \ln \frac{-\omega_{уст.3} - \omega_p}{-\omega_{уст.3}}, \quad (2.17)$$

$$\text{где } M_{кз.3} = M_{\text{доп.}} \cdot \left(\frac{\omega_0}{2 \cdot \omega_0 + \omega_p} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_0 + 3 \cdot \omega_p}{2 \cdot \omega_0 + 2 \cdot \omega_p} \right);$$

$$\omega_{уст.3} = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{M_c}{M_{кз.3}} \right);$$

$$M_c = M_{с.мех.} - M_{п.};$$

$$M_{с.мех.} = \frac{M_{\text{мех.}} \cdot \eta_{п.}}{i_{ст.}}$$

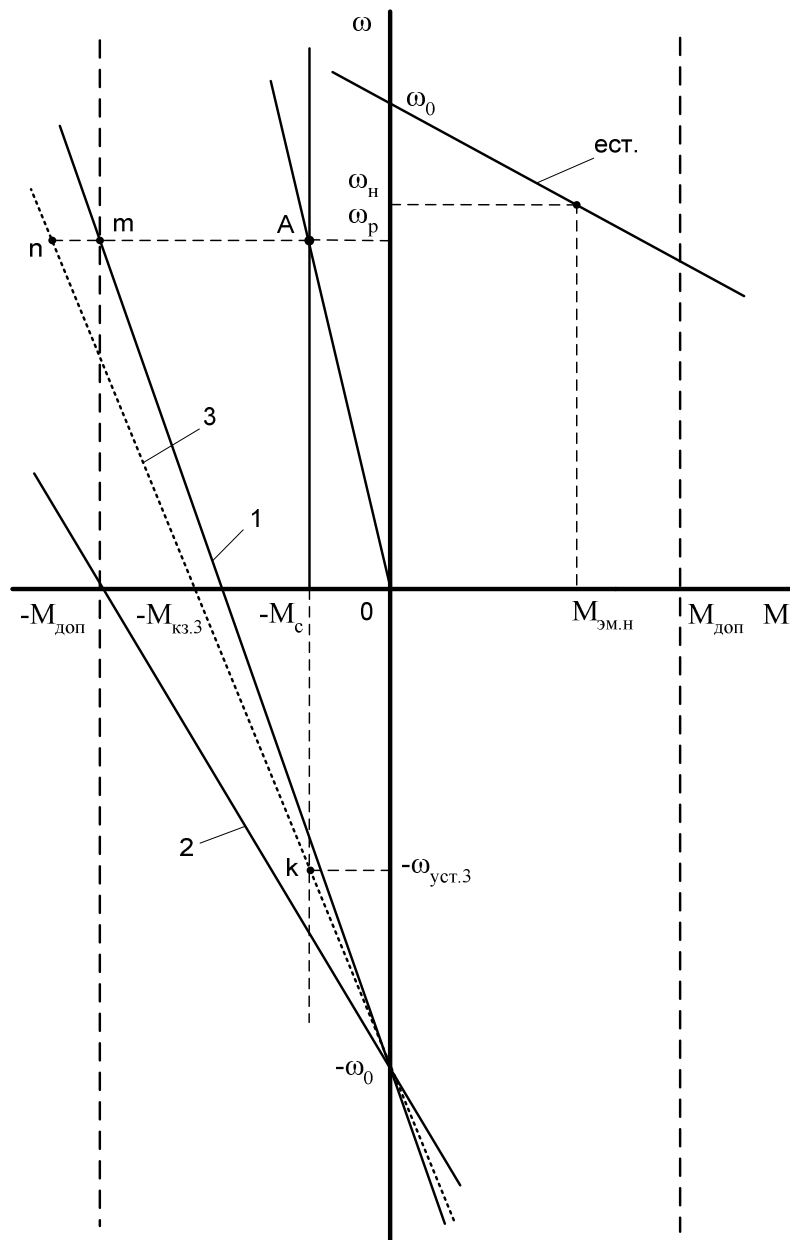


Рисунок 2.6

Расчетные зависимости времени протекания рассмотренных видов переходных процессов сведены в таблицу 2.2 .

Следует отметить, что данные расчетные зависимости применимы для приближенной оценки времени переходных процессов в электроприводах с асинхронными двигателями при регулировании координат введением активных сопротивлений в цепь ротора. При этом величина допустимого момента принимается равной критическому моменту асинхронного двигателя, а рабочие участки механической характеристики заменяются прямыми, проходящими через точку идеального холостого хода и точки, определяемые координатами рабочих точек и значением допустимого момента.

Таблица 2.2

Вид переходного процесса	Характер установившегося режима работы	Выражения для расчета времени переходного процесса
<p>Пуск в установившийся режим работы (без пусковой диаграммы)</p>	<p>двигательный</p>	$t_{\text{пуск.}} = T_{\text{м3}} \cdot \ln \frac{\omega_{\text{уст.3}}}{\omega_{\text{уст.3}} - \omega_{\text{p}}}, \text{ где } T_{\text{м3}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot \omega_0}{M_{\text{кз.3}}}; J_{\text{э}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст}}^2}; \omega_{\text{уст.3}} = \frac{\omega_0 \cdot (M_{\text{кз.3}} - M_{\text{с}})}{M_{\text{кз.3}}};$ $M_{\text{кз.3}} = 0,5 \cdot M_{\text{доп.}} + 0,5 \cdot M_{\text{с}} \cdot \left(\frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_{\text{p}}} \right); M_{\text{с}} = M_{\text{с.мех.}} + M_{\text{п}}, M_{\text{с.мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.}} \cdot \eta_{\text{п}}}.$
<p>Пуск в установившийся режим работы (с пусковой диаграммой)</p>	<p>двигательный</p>	$t_{\text{пуск.}} = 3 \cdot T_{\text{м3}}, \text{ где } T_{\text{м3}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\omega_{\text{p}}}{M_{\text{кз.3}} - M_{\text{с}}}; J_{\text{э}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст}}^2};$ $M_{\text{кз.3}} = \frac{(\omega_{\text{p}} + \omega_1 + \omega_2) \cdot (M_{\text{доп.}} - M_{\text{с}})}{2 \cdot \omega_{\text{p}}} + M_{\text{с}}; \omega_1 = \frac{\omega_0 \cdot (M_{\text{доп.}} - M_{\text{с}})}{M_{\text{доп.}}}; \omega_2 = \frac{\omega_0 \cdot (M_{\text{кз.2}} - M_{\text{доп.}})}{M_{\text{кз.2}}};$ $M_{\text{кз.2}} = \frac{M_{\text{с}} \cdot \omega_0}{\omega_0 - \omega_{\text{p}}}; M_{\text{с}} = M_{\text{с.мех.}} + M_{\text{п}}, M_{\text{с.мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.}} \cdot \eta_{\text{п}}}.$
<p>Пуск в установившийся режим работы</p>	<p>генераторный</p>	$t_{\text{пуск.}} = T_{\text{м3}} \cdot \ln \frac{\omega_{\text{уст.3}}}{\omega_{\text{уст.3}} - \omega_{\text{p}}}, \text{ где } T_{\text{м3}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\omega_0}{M_{\text{кз.3}}}; J_{\text{э}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст}}^2}; M_{\text{кз.3}} = \frac{M_{\text{доп.}} \cdot (4 \cdot \omega_0 - \omega_{\text{p}})}{(4 \cdot \omega_0 - 2 \cdot \omega_{\text{p}})};$ $\omega_{\text{уст.3}} = \frac{\omega_0 \cdot (M_{\text{кз.3}} + M_{\text{с}})}{M_{\text{кз.3}}}; M_{\text{с}} = M_{\text{с.мех.}} - M_{\text{п}}; M_{\text{с.мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}} \cdot \eta_{\text{п}}}{i_{\text{ст.}}}.$

