

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова  
(технический университет)

В.В. АЛЕКСЕЕВ, П.В. АЛЕКСЕЕВ, А.Е. КОЗЯРУК

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД**

**Примеры расчета электрического привода**

**Санкт-Петербург**

**2008**

УДК 62.83.52(075.83)

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД:** Примеры расчета электрического привода/ Санкт-Петербургский горный ин-т. *В.В. Алексеев, П.В. Алексеев, А.Е. Козярук.* СПб, 2008. 35 с.

На конкретных примерах показаны расчеты электрического привода. Дан математический аппарат для решения представленных задач.

Пособие предназначено для студентов специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», а также студентов специальности 150402 «Горные машины и оборудование», а также может быть использовано аспирантами и инженерами, при проектировании и эксплуатации электроприводов.

Научный редактор проф. Э.А.Загривный

Рецензенты: кафедра систем автоматического управления С-Петербургского технического университета; д.т.н. В.Д.Кулик (СПГТУРП)

© Санкт-Петербургский горный  
институт имени Г.В.Плеханова, 2008

## **ВВЕДЕНИЕ**

Практикум по дисциплине «Электрический привод» призван облегчить изучение студентами элементов расчета и проектирования электропривода, и обеспечить контроль текущей успеваемости студентов.

Первые два раздела включают задачи по механике и выбору мощности электроприводов. Понимание решения приведенных задач должно быть полным, так как без этого невозможно решение задач последующих разделов.

Задачи разделов 3 и 4 посвящены вопросам оценки и расчета механических и регулировочных характеристик электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока. Они базируются на материале учебного курса "Электрические машины».

В разделе 5 рассматриваются типовые задачи по статическим и динамическим характеристикам регулируемых электроприводов с релейным управлением посредством регулируемых сопротивлений в цепях электродвигателей или регулирующих напряжение и ток двигателей электромашинных и статических полупроводниковых преобразователей. Они базируются на материале учебных курсов "Электрические машины» и «Силовая электроника».

## 1. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Задача 1. Лебедка для подъема груза (рис.1) включает в себя барабан с канатом Б, крюк К, груз Г, редуктор Р и двигатель Д.

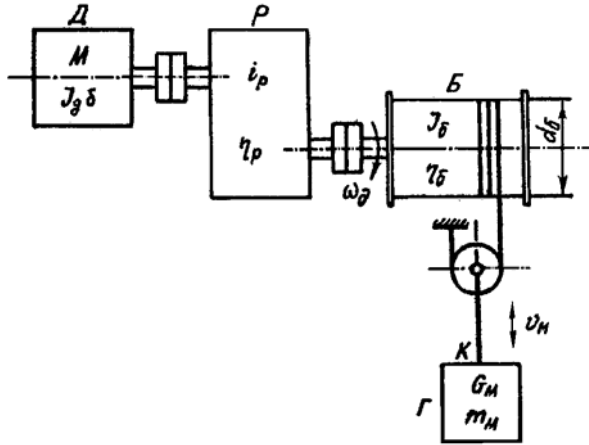


Рис.1

Данные механизма:  $G_{\Gamma} = 4000 \text{ Н}$ ;  $G_{\text{К}} = 1000 \text{ Н}$ ;  $m_{\Gamma} = 400 \text{ кг}$ ;  $m_{\text{К}} = 100 \text{ кг}$ ; скорость подъема или опускания  $v = 1 \text{ м/с}$ ; КПД редуктора  $\eta = 0,5$ . Двигатель характеризуется установившейся скоростью  $\omega = 100 \text{ рад/с}$  и моментом инерции  $J_{\text{д}} \delta = 0,15 \text{ кгм}^2$ .

1. Найти приведенный момент нагрузки на валу двигателя  $M_{\text{с0}\uparrow}$  при подъеме крюка без груза, приведенный момент инерции от крюка, суммарный момент инерции  $J_{\Sigma} = J_{\text{д}} \delta + J_{\text{пр}}$  и динамический момент  $M_{\text{дин0}\uparrow}$  привода при равномерном нарастании скорости при пуске за  $t_{\text{п}} = 1 \text{ с}$ .

2. Определить  $M_{\text{с}\uparrow}$  и  $M_{\text{дин}\uparrow}$  при подъеме груза.

3. Определить  $M_{\text{с}\downarrow}$  и  $M_{\text{дин}\downarrow}$  при опускании груза.

Задача 2. Механизм вращательного действия (рис.2) включает в себя рабочий механизм Мех, редуктор Р и двигатель привода Д. Данные механизма:  $M_{\text{м0}} = 20 \text{ Нм}$ ;  $M_{\text{М}} = 200 \text{ Нм}$ ;  $J_{\text{М}} = 2 \text{ кгм}^2$ ;  $i_{\text{р}} = 2,0$ ;  $\eta_{\text{р}} = 0,5$ . Двигатель характеризуется установившейся скоростью  $\omega = 100 \text{ рад/с}$  и моментом инерции  $J_{\text{д}} \delta = 0,5 \text{ кгм}^2$ .

1. Найти приведенный к валу двигателя статический момент

$M_{с0}$  при холостом ходе, момент инерции  $J_{пр0}$ , суммарный момент инерции  $J_{\Sigma 0}$  и динамический момент привода  $M_{дин0}$  при пуске с постоянным ускорением  $a = d\omega / dt = 50 \text{ с}^{-2}$ .

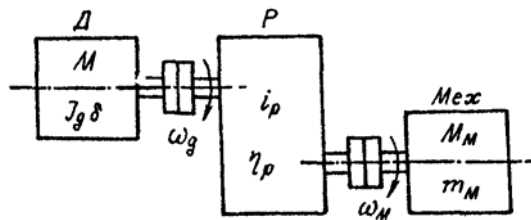


Рис.2

2. Определить  $M_{сн}$  при работе с нагрузкой в двигательном режиме,  $J_{пр}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{дин}$  при  $a = d\omega / dt = 50 \text{ с}^{-2}$ .

3. Определить  $M_{ст}$  при торможении привода,  $J_{пр}$ ,  $J_{\Sigma}$  и  $M_{дин}$  при торможении с ускорением  $a = d\omega / dt = 50 \text{ с}^{-2}$ .

Задача 3. Определить мощность двигателя привода лебедки (см. рис.1) в установившемся режиме работы. Данные привода:  $G_k = 5000 \text{ Н}$ ;  $G_r = 15000 \text{ Н}$ ;  $v_d = v_r = 0.5 \text{ м/с}$ ;  $\eta_n = 0,8$ ;  $\eta_0 = 0,5$ .

Найти мощность двигателя: 1) при подъеме груза; 2) при подъеме крюка без груза; 3) при опускании груза; 4) при опускании крюка без груза.

Задача 4. Определить оптимальное передаточное число редуктора механизма вращательного действия (см. рис.2) при работе на холостом ходу ( $M_M = 0$ ).

Данные привода:  $J_M = 4 \text{ кгм}^2$ ;  $J_1 = J_d + J_{муфты} = J_d \delta$ ,  $\delta = 1,25$ .

Найти  $i_{опт}$ ,  $J_{пр}$ : 1) для привода с двигателем  $J_d = 0,8 \text{ кгм}^2$ ; 2) для  $J_d = 0,2 \text{ кгм}^2$ , 3) для  $J_d = 0,05 \text{ кгм}^2$ .

Задача 5. Определить время пуска и торможения привода механизма вращательного движения при постоянных значениях статического момента и момента двигателя во время пуска или торможения. Данные привода:  $J_d \delta = 1 \text{ кгм}^2$ ;  $J_M = 8 \text{ кгм}^2$ ,  $i_p = 2,0$ ;  $\omega_{уст} = 100 \text{ рад/с}$ ;  $M_c = 500 \text{ Нм}$  (момент активный).

