

# ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТА ПО ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ПОДАЧИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА

1. Задание к расчету.
2. Методические указания к выполнению расчета.

## 1. Задание к расчету

Требуется спроектировать электропривод (ЭП) подачи металлорежущего станка, осуществляющего преобразование вращательного движения ходового винта в поступательное перемещение суппорта с помощью ходовой пары «винт-гайка», требующего регулирования частоты вращения при постоянном наибольшем допустимом моменте в диапазоне  $D$  со статической ошибкой, не превышающей  $\Delta_{\text{доп}}$ .

Требуемая частота вращения двигателя на верхнем пределе диапазона регулирования равна  $\omega_{\text{верх}}$ ,

Механизм работает в длительном режиме с переменной нагрузкой.

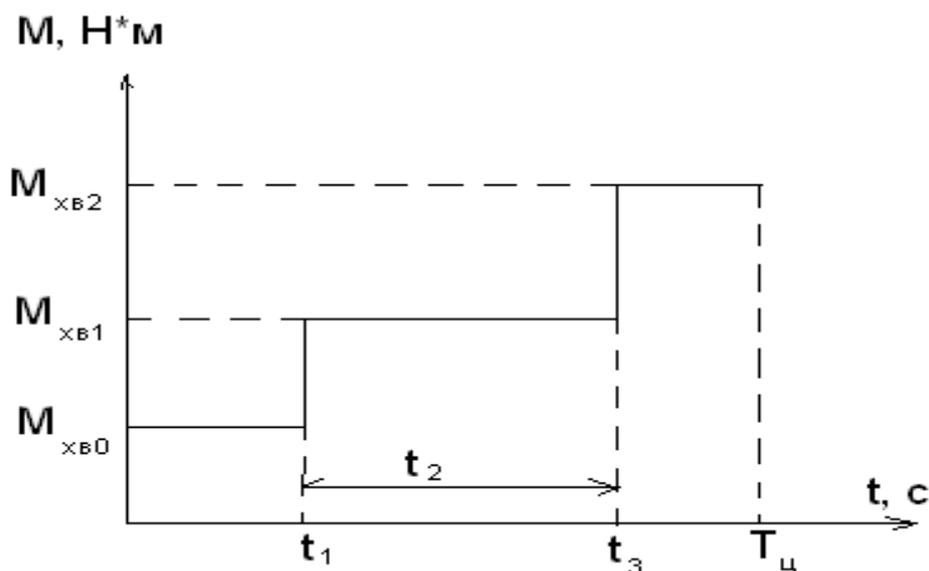


Рис.1. Нагрузочная диаграмма.

Параметры нагрузочной диаграммы (рис.1), кинематической цепи приведены в табл. 4, а параметры суппорта и требования к ЭП - в табл. 5.

В табл. 4, 5 приняты следующие условные обозначения:

1. Параметры нагрузочной диаграммы:

- 1.1.  $M_{\text{хво}}$  - момент на ходовом винте в режиме холостого хода Н\*м;
  - 1.2.  $M_{\text{хв1}}$  - момент на ходовом винте при выполнении первой технологической операции, Н·м;
  - 1.3.  $M_{\text{хв2}}$  - момент на ходовом винте при выполнении второй технологической операции, Н·м;
  - 1.4.  $t_1$  - время движения суппорта в режиме холостого хода, с;
  - 1.5.  $t_2$  - время выполнения первой технологической операции, с;
  - 1.6.  $T_{\text{ц}}$  - время выполнения технологического цикла, с.
2. Параметры кинематической цепи редуктор - ходовой винт:
    - 2.1.  $i_p$  - передаточное число редуктора;
    - 2.2.  $\eta_p$  - КПД редуктора;
    - 2.3.  $\rho$  - радиус приведения кинематической ходовой пары «винт-гайка», м/рад;
    - 2.4.  $d_{\text{хв}}$  - диаметр ходового винта, м;
    - 2.5.  $l_{\text{хв}}$  - длина ходового винта, м.
3. Параметры суппорта:
    - 3.1.  $a$  - длина суппорта, м;
    - 3.2.  $b$  - ширина суппорта, м;
    - 3.3.  $c$  - высота суппорта, м.

Суппорт выполнен из стали и при расчете его массы может рассматриваться как параллелепипед.

## Варианты задания

№ п/п			Требования к электроприводу				Нагрузочная диаграмма		
	D	$\Delta_{\text{доп}}, \%$	$\omega_{\text{верх}}, \text{рад/с}$	$M_{\text{хв0}}, \text{Нм}$	$M_{\text{хв1}}, \text{Нм}$	$M_{\text{хв2}}, \text{Нм}$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	Tц, с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
1	500	5	100	50	150	250	20	40	100
2	1000	10	200	70	120	140	60	80	250
3	700	7	200	80	160	200	15	90	180
4	200	5	300	10	40	60	120	140	350
5	50	5	150	20	70	80	15	45	90
6	100	5	80	60	90	200	100	250	600
7	400	7	180	10	380	450	20	40	90
8	600	8	220	75	150	320	70	80	210
9	150	5	300	90	190	400	35	70	180
10	250	5	190	18	45	80	29	46	110
11	1200	15	140	22	66	95	18	40	85
12	800	10	200	97	220	340	15	65	120
13	300	5	300	45	140	290	20	75	210
14	75	5	300	60	100	120	45	90	180
15	150	5	220	20	45	75	18	24	80
16	100	5	314	12	40	72	10	350	500
17	150	7	157	25	220	300	40	60	120
18	200	8	105	10	120	150	20	150	180
19	250	5	314	5	25	35	20	240	350
20	450	5	157	14	70	90	60	220	300
21	600	10	105	15	120	165	30	200	240
22	75	4	190	40	280	320	20	80	120
23	120	7	105	28	270	300	20	120	150
24	1000	10	314	6	28	36	10	80	100
25	200	8	157	10	45	60	20	55	80
26	800	10	190	25	10	140	40	160	210
27	150	7	105	15	95	120	20	120	150
28	500	8	314	20	70	85	30	360	400
29	750	8	157	35	20	280	40	180	20
30	50	5	190	20	95	120	20	70	100
31	100	5	80	60	90	200	90	150	300
32	400	7	180	10	380	450	10	60	80
33	600	8	220	75	150	320	60	90	200
34	150	5	300	90	190	400	55	90	270
35	250	5	190	18	45	80	25	45	120
36	100	5	80	60	90	200	80	230	560
37	700	7	200	80	160	200	20	90	170
38	200	5	300	10	40	60	95	160	370
39	50	5	150	20	70	80	18	48	110
40	200	8	105	10	120	150	30	180	280