Продолжение таблицы 2.2

Вид переходного процесса	Характер установившегося режима работы	Выражения для расчета времени переходного процесса
Динамическое торможение из установившегося режима работы	двигательный	$t_{\text{торм.}} = T_{\text{м3}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3}} - \omega_{\text{p}}}{-\omega_{\text{уст.3}}}, \text{ где } T_{\text{м3}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\omega_{\text{p}}}{M_{\text{f}}}; J_{\text{э}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст}}^2};$ $M_{\text{f}} = M_{\text{доп.}} \cdot \left[\frac{3}{2} - \frac{M_{\text{доп.}} \cdot (\omega_0 - \omega_{\text{н}})}{2 \cdot \omega_{\text{p}} \cdot M_{\text{эм.н}}} \right]; \omega_{\text{уст.3}} = \omega_{\text{p}} \cdot \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{f}}}; M_{\text{с}} = M_{\text{с.мех.}} + M_{\text{п}}; M_{\text{с.мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.}} \cdot \eta_{\text{п}}}.$
Торможение противовключением из установившегося режима работы	двигательный	$t_{\text{торм.}} = T_{\text{м3}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3}} - \omega_{\text{p}}}{-\omega_{\text{уст.3}}}, \text{ где } T_{\text{м3}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\omega_0}{M_{\text{кз.3}}}; J_{\text{э}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.}}^2}; \omega_{\text{уст.3}} = \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{кз.3}}} \right);$ $M_{\text{кз.3}} = M_{\text{доп.}} \cdot \left(\frac{\omega_0}{2 \cdot \omega_0 + \omega_{\text{p}}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_0 + 3 \cdot \omega_{\text{p}}}{2 \cdot \omega_0 + 2 \cdot \omega_{\text{p}}} \right); M_{\text{с}} = M_{\text{с.мех.}} + M_{\text{п}}; M_{\text{с.мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.}} \cdot \eta_{\text{п}}}.$
	генераторный	$t_{\text{торм.}} = T_{\text{м3}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3}} - \omega_{\text{p}}}{-\omega_{\text{уст.3}}}, \text{ где } T_{\text{м3}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{\omega_0}{M_{\text{кз.3}}}; J_{\text{э}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.}}^2}; \omega_{\text{уст.3}} = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{кз.3}}} \right);$ $M_{\text{кз.3}} = M_{\text{доп.}} \cdot \left(\frac{\omega_0}{2 \cdot \omega_0 + \omega_{\text{p}}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_0 + 3 \cdot \omega_{\text{п}}}{2 \cdot \omega_0 + 2 \cdot \omega_{\text{p}}} \right); M_{\text{с}} = M_{\text{с.мех.}} - M_{\text{п}}; M_{\text{с.мех.}} = \frac{M_{\text{мех.}} \cdot \eta_{\text{п}}}{i_{\text{ст.}}}.$

2.6 Пример выполнения оптимизации механической части электропривода

1. Дано:

электропривод обеспечивает цикл работы механизма активного типа с частотами вращения:

99 об/мин - во втором квадранте (n_{p1});

-148 об/мин - в третьем квадранте (n_{p2}).

Момент, развиваемый механизмом ($M_{\text{мех.}}$), равен 63,232 Н·м; момент инерции вращающихся масс механизма ($J_{\text{мех.}}$) составляет 5 кг·м²; коэффициент, учитывающий увеличение момента инерции механической части электропривода за счет момента инерции механического передаточного устройства (σ) равен 1,2; КПД механического передаточного устройства ($\eta_{\text{п}}$) равен 0,94. Используется реостатный способ регулирования координат, допустимая величина электромагнитного момента электродвигателя в переходных режимах превышает значение номинального электромагнитного момента в три раза. ($M_{\text{доп.}} = 3 \cdot M_{\text{эм.н}}$).

В качестве электродвигательных устройств предварительно выбраны (по значению расчетной мощности за цикл работы) электродвигатели со следующими паспортными данными:

двигатель №1 – $P_{\text{н}} = 0,7$ кВт; $U_{\text{н}} = 220$ В; $I_{\text{н}} = 4,3$ А; $n_{\text{н}} = 3000$ об/мин; $R_{\text{яц. } 20} = 5,3$ Ом (суммарное сопротивление цепи якоря при 20 °С); $J_{\text{д}} = 0,0125$ кг·м².

двигатель №2 – $P_{\text{н}} = 0,7$ кВт; $U_{\text{н}} = 220$ В; $I_{\text{н}} = 4,2$ А; $n_{\text{н}} = 750$ об/мин; $R_{\text{яц. } 20} = 4,98$ Ом (суммарное сопротивление цепи якоря при 20 °С); $J_{\text{д}} = 0,116$ кг·м².

Дополнительные условия:

- торможение со скорости n_{p2} выполняется в режиме противовключения;
- рабочая температура обмоток - 75 °С;
- стандартное передаточное число выбирается наиболее близкое к расчетному в соответствии с таблицей 2.1.

Определить:

а) передаточные числа механических передаточных устройств для каждого варианта электродвигателя;

б) время пусков и торможений двух вариантов электроприводов для заданного рабочего цикла;

в) электродвигатель и передаточное устройство, обеспечивающие минимальное время переходных процессов.

Решение:

а)

- определяем суммарное сопротивление цепи якоря электродвигателей при рабочей температуре обмоток

$$R_{\text{яц.1(75)}} = R_{\text{яц.1(20)}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 5,3 \cdot (1 + 0,004 \cdot 55) = 5,3 \cdot (1 + 0,22) = 6,466 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{яц.2(75)}} = R_{\text{яц.2(20)}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 4,98 \cdot (1 + 0,004 \cdot 55) = 4,98 \cdot (1 + 0,22) = 6,0756 \text{ Ом};$$

- номинальные скорости вращения электродвигателей

$$\omega_{\text{н1}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н1}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{н2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н2}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 750}{60} = 78,5 \text{ с}^{-1};$$

- коэффициент связи электродвигателя в номинальном режиме

$$C_{\text{н1}} = (k \cdot \Phi_{\text{н}})_{\text{1}} = \frac{U_{\text{н1}} - I_{\text{н1}} \cdot R_{\text{яц.1(75)}}}{\omega_{\text{н1}}} = \frac{220 - 4,3 \cdot 6,466}{314} = 0,612 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$C_{\text{н2}} = (k \cdot \Phi_{\text{н}})_{\text{2}} = \frac{U_{\text{н2}} - I_{\text{н2}} \cdot R_{\text{яц.2(75)}}}{\omega_{\text{н2}}} = \frac{220 - 4,2 \cdot 6,0756}{78,5} = 2,477 \text{ В} \cdot \text{с};$$

- угловая скорость идеального холостого хода электродвигателя

$$\omega_{\text{01}} = \frac{U_{\text{н1}}}{C_{\text{н1}}} = \frac{220}{0,612} = 359,5 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{02}} = \frac{U_{\text{н2}}}{C_{\text{н2}}} = \frac{220}{2,476} = 88,85 \text{ с}^{-1};$$

- номинальный момент на валу электродвигателя

$$M_{\text{н1}} = \frac{P_{\text{н1}}}{\omega_{\text{н1}}} = \frac{700}{314} = 2,229 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{н2}} = \frac{P_{\text{н2}}}{\omega_{\text{н2}}} = \frac{700}{78,5} = 8,917 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- номинальный электромагнитный момент электродвигателя

$$M_{\text{эм.н1}} = C_{\text{н1}} \cdot I_{\text{н1}} = 0,612 \cdot 4,3 = 2,631 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.н2}} = C_{\text{н2}} \cdot I_{\text{н2}} = 2,477 \cdot 4,2 = 10,4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- момент потерь электродвигателя

$$M_{\text{п1}} = M_{\text{эм.н1}} - M_{\text{н1}} = 2,631 - 2,229 = 0,402 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{п2}} = M_{\text{эм.н2}} - M_{\text{н2}} = 10,4 - 8,917 = 1,483 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- угловая скорость механизма в первой рабочей точке (второй квадрант)

$$\omega_{\text{мех.1}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{p1}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 99}{60} = 10,362 \text{ с}^{-1};$$

- угловая скорость механизма (по модулю) во второй рабочей точке (третий квадрант)

$$\omega_{\text{мех.2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{p2}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 148}{60} = 15,491 \text{ с}^{-1};$$

- расчетное передаточное число редуктора

$$i_{\text{p1}} = \frac{\omega_{\text{н1}}}{\omega_{\text{мех.мах.}}} = \frac{\omega_{\text{н1}}}{\omega_{\text{мех.2}}} = \frac{314}{15,491} = 20,27;$$

$$i_{\text{p2}} = \frac{\omega_{\text{н2}}}{\omega_{\text{мех.мах.}}} = \frac{\omega_{\text{н2}}}{\omega_{\text{мех.2}}} = \frac{78,5}{15,491} = 5,067;$$

- выбор стандартного передаточного числа, наиболее близкого к расчетному

$$i_{\text{ст.1}} = 20 < i_{\text{p1}} = 20,27;$$

$$i_{\text{ст.2}} = 5 < i_{\text{p2}} = 5,067;$$

б)

- угловая скорость вала электродвигателя в первой рабочей точке (второй квадрант)

$$\omega_{\text{p1(1)}} = \omega_{\text{мех.1}} \cdot i_{\text{ст.1}} = 10,362 \cdot 20 = 207,24 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{p1(2)}} = \omega_{\text{мех.1}} \cdot i_{\text{ст.2}} = 10,362 \cdot 5 = 51,81 \text{ с}^{-1};$$

- угловая скорость вала электродвигателя (по модулю) во второй рабочей точке (третий квадрант)

$$\omega_{\text{p2(1)}} = \omega_{\text{мех.2}} \cdot i_{\text{ст.1}} = 15,491 \cdot 20 = 309,82 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{p2(2)}} = \omega_{\text{мех.2}} \cdot i_{\text{ст.2}} = 15,491 \cdot 5 = 77,455 \text{ с}^{-1};$$