Найти время пуска и торможения привода для  $\omega_{нач} = 0$  и  $\omega_{уст} = 100 \text{ рад/с}$ : 1) при  $M_d = 750 \text{ Нм}$ ; 2)  $M_d = 1000 \text{ Нм}$ ; 3)  $M_d = 1500 \text{ Нм}$ .

Задача 6. Определить требуемый момент двигателя при пуске и торможении привода лебедки (см. рис.1) с постоянным ускорением  $a = d\omega / dt = 100 \text{ с}^{-2}$ . Данные привода:  $M_{сгр} = 500 \text{ Нм}$ ;  $M_{с0}$ ,  $= 50 \text{ Н.м}$ ;  $\omega_{уст} = 100 \text{ рад/с}$ ;  $t_{п} = t_{т} = 1 \text{ с}$ ,  $J_{д} \delta = 2 \text{ кгм}^2$ ;  $J_{пр} = 3 \text{ кгм}^2$ .

Найти  $M_{п(т)} = M_{с} + M_{дин}$  при: 1) подъеме груза ( $M_{п(т)\uparrow}$ ); 2) подъеме крюка без груза ( $M_{п0(т0)\uparrow}$ ); 3) остановке привода при опускании груза ( $M_{п(т)\downarrow}$ ); 4) остановке привода при опускании крюка без груза ( $M_{п0(т0)\downarrow}$ ).

## 2. НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ И ВЫБОР МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВодОВ

Задача 7. Определить по заданной тахограмме и нагрузочной диаграмме рабочей машины нагрузочную диаграмму привода с предварительно выбранным двигателем. Двигатель привода имеет номинальные данные:  $P_{н} = 50 \text{ кВт}$ ;  $\omega_{н} = 100 \text{ рад/с}$ ;  $J_{д} \delta = 5 \text{ кгм}^2$ ,  $M_{н} = P_{н}/\omega_{н} = 500 \text{ Нм}$ . Момент рабочей машины  $M_{м} = 1250 \text{ Нм}$ ; установившаяся скорость  $\omega_{м} = 20 \text{ рад/с}$ ;  $\eta = 0,5$ .

Тахограмма рабочей машины приведена на рис.3. Время пуска  $t_{п} = 2 \text{ с}$ , время, торможения  $t_{т}$ ,  $= 2 \text{ с}$ , время работы  $t_{р} = 26 \text{ с}$  и время паузы  $t_{0} = 20 \text{ с}$ .

Рассчитать и построить нагрузочную диаграмму привода при  $J_{м} = 62,5 \text{ кгм}^2$ ;  $J_{м} = 125 \text{ кгм}^2$ ;  $J_{м} = 250 \text{ кгм}^2$ .

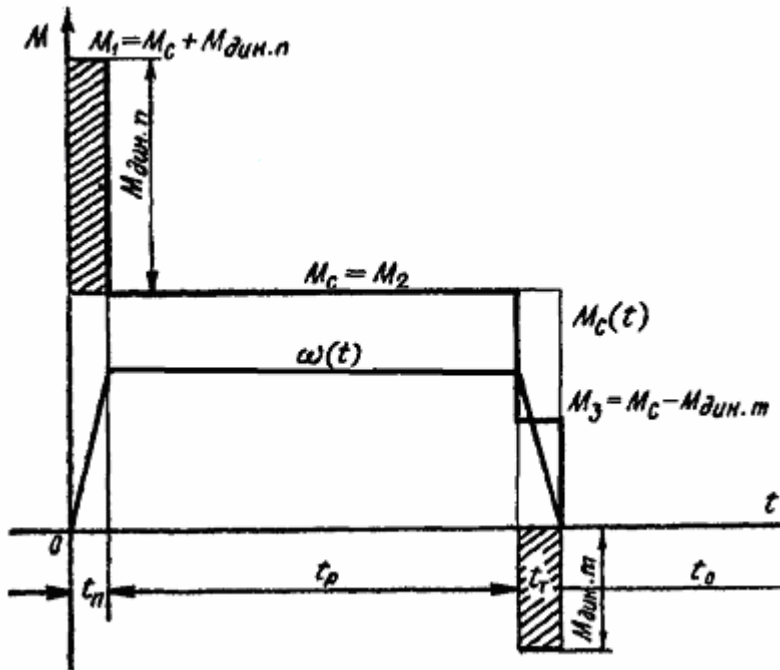


Рис.3

Задача 8. Привод с двигателем ( $P_n = 15$  кВт,  $\omega_n = 100$  рад/с,  $M_n = 150$  Нм) работает по тахограмме, приведенной на рис.3. Коэффициента ухудшения теплоотдачи в периоды пуска и торможения  $\gamma = 0,75$ ; коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке  $\beta = 0,5$ . Моменты  $M_n = 200$  Нм;  $M_p = M_c = 150$  Нм;  $M_t = -141$  Нм.

Найти эквивалентный момент двигателя: 1) при  $t_n = 5$  с,  $t_p = 40$  с,  $t_t = 5$  с,  $t_0 = 155$  с,  $\gamma = 0,75$ ,  $\beta = 0,5$ ; 2) при  $\gamma = 1$ ,  $\beta = 0,5$ ,  $t_0 = 155$  с.

Задача 9. Привод с двигателем постоянного тока работает в повторно-кратковременном режиме. Цикл работы включает работу в течение 2,5 мин с моментом на валу  $M = 300$  Нм и скоростью 73,3 рад/с и паузы в течение  $t_0 = 5$  мин.

Выбрать для этих условий асинхронный электродвигатель.

Задача 10, Определить коэффициент увеличения мощности двигателя длительного режима при работе в кратковременном

режиме. Постоянная времени нагрева двигателя  $T_n = 60$  мин.

Найти коэффициент термической перегрузки и коэффициент механической перегрузки двигателя при кратковременном режиме при  $t_{кр} = 30$  мин и  $t_{кр} = 60$  мин.

Задача 11. Привод повторно-кратковременного режима работа выполнен с двигателем, имеющим следующие данные  $P_n = 100$  кВт,  $\omega_n = 100$  рад/с,  $M_n = 1000$  Нм при  $P_{вст} = 60\%$ .

Найти мощность  $P_{нх}$  и номинальное значение момента  $M_{нх}$  при работе привода с  $PВ = 40\%$ ; с  $PВ = 25\%$ ; с  $PВ = 15\%$ .

Задача 12. Проверить по методу эквивалентного момента двигатель привода повторно-кратковременного режима работы по нагрузочной диаграмме, приведенной на рис.4. Данные привода:

$P_{вст} = 25\%$ ;  $P_n = 2$  кВт,  $\omega_n = 100$  рад/с,  $M_n = 20$  Нм;  $t_1 = 5$  с;  $M_1 = 25$  Нм;  $t_1 = 10$  с;  $M_1 = 17$  Нм;  $t_0 = 35$  с;  $t_{ц} = 50$  с.

Найти; 1) коэффициент продолжительности включения двигателя  $PВ_x$ , 2) эквивалентное значение момента двигателя при  $PВ_x$ , 3) эквивалентное значение момента двигателя при  $PВ = 25\%$ .