41	250	5	314	5	25	35	25	245	365
42	450	5	157	14	70	90	65	225	310
43	600	10	105	15	120	165	35	195	250
44	75	4	190	40	280	320	10	70	115
45	50	5	150	20	70	80	15	45	90

Таблица 5

## Варианты задания

№ п/п	Кинематическая цепь					Суппорт		
	$i_p$	$\eta_p$	$\rho$ , м/рад	$d_{XB}$ , М	$l_{XB}$ , М	$a$ , М	$b$ , М	$c$ , М
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10	0,9	0,01	0,05	2	0,2	0,5	1
2	15	0,9	0,01	0,07	2,5	0,3	0,6	1,2
3	20	0,85	0,005	0,1	3	0,15	0,8	1,5
4	25	0,85	0,012	0,08	1,8	0,15	0,7	1,8
5	8	0,95	0,008	<b>0,1</b>	1,6	0,25	0,4	0,8
6	12	0,9	0,012	0,09	1,4	0,15	0,6	1,4
7	22	0,85	0,02	0,08	1,8	0,25	0,55	2,1
8	14	0,9	0,015	0,08	1,4	0,25	0,35 1,4	1,4
9	8	0,95	0,015	0,12	1,2	0,2	0,45	0,95
10	12	0,9	0,08	0,08	0,9	0,14	0,7	0,8
11	15	0,85	0,012	0,07	1,3	0,16	0,55	0,75
12	75	0,85	0,011	0,08	2,5	0,2	0,4	1,5
13	30	0,8	0,012	0,06	1,1	0,06	0,09	0,6
14	20	0,85	0,003	0,03	0,8	0,08	0,1	0,9
15	8	0,95	0,008	0,04	0,95	0,09	0,1	0,75
16	12	0,92	0,01	0,12	1	0,25	0,35	1,2
17	15	0,95	0,015	0,04	1,5	0,2	0,8	1
18	25	0,87	0,02	0,06	2	0,4	0,6	0,5
19	10	0,9	0,01	0,1	1,8	0,06	<b>0,1</b>	1,2
20	8	0,95	0,01	0,07	1,5	0,14	0,5	1,5
21	20	0,87	0,012	0,06	1,3	0,15	0,15	0,8
22	20	0,92	0,005	0,03	0,8	0,15	0,7	0,9
23	12	0,9	0,005	0,04	2,5	0,3	0,7	1
24	15	0,88	0,1	0,08	1,8	0,25	0,35	1,5
25	10	0,91	0,008	0,06	1,6	0,15	0,7	1,8
26	14	0,92	0,012	0,04	0,95	0,09	<b>0,1</b>	0,75
27	10	0,37	0,003	0,03	1,6	0,2	0,4	1
28	25	0,9	0,008	<b>0,1</b>	2,5	0,3	0,5	1,4
29	20	0,85	0,006	0,09	2	0,25	0,47	1,3
30	12	0,85	0,003	0,08	1	0,15	0,6	1,4
31	23	0,88	0,012	0,08	1,8	0,15	0,7	1,8
32	8	0,95	0,008	<b>0,1</b>	1,6	0,25	0,4	0,8
33	12	0,9	0,012	0,09	1,4	0,15	0,6	1,4
34	22	0,87	0,025	0,07	1,75	0,2	0,55	2,1
35	14	0,9	0,015	0,08	1,4	0,25	0,35 1,4	1,4
36	10	0,9	0,01	0,05	2	0,2	0,5	1,2
37	15	0,9	0,01	0,07	2,5	0,3	0,6	1,5

38	20	0,85	0,005	0,1	3	0,15	0,8	1,8
39	25	0,85	0,012	0,08	1,8	0,15	0,7	0,8
40	8	0,9	0,008	0,1	1,6	0,25	0,4	1
41	12	0,95	0,08	0,08	0,9	0,14	0,7	0,7
42	15	0,75	0,012	0,07	1,3	0,16	0,55	0,85
43	75	0,85	0,011	0,08	2,5	0,2	0,4	1,55
44	30	0,65	0,012	0,06	1,1	0,06	0,09	0,65
45	20	0,75	0,003	0,03	0,8	0,08	0,1	0,95

Расчет по электроприводу подачи металлорежущего станка в общем случае может состоять из следующих последовательно выполняемых разделов:

1. Анализ требований задания
2. Анализ кинематической схемы электропривода и механизма подачи металлорежущего станка
3. Анализ возможных вариантов и выбор системы электропривода подачи металлорежущего станка
4. Расчет мощности и выбор двигателя
5. Выбор тиристорного преобразователя
6. Расчет элементов силовой части ЭП
  - 6.1 Расчет параметров и выбор силового трансформатора
  - 6.2 Выбор сглаживающего дросселя
7. Оценка возможностей разомкнутой системы по обеспечению требований задания
8. Синтез замкнутой системы электропривода
9. Графическая часть расчета

Задание для расчета выдается студенту путем указания одного из номеров варианта задания, приведенных в табл. 4 и 5.

Законченный расчет представляется в виде пояснительной записки и чертежа, оформленных в соответствии с требованиями ЕСКД.

## **2. Методические указания к выполнению расчета**

### *Анализ требований задания*

Получив задание, необходимо внимательно разобраться в исходной информации,

требованиях к ЭП, перечне основных разделов работы. Проанализируйте единицы, в которых представлены исходные данные, и в случае необходимости выполните перевод данных в единицы СИ.

Исходными данными для выбора электродвигателя является нагрузочная диаграмма механизма. Во всех вариантах задания (см.табл.4) параметры нагрузочной диаграммы механизма даны в виде зависимости изменения момента на ходовом винте от времени (см.рис.1).

### *Анализ кинематической схемы электропривода и механизма подачи металлорежущих станков*

В настоящее время в тяжелых и средних металлорежущих станках электроприводы подачи выполняются по типовой кинематической схеме, которая показана на рис. 2.