- эквивалентный момент инерции вращающихся масс механической части электропривода

$$J_{\text{э1}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.1}}^2} = 1,2 \cdot 0,0125 + \frac{5}{20^2} = 0,0275 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{\text{э2}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.2}}^2} = 1,2 \cdot 0,116 + \frac{5}{5^2} = 0,3392 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

- момент нагрузки в генераторном режиме работы (по модулю), приведенный к валу электродвигателя (второй квадрант)

$$M_{с.мех.Г1} = \frac{M_{с.мех.} \cdot \eta_{п}}{i_{ст.1}} = \frac{62,232 \cdot 0,94}{20} = 2,925 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{с.мех.Г2} = \frac{M_{с.мех.} \cdot \eta_{п}}{i_{ст.2}} = \frac{62,232 \cdot 0,94}{5} = 11,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- момент нагрузки в двигательном режиме работы (по модулю), приведенный к валу электродвигателя (третий квадрант)

$$M_{с.мех.Д1} = \frac{M_{с.мех.}}{\eta_{п} \cdot i_{ст.1}} = \frac{62,232}{0,94 \cdot 20} = 3,31 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{с.мех.Д2} = \frac{M_{с.мех.}}{\eta_{п} \cdot i_{ст.2}} = \frac{62,232}{0,94 \cdot 5} = 13,24 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- момент на валу электродвигателя (по модулю) в генераторном режиме работы (второй квадрант)

$$M_{с.Г1} = M_{с.мех.Г1} - M_{п1} = 2,925 - 0,402 = 2,523 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{с.Г2} = M_{с.мех.Г2} - M_{п2} = 11,7 - 1,483 = 10,217 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- момент на валу электродвигателя (по модулю) в двигательном режиме работы (третий квадрант)

$$M_{с.Д1} = M_{с.мех.Д1} + M_{п1} = 3,31 + 0,402 = 3,712 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{с.Д2} = M_{с.мех.Д2} + M_{п2} = 13,24 + 1,483 = 14,724 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- предельно допустимое значение электромагнитного момента электродвигателя в соответствии с заданием

$$M_{доп.1} = 3 \cdot M_{эм.н1} = 3 \cdot 2,631 = 7,893 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{доп.2} = 3 \cdot M_{эм.н2} = 3 \cdot 10,4 = 31,2 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- момент короткого замыкания (по модулю) рабочей характеристики в двигательном режиме работы электропривода (третий квадрант)

$$M_{кз.1(1)} = \frac{M_{с.Д1} \cdot \omega_{01}}{\omega_{01} - \omega_{р2(1)}} = \frac{3,712 \cdot 359,5}{359,5 - 309,82} = 26,861 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{кз.1(2)} = \frac{M_{с.Д2} \cdot \omega_{02}}{\omega_{02} - \omega_{р2(2)}} = \frac{14,724 \cdot 88,85}{88,85 - 77,455} = 114,807 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- определяем типы пусков и торможений, используемых в соответствии с заданием

поскольку первая рабочая точка находится во втором квадранте, то пуск осуществляется в генераторный режим работы (рисунок 2.3);

полное торможение из генераторного режима работы может быть выполнено лишь при торможении противовключением (рисунок 2.6);

пуск в двигательный режим осуществляется по типу, для которого выполняется условие $M_{\text{доп.}} < M_{\text{кз.1}}$ (рисунок 2.2);

торможение из двигательного режима выполняется в режиме противоклучения в соответствии с дополнительным условием задания (рисунок 2.5);

- расчет времени пуска в генераторный режим работы

$$M_{\text{кз.3(1)}} = \frac{M_{\text{доп.1}} \cdot (4 \cdot \omega_{01} - \omega_{\text{p1(1)}})}{4 \cdot \omega_{01} - 2 \cdot \omega_{\text{p1(1)}}} = \frac{7,893 \cdot (4 \cdot 359,5 - 207,24)}{4 \cdot 359,5 - 2 \cdot 207,24} = 9,491 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{кз.3(2)}} = \frac{M_{\text{доп.2}} \cdot (4 \cdot \omega_{02} - \omega_{\text{p1(2)}})}{4 \cdot \omega_{02} - 2 \cdot \omega_{\text{p1(2)}}} = \frac{31,2 \cdot (4 \cdot 88,85 - 51,81)}{4 \cdot 88,85 - 2 \cdot 51,81} = 37,62 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\omega_{\text{уст.3(1)}} = \frac{\omega_{01} \cdot (M_{\text{кз.3(1)}} + M_{\text{с.Г1}})}{M_{\text{кз.3(1)}}} = \frac{359,5 \cdot (9,491 + 2,523)}{9,491} = 444,953 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{уст.3(2)}} = \frac{\omega_{02} \cdot (M_{\text{кз.3(2)}} + M_{\text{с.Г2}})}{M_{\text{кз.3(2)}}} = \frac{88,85 \cdot (37,62 + 10,217)}{37,62} = 112,98 \text{ с}^{-1};$$

$$T_{\text{м3(1)}} = J_{\text{э1}} \cdot \frac{\omega_{01}}{M_{\text{кз.3(1)}}} = \frac{0,0275 \cdot 359,5}{9,941} = 0,995 \text{ с};$$

$$T_{\text{м3(2)}} = J_{\text{э2}} \cdot \frac{\omega_{02}}{M_{\text{кз.3(2)}}} = \frac{0,3392 \cdot 88,85}{37,62} = 0,801 \text{ с};$$

$$t_{\text{пуск.Г1(1)}} = T_{\text{м3(1)}} \cdot \ln \frac{\omega_{\text{уст.3(1)}}}{\omega_{\text{уст.3(1)}} - \omega_{\text{p1(1)}}} = 0,995 \cdot \ln \frac{419,81}{419,81 - 207,24} = 0,677 \text{ с};$$

$$t_{\text{пуск.Г1(2)}} = T_{\text{м3(2)}} \cdot \ln \frac{\omega_{\text{уст.3(2)}}}{\omega_{\text{уст.3(2)}} - \omega_{\text{p1(2)}}} = 0,801 \cdot \ln \frac{113,12}{113,12 - 51,81} = 0,491 \text{ с};$$

- расчет времени торможения из генераторного режима работы

$$M_{\text{кз.3(1)}} = M_{\text{доп.1}} \cdot \left(\frac{\omega_{01}}{2 \cdot \omega_{01} + \omega_{\text{p1(1)}}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_{01} + 3 \cdot \omega_{\text{p1(1)}}}{2 \cdot \omega_{01} + 2 \cdot \omega_{\text{p1(1)}}} \right) =$$

$$= 7,893 \cdot \left(\frac{359,5}{(2 \cdot 359,5 + 207,24)} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot 359,5 + 3 \cdot 207,24}{2 \cdot 359,5 + 2 \cdot 207,24} \right) = 5,566 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{кз.3(2)}} = M_{\text{доп.2}} \cdot \left(\frac{\omega_{02}}{2 \cdot \omega_{02} + \omega_{\text{p1(2)}}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_{02} + 3 \cdot \omega_{\text{p1(2)}}}{2 \cdot \omega_{02} + 2 \cdot \omega_{\text{p1(2)}}} \right) =$$

$$= 31,2 \cdot \frac{88,85}{(2 \cdot 88,85 + 51,81)} \cdot \left(\frac{4 \cdot 88,85 + 3 \cdot 51,81}{2 \cdot 88,85 + 2 \cdot 51,81} \right) = 21,932 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\omega_{\text{уст.3(1)}} = \omega_{01} \cdot \left(1 - \frac{M_{\text{с.}\Gamma 1}}{M_{\text{кз.3(1)}}}\right) = 359,5 \cdot \left(1 - \frac{2,523}{5,566}\right) = 196,543 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{уст.3(2)}} = \omega_{02} \cdot \left(1 - \frac{M_{\text{с.}\Gamma 2}}{M_{\text{кз.3(2)}}}\right) = 88,85 \cdot \left(1 - \frac{10,217}{21,932}\right) = 47,459 \text{ с}^{-1};$$

$$T_{\text{м3(1)}} = J_{\text{э1}} \cdot \frac{\omega_{01}}{M_{\text{кз.3(1)}}} = 0,0275 \cdot \frac{359,5}{5,566} = 1,776 \text{ с};$$

$$T_{\text{м3(2)}} = J_{\text{э2}} \cdot \frac{\omega_{02}}{M_{\text{кз.3(2)}}} = 0,3392 \cdot \frac{88,85}{21,932} = 1,374 \text{ с};$$

$$t_{\text{топм.}\Gamma 1} = T_{\text{м3(1)}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3(1)}} - \omega_{\text{п.1(1)}}}{-\omega_{\text{уст.3(1)}}} = 1,776 \cdot \ln \frac{196,543 + 207,24}{196,543} = 1,279 \text{ с};$$

$$t_{\text{топм.}\Gamma 2} = T_{\text{м3(2)}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3(2)}} - \omega_{\text{п.1(2)}}}{-\omega_{\text{уст.3(2)}}} = 1,374 \cdot \ln \frac{47,459 + 51,81}{47,459} = 1,013 \text{ с};$$