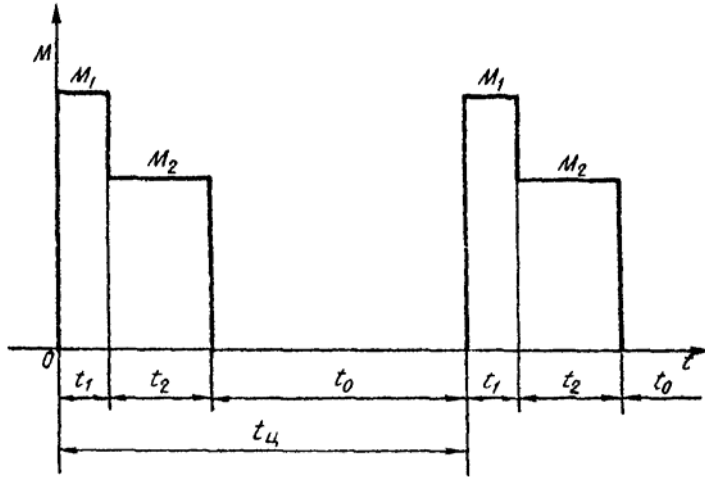


Рис.4



### 3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задача 13. Определить параметры двигателя постоянного тока по паспортным данным двигателя. Данные двигателя:  $P_n = 40$  кВт,  $\omega_n = 100$  рад/с,  $M_n = 400$  Нм;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 200$  А. Возбуждение двигателя независимое (параллельное). Естественная характеристика двигателя показана на рис.5.

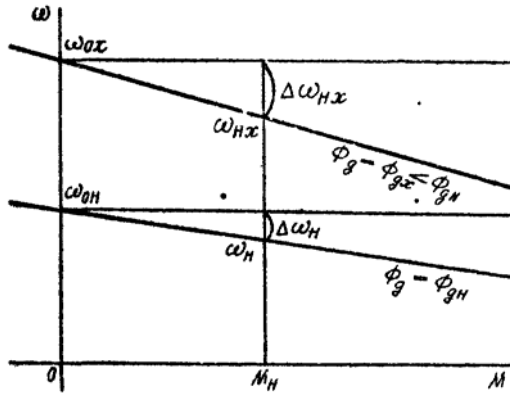


Рис.5

1. Найти магнитный поток двигателя  $\Phi_{дн}$  и скорость идеального холостого  $\omega_0$ .

2. Определить относительное падение скорости двигателя при номинальной нагрузке  $\Delta v_n$  и номинальное сопротивление двигателя  $R_n$ .

3. Определить относительное и омическое сопротивления цепи якоря двигателя  $r_a$  и  $r$ .

Задача 14. Определить номинальные значения скорости вращения и момента двигателя постоянного тока, если известны его напряжение, ток, скорость холостого хода и сопротивление цепи якоря. Данные двигателя:  $U_n = 220$  В;  $I_n = 200$  А;  $\omega_0 = 109$  рад/с;  $r_a = 0,1$  Ом.

Найти: 1) магнитный поток двигателя  $\Phi_{дн}$ ; 2) номинальный электромагнитный момент двигателя  $M_n$ . 3) номинальную скорость вращения двигателя  $\omega_n$ .

Задача 15. Определить ЭДС генератора, питающего цепь якоря двигателя по схеме Г-Д (рис.6) для получения требуемой скорости двигателя при заданной нагрузке.

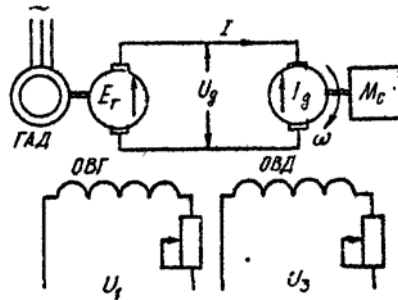


Рис.6

Данные машин систем Г-Д: генератор -  $P_{нг} = 8,8$  кВт;  $U_{нг} = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{аг} = 1$  Ом; двигатель  $P_{нд} = 8,8$  кВт;  $\omega_n = 90$  рад/с;  $U_{нд} = 220$  В;  $I_n = 40$  А;  $r_{ад} = 1$  Ом.

Схема и характеристики привода Г-Д приведены на рис.6, 7.

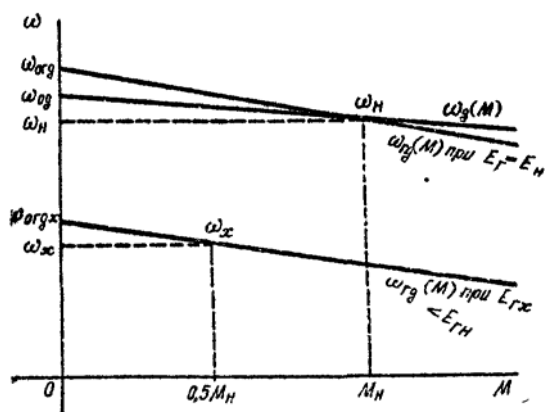


Рис.7

1. Определить номинальное значение ЭДС генератора  $E_{гн}$ . и скорость холостого хода двигателя привода Г-Д.
2. Найти напряжение генератора для получения номинальной скорости двигателя = 90 рад/с.
3. Найти напряжение генератора для получения скорости

привода  $\omega_{гдх} = 0,5\omega_n$  при  $M_{сх} = 0,5M_n$ .

Задача 16. Определить поток двигателя в системе Г-Д для получения повышенной скорости привода при уменьшении нагрузки.

Данные машин и системы Г-Д приведены в задаче 15, характеристики на рис.5.

1. Найти магнитный поток двигателя и относительное сопротивление цепи якорей системы Г-Д  $s\Phi_n$ ;  $R_n$ ;  $\rho_{гд}$ .

2. Найти уменьшение относительного магнитного потока двигателя  $\phi_x$  для заданной скорости привода  $v_x = 1,4$  при  $\mu_x = 0,5$ .

Задача 17. Для привода с двигателем постоянного тока параллельного возбуждения с реостатно-релейным управлением (рис.8) рассчитать величины ступеней пусковых сопротивлений. Номинальные значения паспортных величин двигателя:  $P_n = 9$  кВт;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 44$  А;  $\omega_n = 94$  рад/с;  $\eta = 94$  %. Максимальный пиковый момент двигателя при пуске  $\mu_1 = 2$ . Момент переключения ступеней пускового сопротивления  $\mu_2 = 1$ . Статический момент нагрузки  $\mu_c = 0,8$ .

1. Определить скорость идеального холостого хода двигателя

$\omega_0$  и построить в долях величинах естественную механическую характеристику двигателя  $v = f(\mu)$ .

2. Построить характеристики реостатного пуска и графически определить число ступеней пуска  $m$ . Проверить найденное значение числа ступеней пуска по аналитической формуле.

3. Определить номинальное сопротивление двигателя  $R_n$ , сопротивление якоря  $r_{ад}$  и найти значения ступеней пускового сопротивления двигателя  $r_1, r_2, \dots, r_m$ .

Задача 18. Для привода постоянного тока с реостатно-релейным управлением (см. рис.8) рассчитать ступень сопротивления для торможения противовключения и для динамического торможения. Характеристики приведены на рис.9. Номинальные значения параметров двигателя:  $P_n = 9$  кВт;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 44$  А;  $r_{ад} = 0,156$  Ом;  $\omega_0 = 100$  рад/с;  $\omega_n = 94$  рад/с. Двигатель переключается в тормозной режим противовключения или

динамического торможения при  $\mu_c = 1$  и  $v = v_n$ . Максимальный тормозной момент при переключении  $\mu_T = 1$ . Пусковые характеристики рассчитаны для максимального значения момента при пуске с  $\mu_1 = 2$ .