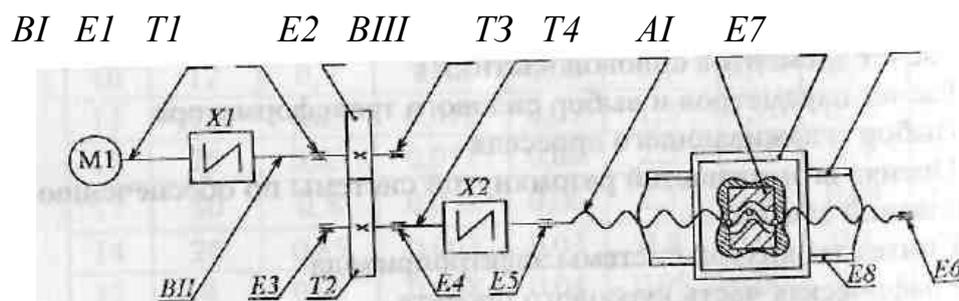


Рис. 2. Типовая кинематическая схема.

Электродвигатель М1 через понижающий редуктор, показанный в виде шестерни Т1 и зубчатого колеса Т2, приводит в движение ходовой винт Т3.

Преобразование вращательного движения ходового винта в поступательное движение суппорта А1 по направляющим Е7, Е8 осуществляется с помощью ходовой пары «винт-гайка» Т4. Соединение редуктора с двигателем и ходовым винтом осуществляется с помощью муфт Х1, Х2. Валы ВII и ВIII вращаются в подшипниках Е1 - Е4, а ходовой винт Т3 - в подшипниках Е5, Е6.

Наиболее важными элементами конструкции станка являются направляющие и кинематические передачи привода.

Направляющие обеспечивают заданное перемещение рабочих органов с инструментом или заготовкой относительно других узлов станка. На них воздействуют

составляющие сил тяжести и резания.

Чтобы обеспечить точность перемещения, устойчивость движений и демпфирование колебаний подвижных узлов, направляющие станков должны иметь высокую износостойкость, жесткость и малый коэффициент трения. Малая величина потерь трения позволяет снизить мощность привода.

Направляющие для линейного движения выполняются прямоугольными, призматическими или цилиндрическими. По фрикционным характеристикам различаются направляющие с трением скольжения и с трением качения, комбинированные, гидростатические и аэростатические. Наиболее распространены направляющие скольжения, обладающие высокой жесткостью и хорошим демпфированием. Однако для них характерны износ и зависимость силы трения от скорости. Обычно направляющие скольжения имеют коэффициент трения  $\mu$  от 0,05 до 0,2.

Передаточное устройство является составной частью привода и служит для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительным устройствам. Передаточное устройство изменяет количественные характеристики движения, такие как угловые и линейные скорости, моменты и усилия, преобразует виды движения. Совокупность различных элементов передаточного устройства образует кинематическую цепь станка.

Зубчатые передачи в механизмах станков применяются для передачи движения в широком диапазоне скоростей и моментов. Следует отметить, что зубчатые передачи сложны в изготовлении и приводят к появлению шума. В электроприводах механизмов подачи, имеющих широкий диапазон регулирования, применяются одноступенчатые редукторы с постоянным передаточным числом  $i_p$ .

Передача «ходовой винт - гайка» получила широкое применение в механизмах подач. Основными преимуществами винтовой пары являются относительно высокая точность и плавность осуществляемых ею перемещений. Ходовые винты изготавливают из качественных сталей, а гайки - из антифрикционных сплавов (бронза или чугун).

Шариковая винтовая пара - передача «винт - гайка качения» - обеспечивает высокую осевую жесткость и равномерность движения. Она применяется в приводах подач точных станков. Преимуществом такой передачи является полное устранение зазора, низкие потери на трение и почти полная независимость силы трения от

скорости.

На рис. 3 показано устройство шариковой винтовой пары. Между винтом (1) и гайкой (2), нарезанными по специальному профилю, помещаются шарики (3), перекатывающиеся при вращении винта. Конструкция передачи зависит от профиля резьбы, способа возврата шариков и способа регулирования зазора. Именно способы перекатывания и возврата шариков в исходное положение и определяют сложность конструкции и трудоемкость изготовления гаек. Применение передачи «винт - гайка качения» резко повышает точность работы станка. В большинстве случаев для станков с высокой точностью обработки применение этой передачи является единственно возможным конструктивным решением.

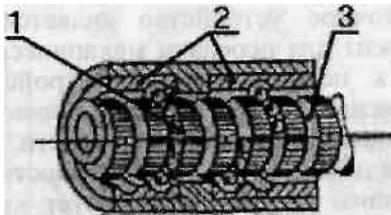


Рис. 3. Устройство шариковой винтовой пары

Механическая связь двигателя с суппортом в общем случае оказывается упругой за счет скручивания валов, упругой деформации зубьев шестерни и колеса редуктора, а также муфт XI и X2 (рис. 5).

Известно, что при исследовании динамических процессов в ЭП можно представить двигатель и механизм в виде системы с сосредоточенными параметрами [1]. Это позволяет на основании кинематической схемы электропривода подачи составить расчетную схему механической части, которая показана на рис. 4.

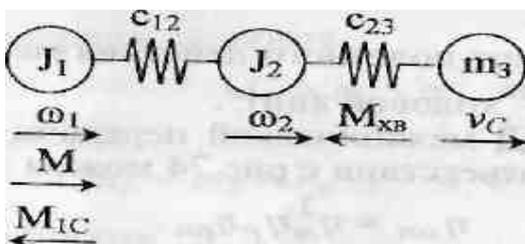


Рис. 4 Трехмассовая расчетная схема механической части.

На рисунке приняты следующие обозначения:

$J_1$  - момент инерции ротора двигателя;

$M$  - электромагнитный момент двигателя;

$M_{1c}$  - статический момент на валу двигателя;

$\omega_1$  - частота вращения ротора двигателя;

$C_{12}$  - коэффициент жесткости зубчатой передачи и муфты XI;

$J_2$  - момент инерции редуктора;

$\omega_2$  - частота вращения ходового винта;

$c_{23}$  - коэффициент жесткости вала ВШ, муфты X2 и ходового винта;

$M_{хв}$  - момент на ходовом винте;

$m_3$  - масса суппорта;

$v_c$  - линейная скорость суппорта.

В соответствии с рис. 4 сосредоточенными являются массы ротора, редуктора и суппорта. Упругие связи считаем безынерционными.

Очевидно, что различные части ЭП на кинематической схеме (рис. 2) двигаются с разными скоростями. Выполним приведение сил и моментов к одной базовой (расчетной) скорости, в качестве которой обычно принимают частоту вращения ротора двигателя.