- расчет времени пуска в двигательный режим работы

$$M_{\text{кз.2(1)}} = \frac{M_{\text{с.Д1}} \cdot \omega_{01}}{\omega_{01} - \omega_{\text{п2(1)}}} = \frac{3,712 \cdot 359,5}{359,5 - 309,82} = 26,86 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{кз.2(2)}} = \frac{M_{\text{с.Д2}} \cdot \omega_{02}}{\omega_{02} - \omega_{\text{п2(2)}}} = \frac{14,724 \cdot 88,85}{88,85 - 77,455} = 114,807 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\omega_{1(1)} = \frac{\omega_{01} \cdot (M_{\text{доп.1}} - M_{\text{с.Д1}})}{M_{\text{доп.1}}} = \frac{359,5 \cdot (7,893 - 3,712)}{7,893} = 190,43 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{1(2)} = \frac{\omega_{02} \cdot (M_{\text{доп.2}} - M_{\text{с.Д2}})}{M_{\text{доп.2}}} = \frac{88,85 \cdot (31,2 - 14,724)}{31,2} = 46,922 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{2(1)} = \frac{\omega_{01} \cdot (M_{\text{кз.2(1)}} - M_{\text{доп.1}})}{M_{\text{кз.2(1)}}} = \frac{359,5 \cdot (26,86 - 7,893)}{26,86} = 253,86 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{2(2)} = \frac{\omega_{02} \cdot (M_{\text{кз.2(2)}} - M_{\text{доп.2}})}{M_{\text{кз.2(2)}}} = \frac{88,85 \cdot (114,799 - 31,2)}{114,799} = 64,7 \text{ с}^{-1};$$

$$\begin{aligned} M_{\text{кз.3(1)}} &= \frac{(\omega_{\text{п2(1)}} + \omega_{1(1)} + \omega_{2(1)}) \cdot (M_{\text{доп.1}} - M_{\text{с.Д1}})}{2 \cdot \omega_{\text{п2(1)}}} + M_{\text{с.Д1}} = \\ &= \frac{(309,82 + 190,43 + 253,86) \cdot (7,893 - 3,712)}{2 \cdot 309,82} + 3,712 = 8,8 \text{ Н}\cdot\text{м}; \end{aligned}$$

$$M_{кз.3(2)} = \frac{(\omega_{p2(2)} + \omega_{1(2)} + \omega_{2(2)}) \cdot (M_{доп.2} - M_{с.Д2})}{2 \cdot \omega_{p2(2)}} + M_{с.Д2} =$$

$$= \frac{(77,455 + 46,299 + 64,7)(31,2 - 14,724)}{2 \cdot 77,455} + 14,724 = 34,768 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$T_{м3(1)} = J_{\vartheta 1} \cdot \frac{\omega_{p2(1)}}{M_{кз.3(1)} - M_{с.Д1}} = 0,0275 \cdot \frac{309,82}{8,8 - 3,712} = 1,675 \text{ с};$$

$$T_{м3(2)} = J_{\vartheta 2} \cdot \frac{\omega_{p2(2)}}{M_{кз.3(2)} - M_{с.Д2}} = 0,3392 \cdot \frac{77,455}{34,768 - 14,724} = 1,311 \text{ с};$$

$$t_{пуск.2(1)} = 3 \cdot T_{м3(1)} = 3 \cdot 1,675 = 5,025 \text{ с};$$

$$t_{пуск.2(2)} = 3 \cdot T_{м3(2)} = 3 \cdot 1,311 = 3,933 \text{ с};$$

- расчет времени торможения из двигательного режима работы

$$M_{кз.3(1)} = M_{доп.1} \cdot \left(\frac{\omega_{01}}{2 \cdot \omega_{01} + \omega_{p2(1)}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_{01} + 3 \cdot \omega_{p2(1)}}{2 \cdot \omega_{01} + 2 \cdot \omega_{p2(1)}} \right) =$$

$$= \left(\frac{7,893 \cdot 359,5}{2 \cdot 359,5 + 309,82} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot 359,5 + 3 \cdot 309,82}{2 \cdot 359,5 + 2 \cdot 309,82} \right) = 4,877 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{кз.3(2)} = M_{доп.2} \cdot \left(\frac{\omega_{02}}{2 \cdot \omega_{02} + \omega_{p2(2)}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_{02} + 3 \cdot \omega_{p2(2)}}{2 \cdot \omega_{02} + 2 \cdot \omega_{p2(2)}} \right) =$$

$$= \left(\frac{31,2 \cdot 88,85}{2 \cdot 88,85 + 77,455} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot 80,85 + 3 \cdot 77,455}{2 \cdot 88,85 + 2 \cdot 77,455} \right) = 20,347 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\omega_{уст.3(1)} = \omega_{01} \cdot \left(1 + \frac{M_{с.Д1}}{M_{кз.3(1)}} \right) = 359,5 \cdot \left(1 + \frac{3,712}{4,877} \right) = 633,124 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{уст.3(2)} = \omega_{02} \cdot \left(1 + \frac{M_{с.Д2}}{M_{кз.3(2)}} \right) = 88,85 \cdot \left(1 + \frac{14,724}{20,347} \right) = 153,141 \text{ с}^{-1};$$

$$T_{м3(1)} = J_{\vartheta 1} \cdot \frac{\omega_{01}}{M_{кз.3(1)}} = 0,0275 \cdot \frac{359,5}{4,877} = 2,028 \text{ с};$$

$$T_{м3(2)} = J_{\vartheta 2} \cdot \frac{\omega_{02}}{M_{кз.3(2)}} = 0,3392 \cdot \frac{88,85}{20,347} = 1,481 \text{ с};$$

$$t_{торм.2(1)} = T_{м3(1)} \cdot \ln \frac{-\omega_{уст.3(1)} - \omega_{p2(1)}}{-\omega_{уст.3(1)}} = 2,028 \cdot \ln \frac{-633,124 - 309,82}{-633,124} = 0,808 \text{ с};$$

$$t_{\text{торм.2(2)}} = T_{\text{м3(2)}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3(2)}} - \omega_{\text{р2(2)}}}{-\omega_{\text{уст.3(2)}}} = 1,481 \cdot \ln \frac{-153,141 - 77,455}{-153,141} = 0,606 \text{ с};$$

- расчет времени переходных процессов за цикл работы

$$t_{\text{п1}} = t_{\text{пуск.1(1)}} + t_{\text{торм.1(1)}} + t_{\text{пуск.2(1)}} + t_{\text{торм.2(1)}} = 0,677 + 1,279 + 5,025 + 0,808 = 7,789 \text{ с};$$

$$t_{\text{п2}} = t_{\text{пуск.1(2)}} + t_{\text{торм.1(2)}} + t_{\text{пуск.2(2)}} + t_{\text{торм.2(2)}} = 0,491 + 1,013 + 3,933 + 0,606 = 6,043 \text{ с};$$

в)

выбирается для заданных условий работы электропривода электродвигатель №2, обеспечивающий минимальное время переходных процессов за цикл работы

2. Дано:

электропривод обеспечивает цикл работы механизма реактивного типа с частотами вращения:

46 об/мин - в первом квадранте ($n_{\text{р1}}$);

-112 об/мин - в третьем квадранте ($n_{\text{р2}}$).

Момент, развиваемый механизмом ($M_{\text{мех.}}$), равен 5013,38 Н·м; момент инерции вращающихся масса механизма ($J_{\text{мех.}}$) составляет 980 кг·м²; коэффициент, учитывающий увеличение момента инерции механической части электропривода за счет момента инерции механического передаточного устройства равен 1,2; КПД механического передаточного устройства ($\eta_{\text{п}}$) равен 0,93. Используется реостатный способ регулирования координат, допустимая величина электромагнитного момента электродвигателя в переходных режимах превышает значение номинального электромагнитного момента в три раза ($M_{\text{доп.}} = 3 \cdot M_{\text{эм.н}}$).

В качестве электродвигательных устройств предварительно выбраны (по значению расчетной мощности за цикл работы) электродвигатели со следующими паспортными данными:

двигатель №1 - $P_{\text{н}} = 42 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$; $I_{\text{н}} = 218 \text{ А}$; $n_{\text{н}} = 1500 \text{ об/мин}$; $R_{\text{яц. 20}} = 0,0462 \text{ Ом}$ (суммарное сопротивление цепи якоря при 20 °С); $J_{\text{д}} = 3,1 \text{ кг·м}^2$.