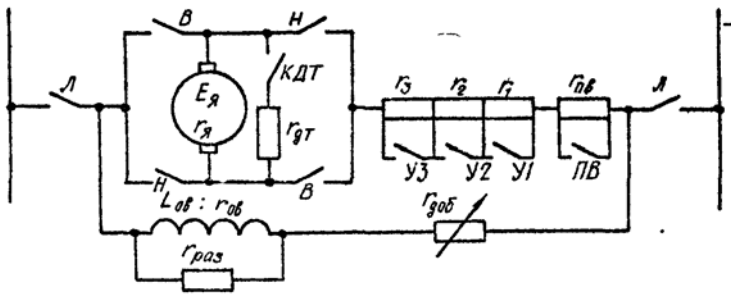


Рис.8

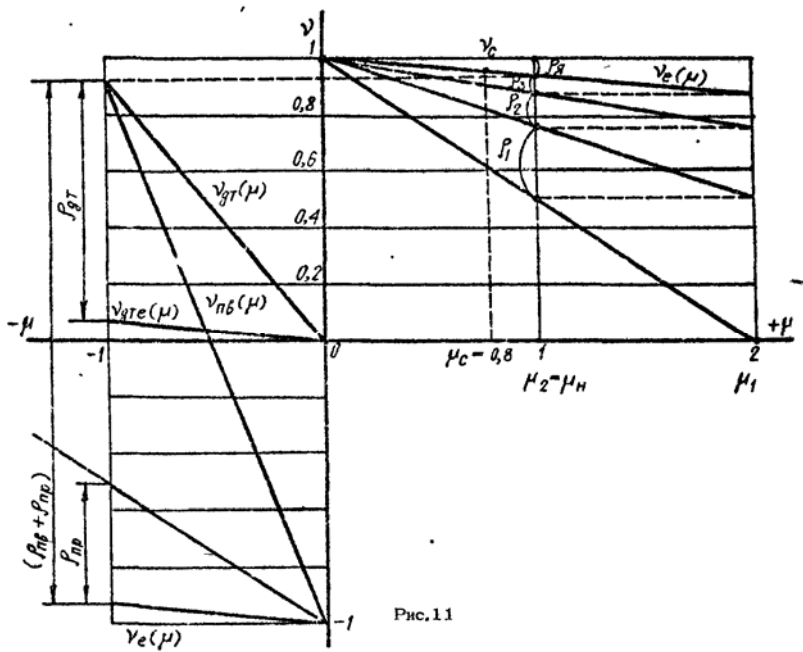


Рис.11

Рис.9

1. Определить номинальное сопротивление двигателя  $R_n$ , рассчитать относительное сопротивление цепи якоря  $\rho = \rho_a$  и графически определить полное (без разбивки на ступени) сопротивление  $\rho_{(1-m)}$ .

2. Построить графики характеристик двигателя  $v=f(\mu)$  при переключении в режим торможения противовключением или режим динамического торможения.

3. Определить по характеристикам тормозного противовключения и динамического торможения величины добавочных сопротивлений ступени противовключения и динамического торможения  $\rho_{пв}$  и  $\rho_{дт}$ .

#### 4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Задача 19. Для привода переменного тока с трехфазным асинхронным двигателем, пускаемым через реактор по схеме (рис.10), определить величину добавочного индуктивного сопротивления реактора  $x_p$ . Номинальное значение величин асинхронного двигателя:  $P_n = 26$  кВт;  $U_n = 380$  В;  $I_n = 44$  А;  $\cos\varphi_n = 0,9$ ;  $\omega_n = 100$  рад/с;  $k_i = I_n/I_n = 5$ ;  $k_{мк} = M_k/M_n = 2$ . В режиме короткого замыкания  $\cos\varphi_k = 0,6$ . Характеристики пуска показаны на рис.11.

1. Найти полное сопротивление короткозамкнутого асинхронного двигателя  $z_k$  и его активную и реактивную составляющие  $z_k = r_k + jx_k$ .

2. Для заданного снижения пускового момента при реакторном пуске  $\mu_{пх} = 0,5\mu_{нс}$  определить снижение пускового тока  $i_{пх}$ ; и полное сопротивление короткозамкнутого двигателя при реакторном пуске  $x_p$ .

3. Определить сопротивление реактора  $x_k$  для заданных условий пуска привода с асинхронным короткозамкнутым двигателем.

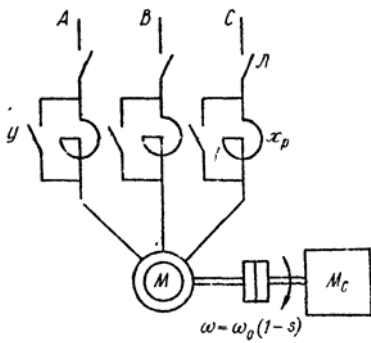


Рис.10

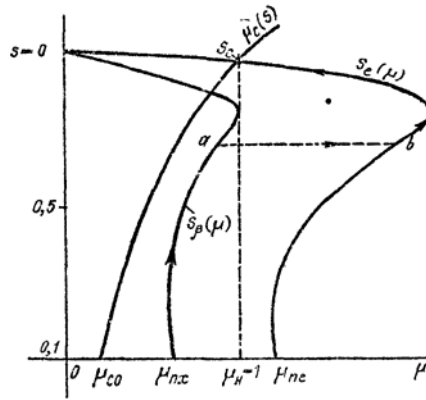


Рис.11

Задача 20. Найти параметры и построить механическую характеристику привода с асинхронным двигателем с фазным ротором. Привод имеет асинхронный двигатель с фазным ротором со следующими паспортными значениями номинальных величин:  $P_n = 28,5$  кВт;  $\omega_0 = 104,6$  рад/с;  $\omega_n = 99,4$  рад/с;  $s_n = 0,05$ ;  $U_{1n} = 380$  В;  $I_{1n} = 50$  А;  $k_{мк} = M_k/M_n = 2,2$ ;  $r_1 = 0$ ;  $E_{2n} = 173$  В;  $I_{2n} = 100$  А.

1. Определить номинальный момент двигателя  $M_n$ ; критическое скольжение  $s_k$  при  $M_k = 2,2M_n$  и пусковой момент  $M_n$  при  $s = 1$ .

2. Построить естественную механическую характеристику для двигательного режима и оценить отношение пускового момента к номинальному моменту  $M_n/M_n$  двигателя без пускового сопротивления в роторе.

3. Определить номинальное сопротивление асинхронного двигателя  $R_{2n}$ , коэффициент трансформации  $k_t$ , сопротивление ротора  $r_2$ , приведенное сопротивление ротора  $r'_2$ .

Задача 21. Для привода с асинхронным двигателем с фазным ротором и реостатно-релейным управлением (рис.12) построить характеристики реостатного пуска и рассчитать ступени пускового реостата (рис.13). Номинальные данные асинхронного двигателя привода:  $P_n = 22$  кВт;  $\omega_0 = 104,5$  рад/с;  $s_n = 0,0625$ ;  $U_{1n} = 380$  В;  $I_{1n} = 50$  А;  $\cos\varphi_n = 0,85$ ;  $E_{2n} = 173$  В;  $I_{2n} = 100$  А.

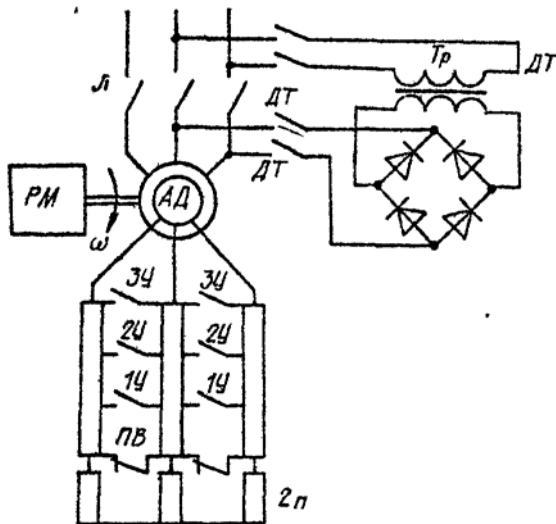


Рис.12

Двигатель пускается в три ступени ( $m = 3$ ) при максимальном моменте при пуске  $\mu_1 = 2$ .