Приведение моментов на ходовом винте к валу двигателя осуществляется с помощью следующих соотношений:

$$M_{x\epsilon 0}^{np} = \frac{M_{x\epsilon 0}}{i_p \eta_{mn}}; \quad M_{x\epsilon 1}^{np} = \frac{M_{x\epsilon 1}}{i_p \eta_{mn}}; \quad M_{x\epsilon 2}^{np} = \frac{M_{x\epsilon 2}}{i_p \eta_{np}}, \quad H^* \cdot m \quad (9.1)$$

где  $\eta_{np}$  - коэффициент полезного действия механической передачи "вал двигателя - ходовой винт".

Определим КПД механической передачи "вал двигателя - ходовой винт". В соответствии с рис. 4 можем записать

$$\eta_{np} = \eta_m^2 \eta_p \eta_{mn} \quad (9.2)$$

где  $\eta_m^2$  - КПД упругой муфты;

$\eta_p$  - КПД редуктора;

$\eta_{mn}$  - КПД пары подшипников, установленных на ходовом винте.

В табл. 6 приведены значения коэффициентов полезного действия различных элементов.

Значения КПД элементов кинематической цепи  
электропривода подачи

Элементы кинематической цепи	Значения КПД
Упругая муфта	0,98
Винтовая пара «винт-гайка качения»	0,9 – 0,95
Пара подшипников качения	0,99 – 0,995
Пара подшипников скольжения	0,98 – 0,99

Определяем момент инерции ходового винта, кг·м<sup>2</sup>:

$$J_{xв} = \frac{m_{xв} \cdot d_{xв}^2}{4}, \quad \text{где } m_{xв} \text{ - масса ходового винта, кг} \quad (9.3)$$

Масса ходового винта:

$$m_{xв} = V_{xв} \cdot \gamma_{ст} = \frac{\pi \cdot d_{xв}^2 \cdot l_{xв}}{4} \gamma_{ст}, \quad \text{где } V_{xв} \text{ - объем ходового винта;} \quad (9.4)$$

$\gamma_{ст}$  - плотность стали ( $\gamma_{ст} = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>)

Момент инерции суппорта:

$$J_c = m_c \cdot \rho^2, \quad \text{кг/м}^2 \quad (9.5)$$

Масса суппорта:

$$m_c = m_3 = V_c \gamma_c = a \cdot b \cdot c \cdot \gamma, \quad \text{где } V_c \text{ - объем суппорта, м}^3 \quad (9.6)$$

Приведем параметры ходового винта и суппорта к скорости ходового винта.

При этом суммарный момент инерции суппорта и ходового винта равен:

$$J_{\Sigma} = J_{xв} + J_c, \quad \text{кг·м}^2 \quad (9.7)$$

Приведем параметры движения на ходовом винте к валу двигателя. Суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, определяем на основании закона сохранения импульса движения:

$$J_{np} = \frac{J_{\Sigma}}{i_p^2}, \quad \text{кг·м}^2 \quad (9.8)$$

Пренебрегая влиянием упругих связей, считаем коэффициенты жесткости  $c_{12}$  и  $c_{23}$  бесконечно большими. Это позволяет заменить трехмассовую механическую часть ЭП одной эквивалентной массой с моментом инерции  $J$  и перейти к одномассовой

расчетной схеме (рис. 5). В качестве момента нагрузки  $M_c$  рассматривается приведенный к валу двигателя момент ходового винта  $m_{xв}^{np}$ .

Полный момент инерции электропривода, кг·м<sup>2</sup>:

$$J = J_{np} + J_1, \text{ где } J_1 - \text{ момент инерции ротора двигателя} \quad (9.9)$$

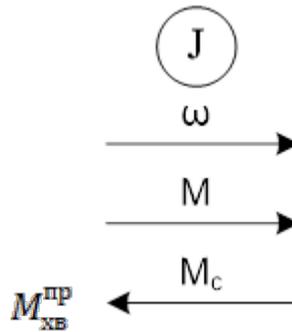


Рис. 5 Одномассовая расчетная схема.

*Анализ возможных вариантов и выбор системы электропривода подачи  
металлорежущего станка*

Проектирование систем ЭП обычно осуществляется по принципу от простого - к сложному. Поэтому на основе требований, изложенных в задании, необходимо на начальной стадии рассмотреть варианты систем наиболее простого привода - разомкнутого.

Следует тщательно проанализировать возможности удовлетворения поставленных в задании требований путем применения систем ЭП с плавным регулированием частоты вращения, построенных по принципу "полупроводниковый преобразователь - электродвигатель".

Необходимо рассмотреть следующие возможные варианты построения подобных систем:

1 Тиристорный (или транзисторный) преобразователь - асинхронный двигатель с короткозамкнутым (или фазным) ротором.

2. Тиристорный (или транзисторный) преобразователь - двигатель постоянного тока параллельного (или последовательного, независимого, смешанного) возбуждения и т. п.

Сравнительный анализ должен содержать оценки экономичности системы

применительно к конкретному циклу и характеру нагрузки.

Тип выбираемого преобразователя должен быть технически и экономически обоснован. Условия задания могут потребовать усложнения схемы преобразователя в связи с возможной работой рассматриваемого ЭП в различных динамических режимах, таких как реверс, торможение противовключением и др.

Конечным пунктом данного раздела является определение параметров выбранной разомкнутой структурной схемы ЭП.

Далее рассматривается методика выполнения проекта на базе системы тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

### *Расчет мощности и выбор двигателя*

Правильный выбор двигателя имеет большое значение, поскольку оказывает определяющее влияние на первоначальные затраты, стоимость эксплуатационных расходов, обеспечение всех технологических режимов работы и необходимых динамических и статических характеристик. Мощность электродвигателя выбирается, исходя из необходимости обеспечения заданной механической перегрузки двигателя.

Исходными данными для выбора двигателя по мощности могут служить средняя мощность на валу, среднеквадратичное значение мощности, средний момент и средняя скорость, среднеквадратичный момент и средняя скорость.

В данном случае параметры нагрузочной диаграммы ЭП заданы в виде ступенчатого графика зависимости  $M=f(t)$ , поэтому при выборе мощности двигателя можно воспользоваться *методом эквивалентного момента*. Эквивалентный момент определяется по формуле:

$$M_3 = \sqrt{\frac{(M_{x\theta 0}^{np})^2 t_1 + (M_{x\theta 1}^{np})^2 t_2 + (M_{x\theta 2}^{np})^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (9.10)$$

Расчетная мощность электродвигателя определяется по формуле:

$$P_p = k_3 * M_3 * \omega_{\text{вврх}}, \text{ Вт} \quad (9.11)$$

где  $k_3$  - коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы работы электродвигателя, когда он работает с повышенными моментами ( $k_3 = 1,1 - 1,3$ ).