двигатель №2 - $P_{\text{н}} = 42 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$; $I_{\text{н}} = 223 \text{ А}$; $n_{\text{н}} = 600 \text{ об/мин}$; $R_{\text{яц. 20}} = 0,0225 \text{ Ом}$ (суммарное сопротивление цепи якоря при 20 °С); $J_{\text{д}} = 12 \text{ кг·м}^2$.

Дополнительные условия:

- торможение со скорости $n_{\text{р1}}$ выполняется в режиме автономного генератора;

- торможение со скорости $n_{\text{р2}}$ выполняется в режиме противовключения;

- рабочая температура обмоток - 75 °С;

- стандартное передаточное число выбирается наиболее близкое к расчетному в соответствии с таблицей 2.1.

Определить:

а) передаточные числа механических передаточных устройств для каждого варианта электродвигателя;

б) время пусков и торможений двух вариантов электроприводов для заданного рабочего цикла;

в) электродвигатель и передаточное устройство, обеспечивающие минимальное время переходных процессов.

Решение:

а)

- определяем суммарное сопротивление цепи якоря электродвигателей при рабочей температуре обмоток

$$R_{\text{яц.1(75)}} = R_{\text{яц.1(20)}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 0,0462 \cdot (1 + 0,004 \cdot 55) = 0,0462 \cdot (1 + 0,22) = 0,05636 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{яц.2(75)}} = R_{\text{яц.2(20)}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 0,0225 \cdot (1 + 0,004 \cdot 55) = 0,0225 \cdot (1 + 0,22) = 0,02745 \text{ Ом};$$

- номинальные скорости вращения электродвигателей

$$\omega_{\text{н1}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н1}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{н2}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н2}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 600}{60} = 62,8 \text{ с}^{-1};$$

- коэффициент связи электродвигателя в номинальном режиме

$$C_{\text{н1}} = (k \cdot \Phi_{\text{н}})_1 = \frac{U_{\text{н1}} - I_{\text{н1}} \cdot R_{\text{яц.1(75)}}}{\omega_{\text{н1}}} = \frac{220 - 218 \cdot 0,05636}{157} = 1,323 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$C_{\text{н2}} = (k \cdot \Phi_{\text{н}})_2 = \frac{U_{\text{н2}} - I_{\text{н2}} \cdot R_{\text{яц.2(75)}}}{\omega_{\text{н2}}} = \frac{220 - 223 \cdot 0,02745}{62,8} = 3,406 \text{ В} \cdot \text{с};$$

- угловая скорость идеального холостого хода электродвигателя

$$\omega_{01} = \frac{U_{\text{н1}}}{C_{\text{н1}}} = \frac{220}{1,322} = 166,289 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{02} = \frac{U_{\text{н2}}}{C_{\text{н2}}} = \frac{220}{3,406} = 64,592 \text{ с}^{-1};$$

- номинальный момент на валу электродвигателя

$$M_{\text{н1}} = \frac{P_{\text{н1}}}{\omega_{\text{н1}}} = \frac{42000}{157} = 267,516 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{н2} = \frac{P_{н2}}{\omega_{н2}} = \frac{42000}{62,8} = 668,79 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- номинальный электромагнитный момент электродвигателя

$$M_{эм.н1} = C_{н1} \cdot I_{н1} = 1,323 \cdot 218 = 288,414 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{эм.н2} = C_{н2} \cdot I_{н2} = 3,406 \cdot 223 = 759,538 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- момент потерь электродвигателя

$$M_{п1} = M_{эм.н1} - M_{н1} = 288,414 - 267,516 = 20,898 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{п2} = M_{эм.н2} - M_{н2} = 759,538 - 668,79 = 90,748 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- угловая скорость механизма в первой рабочей точке (первый квадрант)

$$\omega_{мех.1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{п1}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 46}{60} = 4,815 \text{ с}^{-1};$$

- угловая скорость механизма (по модулю) во второй рабочей точке (третий квадрант)

$$\omega_{мех.2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{п2}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 112}{60} = 11,723 \text{ с}^{-1};$$

- расчетное передаточное число редуктора

$$i_{п1} = \frac{\omega_{н1}}{\omega_{мех.мах.}} = \frac{\omega_{н1}}{\omega_{мех.2}} = \frac{157}{11,723} = 13,4;$$

$$i_{п2} = \frac{\omega_{н2}}{\omega_{мех.мах.}} = \frac{\omega_{н2}}{\omega_{мех.2}} = \frac{62,8}{11,723} = 5,36;$$

- выбор стандартного передаточного числа, наиболее близкого к расчетному

$$i_{ст.1} = 12,5 < i_1 = 13,4;$$

$$i_{ст.2} = 5 < i_2 = 5,36;$$

б)

- угловая скорость вала электродвигателя в первой рабочей точке (первый квадрант)

$$\omega_{п1(1)} = \omega_{мех.1} \cdot i_{ст.1} = 4,815 \cdot 12,5 = 60,188 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{п1(2)} = \omega_{мех.1} \cdot i_{ст.2} = 4,815 \cdot 5 = 24,075 \text{ с}^{-1};$$

- угловая скорость вала электродвигателя (по модулю) во второй рабочей точке (третий квадрант)

$$\omega_{п2(1)} = \omega_{мех.2} \cdot i_{ст.1} = 11,723 \cdot 12,5 = 146,538 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{p2(2)} = \omega_{\text{мех.2}} \cdot i_{\text{ст.2}} = 11,723 \cdot 5 = 58,615 \text{ с}^{-1};$$

- эквивалентный момент инерции вращающихся масс механической части электропривода

$$J_{\text{э1}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.1}}^2} = 1,2 \cdot 3,1 + \frac{980}{12,5^2} = 9,992 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{\text{э2}} = \sigma \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{мех.}}}{i_{\text{ст.2}}^2} = 1,2 \cdot 12 + \frac{980}{5^2} = 53,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

- момент нагрузки в двигательном режиме работы (по модулю), приведенный к валу электродвигателя (первый, третий квадрант)

$$M_{\text{с.мех.Д1}} = \frac{M_{\text{с.мех.}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.1}}} = \frac{5013,38}{0,93 \cdot 12,5} = 431,259 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{с.мех.Д2}} = \frac{M_{\text{с.мех.}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.2}}} = \frac{5013,38}{0,93 \cdot 5} = 1078,146 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- момент на валу электродвигателя (по модулю) в двигательном режиме работы (первый, третий квадрант)

$$M_{\text{с.Д1}} = M_{\text{с.мех.Д1}} + M_{\text{п1}} = 431,259 + 20,898 = 452,157 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{с.Д2}} = M_{\text{с.мех.Д2}} + M_{\text{п2}} = 1078,146 + 90,748 = 1168,894 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- предельно допустимое значение электромагнитного момента электродвигателя в соответствии с заданием

$$M_{\text{доп.1}} = 3 \cdot M_{\text{эм.н1}} = 3 \cdot 288,414 = 865,242 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{доп.2}} = 3 \cdot M_{\text{эм.н2}} = 3 \cdot 759,538 = 2278,614 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- момент короткого замыкания рабочей характеристики в двигательном режиме работы электропривода (первый квадрант)

$$M_{\text{кз.1.1(1)}} = \frac{M_{\text{с.Д1}} \cdot \omega_{01}}{\omega_{01} - \omega_{\text{п1(1)}}} = \frac{452,157 \cdot 166,289}{166,289 - 60,188} = 708,652 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{кз.1.1(2)}} = \frac{M_{\text{с.Д2}} \cdot \omega_{02}}{\omega_{02} - \omega_{\text{п1(2)}}} = \frac{1168,894 \cdot 64,592}{64,592 - 24,075} = 1863,445 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- момент короткого замыкания рабочей характеристики (по модулю) в двигательном режиме работы электропривода (третий квадрант)

$$M_{\text{кз.1.2(1)}} = \frac{M_{\text{с.Д1}} \cdot \omega_{01}}{\omega_{01} - \omega_{\text{п2(1)}}} = \frac{452,157 \cdot 166,289}{166,289 - 146,538} = 3806,832 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{кз.1.2(2)}} = \frac{M_{\text{с.Д2}} \cdot \omega_{02}}{\omega_{02} - \omega_{\text{п2(2)}}} = \frac{1168,894 \cdot 64,592}{64,592 - 58,615} = 12631,956 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- определяем типы пусков и торможений, используемых в соответствии с заданием

пуск в двигательный режим (первый квадрант) осуществляется по типу, для которого выполняется условие $M_{кз.1} < M_{доп.}$ (рисунок 2.1);

торможение из двигательного режима работы выполнено в режиме динамического торможения в соответствии с заданием (рисунок 2.4);

пуск в двигательный режим (третий квадрант) осуществляется по типу, для которого выполняется условие $M_{кз.1} > M_{доп.}$ (рисунок 2.2);

торможение из двигательного режима выполняется в режиме противовключения в соответствии с заданием (рисунок 2.5)