1. Определить при  $r_{1s} \approx 0$ : сопротивление ротора  $r_2$  при  $s=s_n$ , полное сопротивление пускового реостата  $r_{1-m}$  при  $s_n = 1$  и коэффициент отношения моментов двигателя при реостатном пуске  $\lambda = \mu_1/\mu_2$ .

2. Рассчитать приближенным аналитическим методом ступени пускового реостата  $R_1, R_2, R_3$  при  $m=3, \lambda=2$ .

3. Построить график линейных пусковых характеристик асинхронного привода при найденных значениях моментов переключения  $\mu_1 = M_1^*, \mu_2 = M_2^*$  и относительных сопротивлений ступеней пускового реостата  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ .

Задача 22. Для схемы асинхронного привода с реостатным управлением по рис.12 определить величину сопротивления ступени тормозного противовключения при максимальном значении тормозного момента  $\mu_{т1} = 2$  и  $s_t \approx 2$  ( $2 - 0,0625 = 1,9375$ ). Номинальные данные двигателя привода приведены в задаче 21.

1. Построить график механических характеристик с

пусковыми характеристиками для  $m = 3$ ,  $\mu_1 = 2$ ,  $\mu_2 = 2$  и характеристики противовключения с  $\mu_{T1} = 2$  и  $s_{T1} = 1,9375$ .

2. По графику пусковых характеристик  $m = 3$ ,  $\mu_1 = 2$ ,  $\mu_2 = 1$  и характеристике противовключения  $\mu_{T1} = 2$  и  $s_T = 1,9375$  определить сопротивление противовключения  $r_{пв}$  (см. рис.13).

3. Определить полное добавочное сопротивление в цепи ротора асинхронного двигателя при переключении в режим противовключения с  $\mu_{T1} = 2$  и  $s_T = 2$ ,  $r_{1+m} + r_{пв} = r_{\Sigma пв}$ .

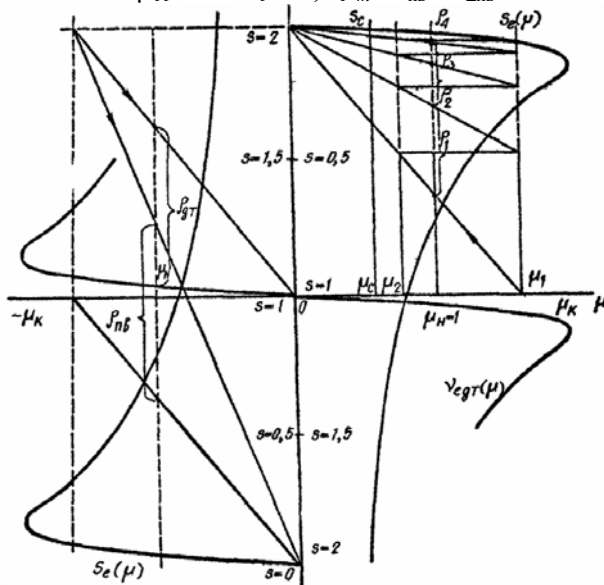


Рис.13

Задача 23. Для схемы асинхронного привода с реостатным управлением (см. рис.12) определить величину напряжения постоянного тока, подаваемого взамен переменного в статор двигателя, и величину сопротивления динамического торможения  $r_{дт1}$  для  $\mu_{дт1} = 1$  при  $v_{дт1} = 0,9375$  (см. рис.13). Соединение обмоток статора - звезда. Номинальные данные двигателя привода приведены в задаче 21. Для расчета напряжения питания двигателя постоянным током принять омическое сопротивление фазы статора двигателя  $r_{1\phi} = 0,24$  Ом.



Задача 24. Какую скорость будет развивать асинхронный двигатель  $P_n = 22,5$  кВт;  $U_n = 380$  В;  $\omega_1 = 157,1$  рад/с;  $\omega_n = 153,4$  рад/с;  $r_1 = 0,2$  Ом;  $r_2' = 0,24$  Ом;  $x_1 = 0,39$  Ом;  $x_2' = 0,46$  Ом при нагрузке номинальным моментом, если в цепь ротора включено сопротивление, приведенное значение которого равно  $r_{2д}' = 1,2$  Ом, а в цепь статора – индуктивное сопротивление  $x_{1д} = 0,75$  Ом.

## 5. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Задача 25. Выполнить статический расчет электропривода по системе ТП-Д с жесткой отрицательной обратной связью по скорости  $\omega$  рис. 14.

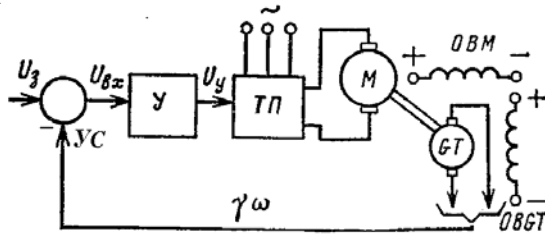


Рис.14. Схема электропривода

Исходные данные для расчета. Тиристорный преобразователь ТПЕ-200 с номинальным выходным напряжением  $U_{тпн} = 305$  В. Внутреннее сопротивление с учетом сопротивлений трансформатора и уравнивательных реакторов  $R_{тп} = 0,097$  Ом.

Двигатель ДПВ-52 мощностью 60 кВт,  $U_n = 305$  В;  $I_n = 220$  А;  $\omega_n = 120$  рад/с;  $R_d = 0,044$  Ом, магнитный поток  $k\Phi = 2,28$  Вб.

Сопротивление якорной цепи системы ТП-Д  $R_{яц} = 0,141$  Ом. Номинальное напряжение тахогенератора  $U_{ГТ} = 12$  В.

Определить коэффициент усиления усилителя  $K_y$  из условия заданной статической точности замкнутой системы  $\delta\omega = 5\%$  в диапазоне регулирования скорости  $D = \omega_{max}/\omega_{min} = 10$ .

Задача 26. Определить переходные процессы и построить характеристики изменения скорости и момента двигателя при реостатно-релейном пуске привода с асинхронным двигателем при

постоянном моменте нагрузки  $\mu_1 = \text{const}$ . Асинхронный двигатель • имеет следующие паспортные данные:  $P_n = 10$  кВт;  $\omega_0 = 105$  рад/с;  $s_n = 0,0625$ ;  $J_d \delta = 0,25$  кгм<sup>2</sup>. Приведенные параметры механизма:  $M_c = 0,5M_n$ ,  $J_{пр} = 0,25$  кгм<sup>2</sup>. Привод пускается в три ступени при  $\mu_1 = 2$  и  $\mu_2 = 1$ . Механические характеристики пуска приведены на рис.14, 15.

1. Найти величину электромеханической постоянной времени привода на естественной характеристике  $T_{ме}$ , и на всех ступенях пуска  $T_{м1}$ ,  $T_{м2}$ ,  $T_{м3}$ .

2. Записать уравнения изменения скорости и момента двигателя на всех ступенях пуска и построить динамические характеристики изменения скорости и момента двигателя при пуске  $M=f(t)$  и  $\omega=f(t)$ .

3. Определить время пуска на каждой реостатной ступени и полное время пуска привода  $t_{п1}$ ,  $t_{п2}$ ,  $t_{п3}$ .

Задача 27. Построить характеристики переходного процесса при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения вхолостую с дальнейшим приложением номинального момента нагрузки (рис.15). Пуск производится подачей номинального напряжения на якорь двигателя с включенной обмоткой возбуждения. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя при пуске введено добавочное сопротивление, ограничивающее максимальное значение тока при пуске  $I_n = 2,5I_n$ .