Преобразование частоты вращения  $\omega$  к скорости вращения  $n$  осуществляется по формуле:

$$n_{\text{верх}} = \frac{30 \cdot \omega_{\text{верх}}}{\pi}, \text{ об/мин} \quad (9.12)$$

где  $n_{\text{верх}}$  - скорость вращения двигателя на верхнем пределе диапазона регулирования  $D$ .

Тогда скорость вращения двигателя на нижнем пределе диапазона регулирования  $n_{\text{ниж}}$  определяем по формуле:

$$n_{\text{ниж}} = \frac{30 \cdot \omega_{\text{верх}}}{\pi \cdot D} = \frac{n_{\text{верх}}}{D}, \quad (9.13)$$

На основании расчетных данных, полученных по (9.10) - (9.13), можно выбрать по справочнику [13] тип двигателя с учетом следующих условий:

$$\begin{cases} P_{\text{ном}} \geq P_p \\ n_{\text{ном}} \geq n_{\text{верх}} \\ M_{\text{ном}} \geq M_{\text{э}} \end{cases} \quad (9.14)$$

где  $P_{\text{ном}}$  - мощность двигателя в номинальном режиме;

$n_{\text{ном}} \sim$  скорость вращения двигателя в номинальном режиме;

$M_{\text{ном}}$  - момент двигателя в номинальном режиме.

Номинальный электромагнитный момент ДПТ НВ определяется по формуле:

$$M_{\text{ном}} = c \cdot I_{\text{ном}}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad \text{где } c - \text{ постоянная машины} \quad (9.15)$$

$I_{\text{ном}}$  – номинальный ток двигателя

Постоянная машины может быть определена по выражению:

$$c = \frac{U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}, \text{ В}\cdot\text{с/рад} \quad (9.16)$$

где  $U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение, подводимое к обмотке якоря;

$R_{\text{я}}$  - сопротивление якоря ДПТ НВ;

$\omega_{\text{ном}}$  - номинальная частота вращения.

Номинальный ток якоря определим по формуле:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}}}, \text{ А} \quad (9.17)$$

где  $\eta_{ном}$  - КПД двигателя в номинальном режиме.

### *Выбор тиристорного преобразователя*

Ниже приводятся основные технические данные одного из представленных на российском рынке ТП. Теоретические аспекты работы ТП изложены в разделе IV настоящего пособия, а также в [9, 14, 15].

Основными техническими данными ТП, необходимыми для их выбора, являются: номинальная мощность  $P_{ном}$ ; номинальный ток  $I_{ном}$ , номинальное напряжение  $U_{ном}$ ; схема выпрямления.

При выборе ТП следует учитывать его перегрузочную способность по току. Также следует обращать внимание на особенности конструктивного решения и массогабаритные показатели, возможность работы в специфических условиях. При этом показатели ТП должны быть согласованы с номинальными данными электродвигателя.

Тиристорный преобразователь с завышенным выходным напряжением имеет более низкие энергетические показатели ( $\cos\phi$ ), а выбор ТП с недостаточным напряжением приводит к снижению производительности машины, ухудшению динамических показателей (недостаточно форсировок). При выборе ТП по напряжению следует учитывать необходимость обеспечения максимальной скорости при максимально допустимом токе, требуемые форсировки в динамике, а также предусматривать запас, учитывающий возможные снижения напряжения сети.

Выбор ТП с завышенным номинальным током приводит к удорожанию установки, необоснованному увеличению массогабаритных показателей, а также к завышению токов короткого замыкания, что при аварии приводит к более тяжким последствиям. Выбор ТП с заниженным номинальным током приводит, в лучшем случае, к частому срабатыванию максимально-токовой защиты или защиты от превышения температуры, а также к снижению динамических показателей (быстродействия).

Саранское ОАО «Электровыпрямитель» выпускает ТП серий ТЕ, ТЕР, ТП, ТПР, предназначенные для питания якорных цепей электродвигателей постоянного тока. Основные технические данные этих ТП приведены в табл. 7. При выборе ТП также можно воспользоваться сведениями, приведенными в [11].

Технические данные преобразователей  
ОАО «Электровыпрямитель»

Тип агрегата	$U_{пит}, В$	Ном. выпр. напряжение, В	Номин. выпр. ток, А	Макс. выпр. ток, А
ТЕ4-63/230Н-1-2УХЛ4 (Нереверсивный)	220	239	63	141
ТЕ4-63/460Н-2-2УХЛ4 (Нереверсивный)	380	460	63	141
ТЕ4-100/230Н-1-2УХЛ4 (Нереверсивный)	220	230	100	225
ТЕ4-100/460Н-2-2УХЛ4 (Нереверсивный)	380	460	100	225
ТП4-160/230Н-1-2УХЛ4 (Нереверсивный)	220	230	160	360
ТП4-160/460Н-2-2УХЛ4 (Нереверсивный)	380	460	160	360
ТЕР4-63/230Н-1-2УХЛ4 (реверсивный)	220	230	63	141
ТЕР4-63/460Н-2-2УХЛ4 (реверсивный)	380	460	63	141
ТЕР4-100/230Н-1-2УХЛ4 (реверсивный)	220	230	100	225
ТЕР4-100/460Н-2-2УХЛ4 (реверсивный)	380	460	100	225
ТПР4-160/230Н-1-2УХЛ4 (реверсивный)	220	230	160	360
ТПР4-160/460Н-2-2УХЛ4 (реверсивный)	380	460	160	360

*Расчет элементов силовой части ЭП*

Основными исходными данными для расчета тиристорного преобразователя являются средние значения выпрямленного напряжения  $U_d$  тока  $I_d$ , а также действующее значение напряжения питающей сети.

Так как нагрузкой выпрямителя является двигатель постоянного тока, то за среднее значение выпрямленного напряжения  $U_d$  необходимо принять номинальное напряжения питания двигателя, а за среднее значение выпрямленного тока  $I_d$  -ток якоря двигателя.

В процессе расчета подлежат определению параметры трансформатора:

1. Действующие значения напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора  $U_{2ф}$  и  $I_{2ф}$ .
2. Действующие значения тока первичной обмотки трансформатора  $I_1$ .
3. Полная мощность каждой из обмоток  $S_1$ ,  $S_2$  и полная расчетная (типовая)

мощность трансформатора  $S_m$ .