- расчет времени пуска в двигательный режим работы (первый квадрант)

$$M_{кз.3(1)} = 0,5 \cdot M_{доп.1} + 0,5 \cdot M_{с.Д1} \cdot \left(\frac{\omega_{01}}{\omega_{01} - \omega_{p1(1)}} \right) =$$

$$= 0,5 \cdot 865,242 + 0,5 \cdot 452,157 \cdot \left(\frac{166,289}{166,289 - 60,188} \right) = 786,947 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{кз.3(2)} = 0,5 \cdot M_{доп.2} + 0,5 \cdot M_{с.Д2} \cdot \left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{02} - \omega_{p1(2)}} \right) =$$

$$= 0,5 \cdot 2278,614 + 0,5 \cdot 1168,894 \cdot \left(\frac{64,592}{64,592 - 24,075} \right) = 2071,03 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\omega_{уст.3(1)} = \frac{\omega_{01} \cdot (M_{кз.3(1)} - M_{с.Д1})}{M_{кз.3(1)}} = \frac{166,289 \cdot (786,947 - 452,157)}{786,947} = 70,744 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{уст.3(2)} = \frac{\omega_{02} \cdot (M_{кз.3(2)} - M_{с.Д2})}{M_{кз.3(2)}} = \frac{64,592 \cdot (2071,03 - 1168,894)}{2071,03} = 28,136 \text{ с}^{-1};$$

$$T_{м3(1)} = J_{\omega 1} \cdot \frac{\omega_{01}}{M_{кз.3(1)}} = \frac{9,992 \cdot 166,289}{786,947} = 2,111 \text{ с};$$

$$T_{м3(2)} = J_{\omega 2} \cdot \frac{\omega_{02}}{M_{кз.3(2)}} = \frac{53,6 \cdot 64,592}{2071,03} = 1,672 \text{ с};$$

$$t_{пуск.1(1)} = T_{м3(1)} \cdot \ln \frac{\omega_{уст.3(1)}}{\omega_{уст.3(1)} - \omega_{p1(1)}} = 2,111 \cdot \ln \frac{70,744}{70,744 - 60,188} = 4,006 \text{ с};$$

$$t_{пуск.1(2)} = T_{м3(2)} \cdot \ln \frac{\omega_{уст.3(2)}}{\omega_{уст.3(2)} - \omega_{p1(2)}} = 1,672 \cdot \ln \frac{28,136}{28,136 - 24,075} = 3,236 \text{ с};$$

- расчет времени торможения из двигательного режима работы

$$\begin{aligned}
M_{Д1} &= M_{доп.1} \cdot \left(1,5 - \frac{M_{доп.1} \cdot (\omega_{01} - \omega_{н1})}{2 \cdot \omega_{p.1(1)} \cdot M_{эм.н.1}} \right) = \\
&= 865,242 \cdot \left(1,5 - \frac{865,242 \cdot (166,289 - 157)}{2 \cdot 60,188 \cdot 288,414} \right) = 1097,56 \text{ Н}\cdot\text{м}; \\
M_{Д2} &= M_{доп.2} \cdot \left(1,5 - \frac{M_{доп.2} \cdot (\omega_{02} - \omega_{н2})}{2 \cdot \omega_{p.1(2)} \cdot M_{эм.н.2}} \right) = \\
&= 2278,614 \cdot \left(1,5 - \frac{2278,614 \cdot (64,592 - 62,8)}{2 \cdot 24,075 \cdot 759,538} \right) = 3163,51 \text{ Н}\cdot\text{м};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\omega_{уст.3(1)} &= \omega_{p1(1)} \cdot \frac{M_{с.Д1}}{M_{Д1}} = 60,188 \cdot \frac{452,157}{1097,56} = 24,795 \text{ с}^{-1}; \\
\omega_{уст.3(2)} &= \omega_{p1(2)} \cdot \frac{M_{с.Д2}}{M_{Д2}} = 24,075 \cdot \frac{1168,894}{3163,51} = 8,896 \text{ с}^{-1};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{м3(1)} &= J_{\vartheta 1} \cdot \frac{\omega_{p1(1)}}{M_{Д1}} = 9,992 \cdot \frac{60,188}{1097,56} = 0,548 \text{ с}; \\
T_{м3(2)} &= J_{\vartheta 2} \cdot \frac{\omega_{p1(2)}}{M_{Д2}} = 53,6 \cdot \frac{24,075}{3163,51} = 0,408 \text{ с};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{гор.1(1)} &= T_{м3(1)} \cdot \ln \frac{-\omega_{уст.3(1)} - \omega_{p1(1)}}{-\omega_{уст.3(1)}} = 0,548 \cdot \ln \frac{-24,795 - 60,188}{-24,795} = 0,675 \text{ с}; \\
t_{гор.1(2)} &= T_{м3(2)} \cdot \ln \frac{-\omega_{уст.3(2)} - \omega_{p1(2)}}{-\omega_{уст.3(2)}} = 0,408 \cdot \ln \frac{-8,896 - 24,075}{-8,896} = 0,535 \text{ с};
\end{aligned}$$

- расчет времени пуска в двигательный режим работы (третий квадрант)

$$\begin{aligned}
M_{кз.2(1)} &= \frac{M_{с.Д1} \cdot \omega_{01}}{\omega_{01} - \omega_{p2(1)}} = \frac{452,157 \cdot 166,289}{166,289 - 146,538} = 3806,832 \text{ Н}\cdot\text{м}; \\
M_{кз.2(2)} &= \frac{M_{с.Д2} \cdot \omega_{02}}{\omega_{02} - \omega_{p2(2)}} = \frac{1168,894 \cdot 64,592}{64,592 - 58,615} = 12631,956 \text{ Н}\cdot\text{м};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\omega_{1(1)} &= \frac{\omega_{01} \cdot (M_{доп.1} - M_{с.Д1})}{M_{доп.1}} = \frac{166,289 \cdot (865,242 - 452,157)}{865,242} = 79,39 \text{ с}^{-1}; \\
\omega_{1(2)} &= \frac{\omega_{02} \cdot (M_{доп.2} - M_{с.Д2})}{M_{доп.2}} = \frac{64,592 \cdot (2278,614 - 1168,894)}{2278,614} = 31,457 \text{ с}^{-1};
\end{aligned}$$

$$\omega_{2(1)} = \frac{\omega_{01} \cdot (M_{кз.2(1)} - M_{доп.1})}{M_{кз.2(1)}} = \frac{166,289 \cdot (3806,832 - 865,242)}{3806,832} = 128,494 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{2(2)} = \frac{\omega_{02} \cdot (M_{кз.2(2)} - M_{доп.2})}{M_{кз.2(2)}} = \frac{64,592 \cdot (12631,956 - 2278,614)}{12631,956} = 52,94 \text{ с}^{-1};$$

$$M_{кз.3(1)} = \frac{(\omega_{p2(1)} + \omega_{1(1)} + \omega_{2(1)}) \cdot (M_{доп.1} - M_{с.Д1})}{2 \cdot \omega_{p2(1)}} + M_{с.Д1} =$$

$$= \frac{(146,538 + 79,39 + 128,494) \cdot (865,242 - 452,157)}{2 \cdot 146,538} + 452,157 = 951,708 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{кз.3(2)} = \frac{(\omega_{p2(2)} + \omega_{1(2)} + \omega_{2(2)}) \cdot (M_{доп.2} - M_{с.Д2})}{2 \cdot \omega_{p2(2)}} + M_{с.Д2} =$$

$$= \frac{(58,615 + 31,457 + 52,94) \cdot (2278,614 - 1168,894)}{2 \cdot 58,615} + 1168,894 = 2522,67 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$T_{м3(1)} = J_{\varepsilon 1} \cdot \frac{\omega_{p2(1)}}{M_{кз.3(1)} - M_{с.Д1}} = 9,992 \cdot \frac{146,538}{957,708 - 452,157} = 2,896 \text{ с};$$

$$T_{м3(2)} = J_{\varepsilon 2} \cdot \frac{\omega_{p2(2)}}{M_{кз.3(2)} - M_{с.Д2}} = 53,6 \cdot \frac{58,615}{2522,67 - 1168,894} = 2,321 \text{ с};$$

$$t_{пуск.2(1)} = 3 \cdot T_{м3(1)} = 3 \cdot 2,896 = 8,688 \text{ с};$$

$$t_{пуск.2(2)} = 3 \cdot T_{м3(2)} = 3 \cdot 2,321 = 6,963 \text{ с};$$

- расчет времени торможения из двигательного режима работы

$$M_{кз.3(1)} = M_{доп.1} \cdot \left(\frac{\omega_{01}}{2 \cdot \omega_{01} + \omega_{p2(1)}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_{01} + 3 \cdot \omega_{p2(1)}}{2 \cdot \omega_{01} + 2 \cdot \omega_{p2(1)}} \right) =$$