Технические данные двигателя: мощность  $P_n = 6,5$  кВт, номинальная скорость вращения  $\omega_n = 104,5$  рад/с, номинальное напряжение  $U_n = 220$  В; номинальный ток якоря  $I_n = 33,5$  А; сопротивление цепи якоря  $r_a = 0,77$  Ом; индуктивность якоря  $L_a = 0,01$  Гн; момент инерции привода  $J_\Sigma = 1,0$  кгм<sup>2</sup>.

Задача 28. Определить, какой характер будут иметь переходные процессы в электроприводе ТП-Д с разомкнутой и замкнутой по скорости системами регулирования.

Данные приводного двигателя постоянного тока: номинальное напряжение якоря  $U_n = 220$  В; сопротивление якорной цепи  $r_a = 0,6$  Ом; индуктивность обмотки якоря  $L_a = 0,02$  Гн, машинная постоянная  $c\Phi_n = 1,9$  Вб; номинальная скорость  $\omega_n = 104,5$  рад/с. Момент инерции привода  $J_\Sigma = 1,0$  кгм<sup>2</sup>.

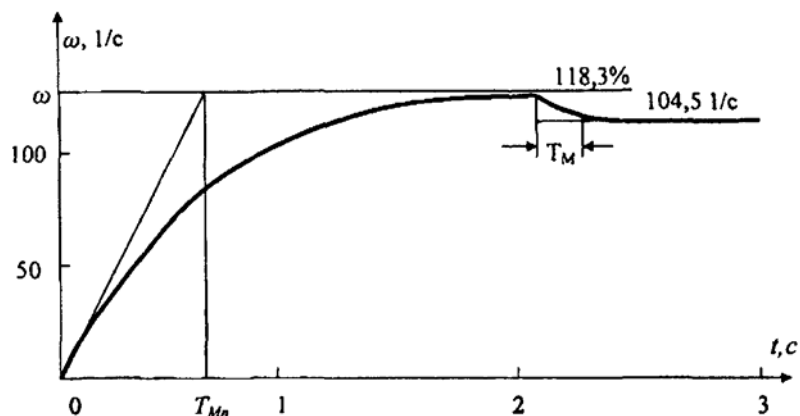


Рис.15

Напряжение управления  $U_y$  изменяется от 0 до 10В; напряжение тиристорного преобразователя  $U_{тп}$  от 0 до 300 В пропорционально напряжению  $U_{y.тп}$ , подаваемому на систему управления ТП и изменяющемуся от 0 до 30 В; коэффициент обратной связи по скорости  $k_c = 0,09$  Вс.

Задача 28. Определить, какой характер будут иметь переходные процессы в электроприводе ТП-Д с разомкнутой и замкнутой по скорости системами регулирования.

Данные приводного двигателя постоянного тока: номинальное напряжение якоря  $U_n = 220$  В; сопротивление якорной цепи  $r_a = 0,6$  Ом; индуктивность обмотки якоря  $L_a = 0,02$  Гн, машинная постоянная  $c\Phi_n = 1,9$  Вб; номинальная скорость  $\omega_n = 104,5$  рад/с. Момент инерции привода  $J_\Sigma = 1,0$  кгм<sup>2</sup>. Напряжение управления  $U_y$  изменяется от 0 до 10В; напряжение тиристорного преобразователя  $U_{тп}$  от 0 до 300 В пропорционально напряжению  $U_{y.тп}$ , подаваемому на систему управления ТП и изменяющемуся от 0 до 30 В; коэффициент обратной связи по скорости  $k_c = 0,09$  Вс.

## РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

### 1. Механика электроприводов

1. Приведенный момент инерции тела (крюка), движущегося поступательно (подъем)

$$J_{\text{пр}0} = \frac{m_{\text{к}} v^2}{\omega_{\text{д}}^2}.$$

Суммарный приведенный момент инерции механизма (лебедки) при подъеме крюка

$$J_{\Sigma} = J_{\text{д}} \delta + J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} \delta + J_{\text{пр}0},$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора.

Статический момент, приведенный к валу двигателя, необходимый при подъеме крюка

$$M_{\text{с}0\uparrow} = \frac{G_{\text{к}} v}{\omega_{\text{д}} \eta},$$

с постоянным ускорением

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{t_{\text{п}}}.$$

Динамический момент, необходимый для подъема крюка без груза

$$M_{\text{д}0\uparrow} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

Статический момент, приведенный к валу двигателя, необходимый при подъеме крюка с грузом

$$M_{\text{с}\uparrow} = \frac{(G_{\text{к}} + G_{\Gamma}) v}{\omega_{\text{д}} \eta_{\text{р}}},$$

Динамический момент, необходимый для подъема крюка с

грузом

$$M_{\text{д}\uparrow} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J_{\Sigma} = J_{\text{д}} \delta + J_{\text{пр}} + J_{\text{пр}0}$ ;  $J_{\text{пр}} = \frac{(m_{\text{к}} + m_{\text{г}})v^2}{\omega_{\text{д}}^2}$ .

Статический момент, приведенный к валу двигателя, необходимый при спуске крюка с грузом

$$M_{\text{с}\downarrow} = \frac{(G_{\text{к}} + G_{\text{г}})v \eta_{\text{п}}}{\omega_{\text{д}}},$$

Динамический момент при спуске крюка с грузом

$$M_{\text{д}\downarrow} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

2. Статический момент  $M_{\text{с}0}$  при пуске механизма вращательного действия при холостом ходе

$$M_{\text{с}0} = \frac{M_{\text{м}0}}{i\eta_{\text{п}}}.$$

Динамический момент привода  $M_{\text{дин}0}$  при пуске с постоянным ускорением  $a$  и холостом ходе

$$M_{\text{дин}0} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J_{\Sigma} = J_{\text{д}} \delta + \frac{J_{\text{м}0}}{i_{\text{п}}^2}$  - суммарный момент инерции;  $J_{\text{м}0}=0$ .

Приведенный статический момент  $M_{\text{сн}}$  при работе с нагрузкой, имеющей реактивный характер

$$M_{\text{сн}} = M_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{м}}}{i_{\text{п}}\eta_{\text{п}}},$$

Динамический момент привода  $M_{\text{дин}}$  при пуске с постоянным ускорением  $a$

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J_{\Sigma} = J_{\text{д}}\delta + \frac{J_{\text{м}}}{i_{\text{п}}^2}$  - суммарный момент инерции;  $\frac{J_{\text{м}}}{i_{\text{п}}^2}$  - приведенный к валу двигателя момент инерции механизма.

Динамический момент привода  $M_{\text{дин.т}}$  при торможении с постоянным ускорением  $a$

$$M_{\text{дин.т}} = -J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J_{\Sigma} = J_{\text{д}}\delta + \frac{J_{\text{м}}}{i_{\text{п}}^2}$  - суммарный момент инерции;  $\frac{J_{\text{м}}}{i_{\text{п}}^2}$  - приведенный к валу двигателя момент инерции механизма.