### Расчет параметров и выбор силового трансформатора

Силовой трансформатор, питающий тиристорный преобразователь, выбирается по расчетным значениям полной мощности трансформатора  $S_m$ , напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_{2\phi}$ , фазных токов  $I_{1\phi}$ ,  $I_{2\phi}$  соответственно первичной и вторичной обмоток.

Расчетное значение  $U_{2\phi}$  для режима непрерывного тока управляемого выпрямителя находится по требуемому значению среднего значения выпрямленного напряжения  $U_d$ :

$$U_{2\phi} = \frac{U_d}{k_{cx} \cdot k_c \cdot k_A \cdot k_R}, \quad (9.25)$$

где  $k_c$  - коэффициент, учитывающий возможность понижения напряжения сети переменного тока; численное значение коэффициента  $k_c$  обычно принимается равным  $1,05 \div 1,1$ , что соответствует снижению напряжения на 5-10% от номинального значения;

$k_A$  - коэффициент запаса по напряжению, учитывающий неполное открытие тиристоров при максимальном управляющем сигнале, обычно составляет  $1 \div 1,15$ ;

$k_R$  - коэффициент, учитывающий падение напряжения в управляемом выпрямителе, принимается равным  $k_R = 1,05$ ;

$k_{cx}$  - коэффициент схемы (для трехфазной мостовой схемы  $k_{cx} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}$ )

Расчетное действующее значение фазного тока вторичной обмотки  $I_{2\phi}$  определяется по величине выпрямленного тока  $I_d$ :

$$I_{2\phi} = k_i \cdot k_{i2} \cdot I_d, \quad (9.26)$$

где  $k_i$  - коэффициент непрямоугольности тока, учитывающий отклонение формы тока от прямоугольной (обычно  $k_i = 1,05 \div 1,1$ );

$k_{i2} = \frac{I_{2\phi}}{I_d}$  - коэффициент, зависящий от схемы выпрямления (для трехфазной

мостовой схемы  $k_{i2} = \sqrt{\frac{2}{3}}$ )

Расчетное действующее значение фазного тока первичной обмотки  $I_{1\phi}$  находится из выражения:

$$I_{1\phi} = \frac{k_i \cdot k_{i1} \cdot I_d}{k_m}, \quad (9.27)$$

Где  $k_m$  – коэффициент трансформации, определяемый по формуле:

$$k_m = \frac{w_1}{w_2} \approx 0.95 \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}, \quad (9.28)$$

где  $w_1, w_2$  - число витков соответственно первичной и вторичной обмоток.

Для трехфазной мостовой схемы выпрямления и при соединении обмоток трансформатора в звезду:

$$k_{i1} = \frac{I_{1\phi}}{I_d} = k_{i2} = \sqrt{\frac{2}{3}},$$

где  $k_{i1}$  - коэффициент, зависящий от схемы выпрямления и соединения обмоток трансформатора.

Расчетные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора одинаковы и равны мощности трансформатора:

$$S_m = k_c \cdot k_A \cdot k_R \cdot k_S \cdot U_d \cdot I_d, \quad (9.29)$$

где  $k_S$  - коэффициент повышения расчетной мощности трансформатора (для трехфазной мостовой схемы выпрямления  $k_S=1,05$ )

Выбор силовых трансформаторов осуществляется по условиям:

$$\begin{cases} U_{2\phi\text{ном}} \geq U_{2\phi} \\ I_{2\phi\text{ном}} \geq I_{2\phi} \\ U_{1\phi} = U_{сф} \\ S_{\text{тном}} \geq S_m \end{cases}, \quad (9.30)$$

где  $U_{2\phi\text{ном}}$  - номинальное фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора;

$I_{2\phi\text{ном}}$  - номинальный фазный ток вторичной обмотки трансформатора;

$U_{1\phi}$  - номинальное фазное напряжение первичной обмотки трансформатора;  $U_{сф}$  - фазное напряжение питающей сети.

$U_{сф}$  - фазное напряжение питающей сети.

$S_{\text{тном}}$  - номинальная полная мощность трансформатора.

Паспортные данные некоторых типов силовых трансформаторов приведены в табл.8.

Трансформаторы силовые трехфазные сухие защищенные  
 общего назначения мощностью от 10 до 160 кВ·А  
 на напряжение до 660 В

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А	$u_k$ %	Потери, Вт		$i_0$ , %
			$P_X$	$P_K$	
ТСЗ-10/0,66	10	4,5	90	280	7,0
ТСЗ-16/0,66	16	4,5	125	400	5,8
ТСЗ - 25/0,66	25	4,5	180	560	4,8
ТСЗ - 40/0,66	40	4,5	250	800	4,0
ТСЗ -63/0,66	63	4,5	355	1090	3,3
ТСЗ - 100/0,66	100	4,5	500	1500	2,7
ТСЗ -160/0,66	160	4,5	710	2060	2,3

Следует иметь в виду, что номинальные напряжения ВН 380, 500 и 660В, НН 230 и 400В, а обмотки ВН соединены в звезду; начала и концы фаз обмоток НН выведены на панель зажимов, что позволяет соединять обмотки НН в звезду или треугольник.

Для выбранного трансформатора известны значения мощности короткого замыкания  $P_K$  и напряжения короткого замыкания  $u_k$  %. Отметим, что  $u_k$  % приводится в процентах от номинального фазного напряжения питающей сети переменного тока  $U_{1\text{фном}}$ . На основании значений  $P_K$  и  $U_K$  можно определить активное и индуктивное сопротивления обмоток трансформатора на фазу.

Активное сопротивление обмоток трехфазного трансформатора при соединении первичной обмотки в звезду определяется по формуле:

$$R_m = \frac{P_k}{3I_{1\text{фном}}^2}, \quad (9.31)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трехфазного трансформатора при соединении первичной обмотки в звезду определяется по формуле:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{U_k}{I_{1\text{фном}}}\right)^2 - \left(\frac{P_k}{3I_{1\text{фном}}^2}\right)^2}, \quad (9.32)$$

Где  $U_k = u_k \% \cdot U_{1\text{фном}}$  .

### *Выбор сглаживающего дросселя*

Последовательно с обмоткой якоря ДПТ НВ может быть включен сглаживающий дроссель, индуктивность которого выбирается из условий:

- 1) обеспечение непрерывности тока якоря в определенном диапазоне нагрузок и частот вращения двигателя;
- 2) ограничение амплитуды переменной составляющей тока якоря электродвигателя.