$$= \left(\frac{865,242 \cdot 166,289}{2 \cdot 166,289 + 146,538} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot 166,289 + 3 \cdot 146,538}{2 \cdot 166,289 + 2 \cdot 146,538} \right) = 530,271 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{кз.3(2)} = M_{доп.2} \cdot \left(\frac{\omega_{02}}{2 \cdot \omega_{02} + \omega_{p2(2)}} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot \omega_{02} + 3 \cdot \omega_{p2(2)}}{2 \cdot \omega_{02} + 2 \cdot \omega_{p2(2)}} \right) =$$

$$= \left(\frac{2278,614 \cdot 64,592}{2 \cdot 64,592 + 58,615} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot 64,592 + 3 \cdot 58,615}{2 \cdot 64,592 + 2 \cdot 58,615} \right) = 1381 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\omega_{уср.3(1)} = \omega_{01} \cdot \left(1 + \frac{M_{с.Д1}}{M_{кз3(1)}} \right) = 166,289 \cdot \left(1 + \frac{452,157}{530,271} \right) = 308,082 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{уст.3(2)}} = \omega_{02} \cdot \left(1 + \frac{M_{\text{с.Д2}}}{M_{\text{кз3(2)}}}\right) = 64,592 \cdot \left(1 + \frac{1168,894}{1381}\right) = 119,263 \text{ с}^{-1};$$

$$T_{\text{м3(1)}} = J_{\text{э1}} \cdot \frac{\omega_{01}}{M_{\text{кз.3(1)}}} = 9,992 \cdot \frac{166,289}{530,271} = 3,133 \text{ с};$$

$$T_{\text{м3(2)}} = J_{\text{э2}} \cdot \frac{\omega_{02}}{M_{\text{кз.3(2)}}} = 53,6 \cdot \frac{64,592}{1381} = 2,507 \text{ с};$$

$$t_{\text{торм.2(1)}} = T_{\text{м3(1)}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3(1)}} - \omega_{\text{п2(1)}}}{-\omega_{\text{уст.3(1)}}} = 3,133 \cdot \ln \frac{-308,082 - 146,538}{-308,082} = 1,219 \text{ с};$$

$$t_{\text{торм.2(2)}} = T_{\text{м3(2)}} \cdot \ln \frac{-\omega_{\text{уст.3(2)}} - \omega_{\text{п2(2)}}}{-\omega_{\text{уст.3(2)}}} = 2,507 \cdot \ln \frac{-119,263 - 58,615}{-119,263} = 1,003 \text{ с};$$

- расчет времени переходных процессов за цикл работы

$$t_{\text{п1}} = t_{\text{пуск.1(1)}} + t_{\text{торм.1(1)}} + t_{\text{пуск.2(1)}} + t_{\text{торм.2(1)}} = 4,006 + 0,675 + 8,688 + 1,219 = 14,59 \text{ с};$$

$$t_{\text{п2}} = t_{\text{пуск.1(2)}} + t_{\text{торм.1(2)}} + t_{\text{пуск.2(2)}} + t_{\text{торм.2(2)}} = 3,236 + 0,535 + 6,936 + 1,002 = 11,71 \text{ с};$$

в)

выбирается для заданных условий работы электропривода электродвигатель №2, обеспечивающий минимальное время переходных процессов за цикл работы

2.7 Типовые задачи по оптимизации механической части электропривода

1. Дано:

Техническое задание на электропривод, паспортные данные электродвигателей, дополнительные требования к электроприводу (таблица 2.3). Электропривод обеспечивает пуск на первую рабочую скорость механизма $\omega_{м.1}$, торможение со скорости $\omega_{м.1}$, пуск на вторую рабочую скорость механизма $\omega_{м.2}$, торможение со скорости $\omega_{м.2}$.

Определить:

- определить стандартное передаточное число, наиболее близкое к расчетному, для каждого типа электродвигателя в соответствии с заданием на электропривод;
- осуществить предварительный выбор способов пуска на **первую** рабочую скорость и торможения с нее в пределах заданного цикла;
- ориентировочное время пуска на **первую** рабочую скорость и торможения с нее для двух вариантов электроприводов с заданными типами электродвигателей;
- ориентировочное время переходных процессов за первую часть цикла работы механизма для двух вариантов электроприводов с заданными типами электродвигателей в соответствии с условиями задачи;
- тип электродвигателя, обеспечивающий максимальное быстродействие в соответствии с условиями задачи.

2. Дано:

Техническое задание на электропривод, паспортные данные электродвигателей, дополнительные требования к электроприводу (таблица 2.4). Электропривод обеспечивает пуск на первую рабочую скорость механизма $\omega_{м.1}$, торможение со скорости $\omega_{м.1}$, пуск на вторую рабочую скорость механизма $\omega_{м.2}$, торможение со скорости $\omega_{м.2}$.

Определить:

- определить стандартное передаточное число, наиболее близкое к расчетному, для каждого типа электродвигателя в соответствии с заданием на электропривод;
- осуществить предварительный выбор способов пуска на **первую** рабочую скорость и торможения с нее в пределах заданного цикла;
- осуществить предварительный выбор способов пуска на **вторую** рабочую скорость и торможения с нее в пределах заданного цикла;
- ориентировочное время пуска на **первую** рабочую скорость и торможения с нее для двух вариантов электроприводов с заданными типами электродвигателей;

- ориентировочное время пуска на **вторую** рабочую скорость и торможения с нее для двух вариантов электроприводов с заданными типами электродвигателей;
- ориентировочное время переходных процессов за полный цикл работы механизма для двух вариантов электроприводов с заданными типами электродвигателей в соответствии с условиями задачи;
- тип электродвигателя, обеспечивающий максимальное быстродействие в соответствии с условиями задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода.- М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.- 772 с.
2. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 416 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода.- М.: Энергоатомиздат, 1998.- 704 с.

Таблица 2.3 - Задачи для самостоятельного решения по теме 2

№ вариан- та	техническое задание на электропривод									
	характер нагрузки	$\omega_{м.1}$ об/мин	$\omega_{м.2}$ об/мин	квад- ранты	$M_{мех}$ Н·м	J_m кг·м ²	$\sigma_{пер}$	$\eta_{пер}$	$\frac{M_{доп}}{M_{эм.н}}$	тип ЭД
1	реактив- ная	120	-45		33,4225	5	1,2	0,95	3	П11 П21
2	реактив- ная	-20	120		33,4225	5	1,2	0,95	3	П21 П11
3	актив- ная	40	-90	1;4	8169,95	2500	1,2	0,92	3	П101 П111
4	актив- ная	-90	50	1;4	8169,95	2500	1,2	0,92	3	П101 П111
5	актив- ная	60	-115	2;3	81,3766	8	1,2	0,95	3	П11 П32
6	актив- ная	-115	76	2;3	81,3766	8	1,2	0,95	3	П11 П32
7	реактив- ная	33	-77		7292,19	980	1,2	0,93	3	П82 П102
8	реактив- ная	-77	25		7292,19	980	1,2	0,93	3	П82 П102
9	актив- ная	33	-118	1;4	113,297	11	1,2	0,97	3	П12 П41
10	актив- ная	-118	67	1;4	113,297	11	1,2	0,97	3	П12 П41
11	актив- ная	125	-69	2;3	3422,47	450	1,2	0,95	3	П81 П101
12	актив- ная	-99	125	2;3	3422,47	450	1,2	0,95	3	П81 П101
13	реактив- ная	210	-125		95,493	7	1,2	0,96	3	П21 П42
14	реактив- ная	-89	210		95,493	7	1,2	0,96	3	П21 П42
15	актив- ная	47	-111	1;4	3011,04	700	1,2	0,94	3	П72 П92
16	актив- ная	-111	85	1;4	3011,04	700	1,2	0,94	3	П72 П92
17	актив- ная	140	-233	2;3	126,231	7,5	1,2	0,96	3	П22 П51
18	актив- ная	-233	156	2;3	126,231	7,5	1,2	0,96	3	П22 П51
19	реактив- ная	64	-175		244,462	15	1,2	0,97	3	П31 П52
20	реактив- ная	-175	133		244,462	15	1,2	0,97	3	П31 П52
21	актив- ная	57	-165	1;4	486,146	35	1,2	0,95	3	П41 П62
22	актив- ная	-165	91	1;4	486,146	35	1,2	0,95	3	П41 П62
23	актив- ная	73	-188	2;3	320,003	32	1,2	0,96	3	П32 П61
24	актив- ная	-188	59	2;3	320,003	32	1,2	0,96	3	П32 П61