3. Мощность двигателя привода лебедки при подъеме груза

$$M_{\text{г}\uparrow} = \frac{(G_{\text{к}} + G_{\text{г}})v}{\eta_{\text{н}}}.$$

Мощность двигателя при подъеме крюка

$$M_{\text{к}\uparrow} = \frac{G_{\text{к}}v}{\eta_0}.$$

Мощность двигателя привода при опускании груза

$$M_{\text{г}\downarrow} = (G_{\text{к}} + G_{\text{г}})v\eta_{\text{н}}.$$

Мощность двигателя привода при опускании груза

$$M_{\text{к}\downarrow} = G_{\text{к}}v\eta_0.$$

4. Оптимальное передаточное число редуктора механизма вращательного действия при  $M_{\text{м}} = 0$

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_M}{J_d \delta}},$$

Приведенный момент инерции механизма

$$J_{\text{пр}} = \frac{J_M}{i_{\text{опт}}^2}.$$

5. Суммарный приведенный момент инерции механизма

$$J_{\Sigma} = J_d \delta + \frac{J_M}{i_p^2}.$$

Время пуска привода механизма вращательного движения

$$t_{\text{п}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{нач}}}{M_d - M_c}.$$

Время торможения привода механизма вращательного движения

$$t_{\text{п}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{нач}}}{M_d + M_c}.$$

6. Требуемый момент двигателя при пуске привода лебедки на подъем

$$M_{\text{п}\uparrow} = M_c + M_{\text{дин.}}$$

Требуемый момент двигателя при торможении (остановке при спуске) привода лебедки

$$M_{\text{т}\downarrow} = -M_c - M_{\text{дин.}}$$

Динамический момент в переходных режимах

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} a = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J_{\Sigma} = J_d \delta + J_{\text{пр}}$  - суммарный приведенный момент инерции механизма.

## 2. Нагрузочные диаграммы и выбор мощности двигателей приводов

7. Приведенный момент двигателя при установившемся движении привода  $M_2 = M_c$  с учетом формулы приведения моментов к валу двигателя:

$$M_c = M_2 = \frac{M_M}{i \cdot \eta},$$

где  $i = \frac{\omega_H}{\omega_M}$  - общее передаточное число редуктора.

2). Момент двигателя при пуске из основного уравнения движения электропривода:

$$M_1 = M_c + M_{дин} = M_c + J \frac{d\omega}{dt}.$$

Ускорение согласно тахограмме:

$$d\omega/dt = \omega / t_p.$$

Суммарный момент инерции привода равен:

$$J = J_{дв} + \frac{J_M}{i^2}.$$

Где  $J_M/i^2$  - приведенный момент инерции механизма.

3). Момент двигателя при торможении равен:

$$M_3 = M_c - J \frac{d\omega}{dt}.$$

Замедление согласно тахограмме:

$$d\omega/dt = \omega / t_r.$$

4). Эквивалентный момент двигателя:



$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 \dots + t_N}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{(t_1 + t_3) \cdot \gamma + t_2 + \beta \cdot t_0}}$$

где  $\gamma = 0,75$  - коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при пуске и торможении;  $\beta = 0,5$  - коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена при остановке.

5). Эквивалентная мощность:

$$P_3 = M_3 \omega.$$

6). Сопоставляется величина эквивалентной мощности с паспортным значением мощности выбранного двигателя:

$$P_3 \leq P_n.$$

7). Двигатель проверяется по допустимой перегрузке:

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_n} = \frac{M_1}{M_3} \leq \lambda,$$

где  $\lambda$  – коэффициент перегрузки по моменту ( $\lambda = 2.2$ ).

8. При использовании двигателя с принудительной вентиляцией эквивалентный момент двигателя:

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 \dots + t_N}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_3 + t_2 + t_0}}$$

9. Относительная продолжительность включения

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100.$$

Мощность на валу двигателя

$$P = M \omega.$$

В общем случае требуется привести реальное значение ПВ к стандартному  $ПВ_{ст}$

$$P_{ст} = P \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}}.$$

Выбранный двигатель должен иметь мощность  $P_n$

$$P_n \geq P_{ст}.$$

10. При  $t_p/T_n \geq 0,35$  определяется отношение мощности нагрузки двигателя в кратковременном режиме  $P_k$  к номинальной мощности  $P_n$  в продолжительном режиме (коэффициент механической перегрузки)

$$P_M = \frac{P_k}{P_n} = \sqrt{\frac{1 + \alpha}{1 - e^{-t_p/T_n}}} - \alpha,$$

где  $\alpha = K/V_n$  – отношение постоянных потерь  $K$  к номинальным потерям в двигателе  $V_n$ .

При пренебрежении постоянными потерями зависимость между коэффициентами механической  $p_m$  и термической перегрузки  $p_T$

$$p_m = \sqrt{p_T}.$$

11. Мощность и номинальное значение момента при работе привода с  $ПВ_x = X\%$  при паспортном значении  $ПВ_{ст}$

$$M_{нх} = M_{н60} \sqrt{\frac{ПВ_{ст}}{ПВ_x}},$$

$$P_{нх} = M_{нх} \omega_n.$$

12. По известной нагрузочной диаграмме рис.4 фактический коэффициент продолжительности включения

$$ПВ_x = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100 = \frac{t_1 + t_{21}}{t_1 + t_2 + t_0} 100.$$

Эквивалентное значение момента при  $ПВ_x$

$$M_{\text{ПВ}x} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}.$$

Если фактическая  $\text{ПВ}_x$  соответствует стандартной, то двигатель выбирают из условия  $M_n > M_{\text{ПВ}x}$ .

Если фактическая  $\text{ПВ}_x$  не соответствует стандартной, эквивалентный момент приводят к стандартному

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{ПВ}x} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_x}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}}.$$

### 3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 13. Магнитный поток по паспортным данным двигателя

$$c\Phi_n = \frac{U_n - r_a I_n}{\omega_n},$$

где  $r_a$  – сопротивления якорной цепи для двигателей средней и большой мощности приближенно равно

$$r_a = 0,5 \left(1 - \frac{P_n}{U_n I_n}\right) \frac{U_n}{I_n} \quad \text{или} \quad r_a = \Delta v_n \frac{U_n}{I_n} = \Delta v_n R_n,$$

$\Delta v_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$  – относительное номинальное падение скорости;  $R_n =$

$U_n / I_n$  – номинальное сопротивление двигателя.

Скорость холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_n}{c\Phi_n}$$

Относительное значение сопротивления якоря

$$\rho = \frac{r_a}{R_n}.$$

#### 14. Магнитный поток двигателя постоянного тока

$$c\Phi_n = \frac{U_n}{\omega_0}.$$

Номинальная скорость двигателя

$$\omega_n = \omega_0 - \frac{r_a I_n}{c\Phi_n}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_n = c\Phi_n I_n.$$

15. Магнитный поток двигателя по паспортным данным

$$c\Phi_n = \frac{U_n - I_n r_{ад}}{\omega_n}.$$

Падение скорости двигателя в системе Г-Д при номинальной нагрузке двигателя

$$\Delta \omega_{ГДн} = \frac{I_n r_a}{c\Phi_n},$$

где  $r_a = -r_{ад} + r_{ат}$  сопротивление якорной цепи Г-Д.