Непрерывность тока якоря должна обеспечиваться в диапазоне нагрузок от  $I_{\min}$  до  $I_{\text{ном}}$  и изменении угла регулирования  $a$  от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$ , равного  $90^\circ$ . За счет ограничения амплитуды переменной составляющей тока якоря улучшаются условия охлаждения и коммутации двигателя. Отметим, что уровень пульсаций должен составлять от 2 до 25% от номинального тока якоря.

Для заключения о необходимости установки сглаживающего дросселя выполняем проверочный расчет его индуктивности по формуле:

$$L_{\text{сд}} = \frac{e_n \cdot E_{do}}{2\pi f \cdot m_n \cdot I_{\min}} - L_m - L_{\text{я}}, \quad (9.37)$$

где  $e_n$  - относительная величина эффективного значения первой гармоники выпрямленного напряжения (для трехфазной мостовой схемы  $e_n = 0,25$ );

$E_{do}$  - ЭДС на выходе преобразователя в режиме холостого хода, определяемая по формуле:

$$E_{do} = 1,35 \cdot E_{2\text{я}}, \quad (9.38)$$

где  $E_{2\text{я}}$  — линейная ЭДС вторичной обмотки трансформатора;

$m_n$  — число пульсаций выпрямленного напряжения за период (для трехфазной мостовой схемы  $m_n = 6$ );

$I_{min}$  — минимальный ток двигателя, соответствующий нижнему диапазону регулирования;

$L_m$  — индуктивность обмотки трансформатора, приведенная к цепи выпрямленного напряжения, определяется по выражению:

$$L_m = \frac{a \cdot X_m}{\omega}, \quad (9.39)$$

где  $a$  — коэффициент, учитывающий количество вторичных обмоток трансформатора в цепи питания ДПТ. Для нулевых схем  $a$  следует принимать равным единице, для мостовых — двум. Индуктивность цепи якоря ДПТ НВ —  $L_{я}$  обычно приводится в справочных данных на двигатель либо может быть вычислена по приближенной формуле Уманского-Линвилля:

$$L_{я} = \frac{\gamma \cdot U_{ном}}{p_n \cdot \omega_{ном} \cdot I_{ном}}, \quad (9.40)$$

где  $\gamma = 0,6$  для некомпенсированных и  $\gamma = 0,25$  для компенсированных двигателей;

$p_n$  - число пар полюсов двигателя;

$\omega_{ном}$  - скорость вращения двигателя;

$U_{ном}, I_{ном}$  - соответственно номинальное напряжение и ток двигателя.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока может быть применен, например, дроссель серии СРОМ.

Технические данные дросселей серии СРОМ приведены в табл. 9.

Таблица 9

Технические данные сглаживающих дросселей серии СРОМ

Тип реактора	Индуктивность, Гн	Постоянный ток, А	Масса, кг
СРОМ-500/10	0.25	75	1300
СРОМ-1000/10	0.05	250	3500
СРОМ-1500/10	0.2	150	3500
СРОМ-5500/20	0.11	360	10850

*Оценка возможностей разомкнутой системы по обеспечению требований задания*

Структурная схема разомкнутой системы электропривода, выполненной по принципу тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока с независимым возбуждением с регулированием частоты вращения путем изменения напряжения на якоре, представлена на рис. 6.

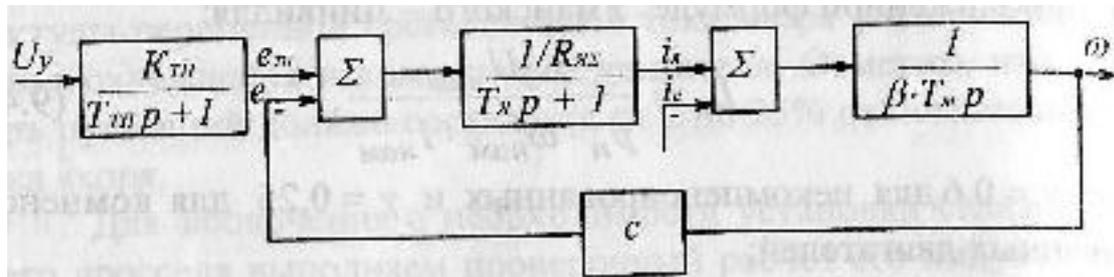


Рис. 6.

Структурная схема состоит из двух основных частей - тиристорного преобразователя и ДТП НВ с нагрузкой.

Тиристорный преобразователь в общем случае состоит из двух звеньев:

- 1) системы импульсно-фазового управления (СИФУ) с входным устройством;
- 2) силовой схемы тиристорного преобразователя.

В инженерных расчетах передаточную функцию тиристорного преобразователя в режиме непрерывного тока с достаточной для практических расчетов точностью можно представить в виде:

$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП} p + 1}, \quad (9.42)$$

где  $p$  - оператор дифференцирования;

$T_{ТП}$  - постоянная времени тиристорного преобразователя, зависит от используемой схемы выпрямления, быстродействия СИФУ преобразователя и индуктивности силовой цепи. В зависимости от этих параметров  $T_{ТП}$  принимается в диапазоне от 0,01 до 0,004 с.

Коэффициент усиления тиристорного преобразователя определяется по формуле:

$$K_{ТП} = \frac{E_{d_0}}{U_{y.ном}}, \quad (9.43)$$

Где  $E_{d_0}$  - ЭДС на выходе преобразователя;

$U_{у.ном}$  - напряжение управления, обычно составляет 5 или 10В.

Электрохимические процессы двигателя при постоянном потоке возбуждения описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_{я} = R_{я\Sigma} (1 + T_{я} p) i_{я} + c \omega \\ M = c i_{я} \\ M - M_C = J_{\Sigma} p \omega \end{cases}, \quad (9.44)$$

Электромагнитная и механическая инерционности двигателя отражаются соответственно электромагнитной  $T_{я}$  и электрохимической  $T_M$  постоянными времени.

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи для встречно-параллельной мостовой схемы преобразователя, содержащего четыре уравнивающих реактора, определяется по формуле:

$$T_{я} = \frac{L_{я\Sigma}}{R_{я\Sigma}}, \quad (9.45)$$

Суммарная индуктивность якорной цепи  $L_{я\Sigma}$  определяется как сумма  $L_{я}$  и индуктивностей, включенных в силовую цепь.