Продолжение таблицы 2.3

№ вариан- та	паспортные данные электродвигателей						дополнительные требования
	P_n кВт	U_n В	I_n А	n_n об/мин	$R_{яц\ 20}$ Ом	J_d кг·м ²	
1	0,3	220	2,1	1500	22,6	0,0125	динамическое торм. из օм.1
	0,3	220	2	1000	16,6	0,042	
2	0,3	220	2	1000	16,6	0,042	торм. противовкл. из օм.1
	0,3	220	2,1	1500	22,6	0,0125	
3	55	220	286	1000	0,0292	10,3	торм. противовкл. из օм.1
	55	220	287	600	0,0362	20,4	
4	55	220	286	1000	0,0292	10,3	
	55	220	287	600	0,0362	20,4	
5	0,7	220	4,3	3000	5,3	0,0125	
	0,7	220	4,2	750	4,98	0,116	
6	0,7	220	4,3	3000	5,3	0,0125	торм. противовкл. из օм.1
	0,7	220	4,2	750	4,98	0,116	
7	42	220	218	1500	0,0462	3,1	динамическое торм. из օм.1
	42	220	223	600	0,0225	12	
8	42	220	218	1500	0,0462	3,1	торм. противовкл. из օм.1
	42	220	223	600	0,0225	12	
9	1	220	6	3000	3,29	0,015	динамическое торм. из օм.1
	1	220	6,8	750	5,35	0,15	
10	1	220	6	3000	3,29	0,015	
	1	220	6,8	750	5,35	0,15	
11	32	220	166	1500	0,075	2,7	
	32	220	172	600	0,0749	10,3	
12	32	220	166	1500	0,075	2,7	динамическое торм. из օм.1
	32	220	172	600	0,0749	10,3	
13	1,5	220	9	3000	1,99	0,042	динамическое торм. из օм.1
	1,5	220	9,75	750	2,92	0,18	
14	1,5	220	9	3000	1,99	0,042	торм. противовкл. из օм.1
	1,5	220	9,75	750	2,92	0,18	
15	25	220	132	1500	0,0828	1,6	торм. противовкл. из օм.1
	25	220	136	600	0,111	7	
16	25	220	132	1500	0,0828	1,6	
	25	220	136	600	0,111	7	
17	2,2	220	12,5	3000	1,03	0,052	
	2,2	220	13,6	750	1,91	0,35	
18	2,2	220	12,5	3000	1,03	0,052	торм. противовкл. из օм.1
	2,2	220	13,6	750	1,91	0,35	
19	3,2	220	17,5	3000	0,642	0,09	динамическое торм. из օм.1
	3,2	220	19	750	1,073	0,4	
20	3,2	220	17,5	3000	0,642	0,09	торм. противовкл. из օм.1
	3,2	220	19	750	1,073	0,4	
21	6	220	33	3000	0,36	0,15	динамическое торм. из օм.1
	6	220	33,5	750	0,531	0,65	
22	6	220	33	3000	0,36	0,15	
	6	220	33,5	750	0,531	0,65	
23	4,5	220	24,3	3000	0,352	0,116	
	4,5	220	26	750	0,76	0,56	
24	4,5	220	24,3	3000	0,352	0,116	динамическое торм. из օм.1
	4,5	220	26	750	0,76	0,56	

Таблица 2.4 - Задачи для самостоятельного решения по теме 2

№ вариан- та	техническое задание на электропривод									
	характер нагрузки	$\omega_{м.1}$ об/мин	$\omega_{м.2}$ об/мин	квад- ранты	$M_{мех}$ Н·М	J_m кг·м ²	$\sigma_{пер}$	$\eta_{пер}$	$\frac{M_{доп}}{M_{эм.н}}$	тип ЭД
1	реактив- ная	120	-20		33,4225	5	1,2	0,95	3	П11 П21
2	актив- ная	40	-90	1;4	8169,95	2500	1,2	0,92	3	П101 П111
3	актив- ная	60	-115	2;3	81,3766	8	1,2	0,95	3	П11 П32
4	реактив- ная	33	-77		7292,19	980	1,2	0,93	3	П82 П102
5	актив- ная	33	-118	1;4	113,297	11	1,2	0,97	3	П12 П41
6	актив- ная	125	-99	2;3	3422,47	450	1,2	0,95	3	П81 П101
7	реактив- ная	210	-89		95,493	7	1,2	0,96	3	П21 П42
8	актив- ная	47	-111	1;4	3011,04	700	1,2	0,94	3	П72 П92
9	актив- ная	140	-233	2;3	126,231	7,5	1,2	0,96	3	П22 П51
10	реактив- ная	64	-175		244,462	15	1,2	0,97	3	П31 П52
11	актив- ная	57	-165	1;4	486,146	35	1,2	0,95	3	П41 П62
12	актив- ная	73	-188	2;3	320,003	32	1,2	0,96	3	П32 П61
13	реактив- ная	212	-104		18,9184	2	1,2	0,96	3	П11 П21
14	актив- ная	58	-133	1;4	5528,54	400	1,2	0,97	3	П101 П111
15	актив- ная	165	-232	2;3	40,3375	3	1,2	0,94	3	П11 П32
16	реактив- ная	54	-114		4925,43	78	1,2	0,96	3	П82 П102
17	актив- ная	46	-167	1;4	80,054	8	1,2	0,95	3	П12 П41
18	актив- ная	88	-216	2;3	1980,59	150	1,2	0,95	3	П81 П101
19	реактив- ная	177	-65		113,297	5	1,2	0,93	3	П21 П42
20	актив- ная	74	-195	1;4	1713,98	350	1,2	0,95	3	П72 П92
21	актив- ная	73	-118	2;3	249,253	6	1,2	0,97	3	П22 П51
22	реактив- ная	85	-208		205,677	12	1,2	0,96	3	П31 П52
23	актив- ная	106	-242	1;4	331,463	24	1,2	0,94	3	П41 П62
24	актив- ная	98	-105	2;3	572,958	18	1,2	0,95	3	П32 П61

Продолжение таблицы 2.4

№ вариан- та	паспортные данные электродвигателей						дополнительные требования
	P _н кВт	U _н В	I _н А	n _н об/мин	R _{яц 20} Ом	J _д кг·м ²	
1	0,3	220	2,1	1500	22,6	0,0125	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	0,3	220	2	1000	16,6	0,042	
2	55	220	286	1000	0,0292	10,3	торм. противовкл. из 0м.1
	55	220	287	600	0,0362	20,4	
3	0,7	220	4,3	3000	5,3	0,0125	торм. противовкл. из 0м.2
	0,7	220	4,2	750	4,98	0,116	
4	42	220	218	1500	0,0462	3,1	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	42	220	223	600	0,0225	12	
5	1	220	6	3000	3,29	0,015	динамическое торм. из 0м.1
	1	220	6,8	750	5,35	0,15	
6	32	220	166	1500	0,075	2,7	динамическое торм. из 0м.2
	32	220	172	600	0,0749	10,3	
7	1,5	220	9	3000	1,99	0,042	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	1,5	220	9,75	750	2,92	0,18	
8	25	220	132	1500	0,0828	1,6	торм. противовкл. из 0м.1
	25	220	136	600	0,111	7	
9	2,2	220	12,5	3000	1,03	0,052	торм. противовкл. из 0м.2
	2,2	220	13,6	750	1,91	0,35	
10	3,2	220	17,5	3000	0,642	0,09	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	3,2	220	19	750	1,073	0,4	
11	6	220	33	3000	0,36	0,15	динамическое торм. из 0м.1
	6	220	33,5	750	0,531	0,65	
12	4,5	220	24,3	3000	0,352	0,116	динамическое торм. из 0м.2
	4,5	220	26	750	0,76	0,56	
13	0,3	220	2,1	1500	22,6	0,0125	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	0,3	220	2	1000	16,6	0,042	
14	55	220	286	1000	0,0292	10,3	торм. противовкл. из 0м.1
	55	220	287	600	0,0362	20,4	
15	0,7	220	4,3	3000	5,3	0,0125	торм. противовкл. из 0м.2
	0,7	220	4,2	750	4,98	0,116	
16	42	220	218	1500	0,0462	3,1	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	42	220	223	600	0,0225	12	
17	1	220	6	3000	3,29	0,015	динамическое торм. из 0м.1
	1	220	6,8	750	5,35	0,15	
18	32	220	166	1500	0,075	2,7	динамическое торм. из 0м.2
	32	220	172	600	0,0749	10,3	
19	1,5	220	9	3000	1,99	0,042	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	1,5	220	9,75	750	2,92	0,18	
20	25	220	132	1500	0,0828	1,6	торм. противовкл. из 0м.1
	25	220	136	600	0,111	7	
21	2,2	220	12,5	3000	1,03	0,052	торм. противовкл. из 0м.2
	2,2	220	13,6	750	1,91	0,35	
22	3,2	220	17,5	3000	0,642	0,09	динамическое торм. из 0м.1 торм. противовкл. из 0м.2
	3,2	220	19	750	1,073	0,4	
23	6	220	33	3000	0,36	0,15	динамическое торм. из 0м.1
	6	220	33,5	750	0,531	0,65	
24	4,5	220	24,3	3000	0,352	0,116	динамическое торм. из 0м.2
	4,5	220	26	750	0,76	0,56	