Суммарное сопротивление якорной цепи  $R_{я\Sigma}$  определяется как сумма сопротивления цепи якоря двигателя (обычно приводится в справочных данных на двигатель) и прочих сопротивлений силовой цепи [1,4].

Электрохимическая постоянная времени определяется по формуле

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{я\Sigma}}{c^2}, \quad (9.50)$$

где  $J_{\Sigma}$  - суммарный приведенный момент инерции.

Модуль жесткости механической характеристики электропривода  $\beta$  (рис. 6) определяется как:

$$\beta = \frac{c^2}{R_{я\Sigma}}, \quad (9.51)$$

Анализ электромеханических свойств разомкнутой системы целесообразно начать с рассмотрения статических механических характеристик для верхнего и нижнего пределов диапазона регулирования, по которым можно судить об обеспечении заданных требований.

Уравнение статической механической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{Я}}{c} - \frac{R_{Я\Sigma}}{c^2} M, \quad (9.52)$$

При построении статических характеристик необходимо определить значения напряжения на якоре  $U_{Я}^{верх}$  и  $U_{Я}^{нижн}$  при работе двигателя соответственно на верхней и нижней характеристиках диапазона:

$$U_{Я}^{верх} = \omega_{верх} * c + \frac{R_{Я\Sigma} * M_{XB_0}^{np}}{c}, \quad (9.53)$$

$$U_{Я}^{нижн} = \omega_{нижн} * c + \frac{R_{Я\Sigma} * M_{XB_0}^{np}}{c}, \quad (9.54)$$

Механическую характеристику ДПТ НВ можно построить по двум точкам. Для этого определяем значения частоты вращения на верхнем и нижнем пределах регулирования для двух режимов работы электропривода: при  $M = M_{XB_0}^{np}$  и

$$M = M_{XB_2}^{np}$$

$$\begin{cases} \omega_{\max}^{верх} = \omega_{верх} \\ \omega_{\min}^{верх} = \frac{U_{Я}^{верх}}{c} - \frac{R_{Я\Sigma} M_{XB_2}^{np}}{c^2}, \end{cases} \quad (9.55)$$

$$\begin{cases} \omega_{\max}^{нижн} = \omega_{нижн} \\ \omega_{\min}^{нижн} = \frac{U_{Я}^{нижн}}{c} - \frac{R_{Я\Sigma} M_{XB_2}^{np}}{c^2}, \end{cases} \quad (9.56)$$

Где  $\omega_{\max}^{верх}$ ,  $\omega_{\min}^{верх}$  максимальная и минимальная частота вращения на верхнем пределе диапазона регулирования;

$\omega_{\max}^{нижн}$ ,  $\omega_{\min}^{нижн}$  - максимальная и минимальная частота вращения на нижнем пределе диапазона регулирования.

Статические механические характеристики показаны на рис. 7.

Важно оценить выполнимость заданного диапазона регулирования по точке

$\omega_{\min}^{нижн}$ . В случае отрицательного значения следует вывод о невозможности

использования разомкнутой системы электропривода.

Далее определяем и оцениваем модуль жесткости механической характеристики разомкнутой системы электропривода:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_{x\epsilon 0}^{np} - M_{x\epsilon 2}^{np}}{\omega_{max} - \omega_{min}}, \quad (9.57)$$

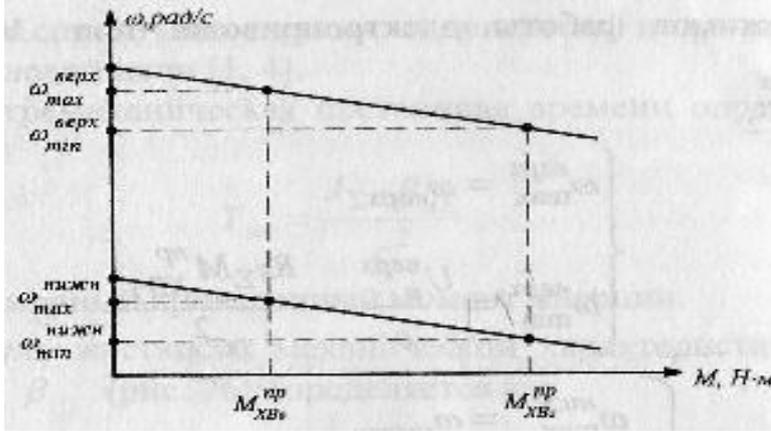


Рис.7. Статические механические характеристики.

Статическая ошибка разомкнутой системы регулирования может быть определена по формуле:

$$\Delta_{верх} = \frac{\omega_{max}^{верх} - \omega_{min}^{верх}}{\omega_{max}^{верх} + \omega_{min}^{верх}}, \quad (9.58)$$

Полученный результат необходимо сравнить с заданным значением  $\Delta_{доп}$ .

В случае  $\Delta_{верх} > \Delta_{доп}$  следует приступить к синтезу замкнутой системы.

Методика этого синтеза и пример аналоговой реализации регуляторов системы изложены в разделе V.

### *Механическая характеристика синтезированного электропривода*

Уравнение механической характеристики при линейной характеристике регулятора скорости имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{3C}}{K_{ДС}} - \frac{R_{Я\Sigma}}{c^2} \cdot \frac{a_{мс} T_{мс}}{T_m} \cdot M, \quad (9.73)$$

$$\text{либо} \quad \omega = \omega_0 - \frac{a_{мс} T_{мс}}{T_m} \Delta \omega_c \quad (9.74)$$

где  $a_{mc}$  - стандартный коэффициент настройки контура скорости

$T_{\mu c}$  - постоянная времени контура скорости

$\omega_0 = \frac{U_{3C}}{K_{DC}}$  - скорость идеального холостого хода;

$\Delta\omega_c = \frac{R_{Я\Sigma}}{C^2} M$  - статический перепад скорости в разомкнутой системе

электропривода.

Подставляя в уравнение (9.73) значение  $M = M_{x\delta 0}^{np}$  и  $M = M_{x\delta 2}^{np}$ , строим механическую характеристику замкнутой системы электропривода, которая ограничивается значением  $M = M_{\text{стоп}} = K_{\Pi} \cdot M_{\text{ном}}$ .

Статическая ошибка регулирования в замкнутой системе электропривода рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\text{зам.с}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{верх}}} = \frac{a_{mc} T_{\mu c} K_{DC} \Delta M}{\beta T_M U_{3C}} \cdot 100\%, \quad (9.75)$$

где  $\Delta M = M_{x\delta 2}^{np} - M_{x\delta 0}^{np}$  (9.76)