Скорость холостого хода системы Г-Д при  $U_n$

$$\omega_{0ГД} = \Delta \omega_{ГДн} + \omega_n.$$

ЭДС генератора для получения в системе Г-Д номинальной скорости

$$E_{zn} = \omega_{0ГД} c\Phi_n.$$

ЭДС генератора для получения скорости привода  $\omega_{ГДх} = 0,5\omega_n$  при  $M_{сх} = 0,5M_n$ .

$$E_{с0,5n} = \omega_{с0,5} c\Phi_n = 0,5\omega_n + 0,5\Delta\omega_{нзд}$$

16. Система относительных параметров

$$\rho = \frac{r_a}{R_n}; \rho' = \frac{R_a}{R_n}, u = \frac{U}{U_n} \quad v = \frac{\omega}{\omega_0}, \mu = \frac{M}{M_n}, \varphi = \frac{\Phi}{\Phi_n};$$

$$(R_a = r_a + R_n); \text{ при } U = U_n \quad u = 1; R_a = r_a \text{ при } R_n = 0.$$

Уравнение механической характеристики в абсолютных единицах

$$\omega = \frac{U_n}{c\Phi} - \frac{M r_a}{c^2 \Phi^2}$$

В относительных единицах при  $U = U_n$

$$v = \frac{1}{\Phi_x} - \frac{\rho\mu}{\Phi_x^2} \quad (v_x = 1,4; \mu = 0,5), \quad \text{откуда} \quad \text{уменьшение}$$

магнитного потока

$$\Phi_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_n} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4\rho v \mu}}{2v},$$

$$\text{где, } R_n = \frac{E_{гн}}{I_n}, \quad E_{гн} = 260B$$

17. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_n = \frac{U_n}{I_n}.$$

Сопротивление якоря двигателя

$$r_a = 0,5(1 - \eta)R_n.$$

Скорость холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_n}{U_n - I_n r_a} \omega_n.$$

Номинальный магнитный поток

$$c\Phi_n = \frac{U_n - I_n r_a}{\omega_n}.$$

Коэффициент отношения моментов переключения  $\mu_1/\mu_2$

определяется выражением  $\lambda = m \sqrt{\frac{1}{\mu_1 \rho}}, \quad \lambda^m = \frac{1}{\mu_1 \rho};$  откуда при

заданном значении  $\rho = \frac{r_a}{R_n}$  находят приближенно число ступеней

реостата  $m$ . Если  $m$  получается дробным, можно подкорректировать  $\mu_1, \mu_2$  при соблюдении условий;  $\mu_1 = 2 - 2,5; \mu_c = (0,8 - 0,9)\mu_2$ , т.е.

$$\mu_2 = (1,1 - 1,2)\mu_c.$$

Сопротивления ступеней реостата

$$r_4 = r_a(\lambda - 1); \quad r_3 = r_4 \lambda; \quad r_2 = r_3 \lambda; \quad r_1 = r_2 \lambda.$$

Полное сопротивление реостата

$$r_{\text{полн}} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

Сопротивление якорной цепи

$$r_{\text{общ}} = r_a + r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

Проверка

$$\frac{r_{\text{полн}} \cdot 2I_n}{c\Phi_n} = \omega_0$$

18. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_n = \frac{U_n}{I_n}.$$

Относительное сопротивление цепи якоря

$$\rho = \frac{r_a}{R_n}.$$

Полное сопротивление  $\rho_{(1-m)}$ .

$$r_{(m-1)} = \frac{c\Phi_n \omega_0}{\mu_1 I_n}$$

Величина добавочного сопротивления ступени динамического торможения

$$R_n = \frac{U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_a,$$

где  $U_{\text{нач}}$  – напряжение двигателя в начальный момент торможения ( $U_{\text{нач}} \approx U_n$ );  $I_{\text{доп}}$  – максимально допустимый ток ( $I_{\text{доп}} \approx I_n$ ).

Величина добавочного сопротивления ступени торможения противовключением

$$R_n = \frac{U_n + U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_a.$$

#### 4. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

19. Пусковой ток асинхронного двигателя

$$I_n = k_i I_n$$

Полное сопротивление короткозамкнутого асинхронного двигателя  $z_k$  и его активная и реактивная составляющие  $z_k = r_k + jx_k$ .

$$z_k = \frac{U_H}{\sqrt{3}I_{II}}; r_k = z_k \cos \varphi_k; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

Допустимое снижение пускового тока  $a$  по заданному снижению пускового момента  $\mu_{пх} = 0,5\mu_{пе}$

$$a = \sqrt{\frac{\mu_{пх}}{\mu_{пе}}}$$

Снижение пускового тока

$$I_{пх} = aI_{II}$$

Допустимое полное сопротивление статора короткозамкнутого двигателя при реакторном пуске  $x_p$

$$z_{кзх} = \frac{U_H}{\sqrt{3}I_{пх}}$$

Увеличение  $x_k$  за счет добавочного реактора  $x_p$  при неизменном значении  $r_k$

$$x_p = \sqrt{z_{кзх}^2 - r_k^2} - x_k$$

20. Номинальный момент двигателя

$$M_H = P_H / \omega_H$$

Критический момент  $M_K = 2,2M_H$

Критическое скольжение  $s_K$

$$s_K = s_H \left( k_{мк} + \sqrt{k_{мк}^2 - 1} \right)$$

Номинальное сопротивление асинхронного двигателя с фазным ротором  $R_{2H}$

$$R_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3}I_{2H}}$$

Коэффициент трансформации от статора к ротору

$$k_T = \frac{E_{1H}}{E_{2H}} = \frac{0,95U_{1H}}{E_{2H}}$$

Приведенное сопротивление ротора

$$r_2' = r_2 k_T^2.$$

Пусковой момент без сопротивления в цепи ротора

$$M_{п} = 2 \cdot M_k / \left( s_k + \frac{1}{s_k} \right).$$

21. Расчет пусковых сопротивлений приближенным методом основан на прямолинейности механических характеристик и аналогичен расчету для двигателя постоянного тока при  $\rho = s_n$ .

Номинальное сопротивление асинхронного двигателя с фазным ротором  $R_{2н}$

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} I_{2н}}.$$

Активное сопротивление ротора

$$r_{2п} = \frac{E_{2н} s_n}{\sqrt{3} I_{2н}}.$$

Относительное значение сопротивления ротора

$$\rho = \frac{r_{2п}}{R_{2н}}.$$

При заданном числе ступеней  $m$  проверяем отношение моментов переключения  $\lambda = \mu_1 / \mu_2$

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{\mu_1 \rho}}.$$

Сопротивление пускового реостата

$$r_{пр} = \frac{E_{2н} (1 - 2s_n)}{\sqrt{3} I_{2н} \mu_1}.$$



Сопротивления ступеней реостата

$$r_3 = r_{2p}(\lambda - 1); r_2 = r_3\lambda; r_1 = r_2\lambda.$$

Полное сопротивление реостата

$$r_{\text{полн}} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

Значения относительных сопротивлений ступеней пускового реостата  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$

Относительные значения сопротивлений ступеней

$$\rho_i = \frac{r_i}{R_{2н}}.$$

Полное сопротивление роторной цепи

$$r_{\text{общ}} = r_{2p} + r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

22. Принимая условия задачи 21, при построении определяем сопротивление ступени противовключения ( $\rho_{\text{пв}} = 1 - \rho_{\text{общ}}$ )

$$r_{\text{пв}} = R_{2н} \rho_{\text{пв}}$$

Полное добавочное сопротивление в цепи ротора асинхронного двигателя ( $r_{1+m} = r_{\text{полн}}$ )

$$r_{\Sigma\text{пв}} = r_{1+m} + r_{\text{пв}}.$$

23. Учитывая условия задачи 22 (рис.13), принимаем, что для получения  $\Phi = \text{const}$  ток двигателя равняется  $I_{в\approx} = 0,5I_{н} = 25 \text{ A}$ ,  $\rho_{\text{дт}} = \rho_{\text{пв}}$ .

$$r_{\text{дт1}} = R_{2н} \rho_{\text{дт}}.$$

При соединении в звезду сопротивление цепи возбуждения

$$r_{\text{рдт}} = 2r_{1\phi}$$

Постоянный ток, обеспечивающий то же значение МДС, что и переменный

$$I_{\text{вY}} = 1,23 I_{\text{в}\approx}$$

Величина напряжения постоянного тока, подаваемого взамен переменного в статор двигателя

$$I_{вУ} = 1,23 I_{в\approx} 2r_{1ф}.$$

24. Номинальный момент двигателя

$$M_H = P_H / \omega_H.$$

Критический момент с добавочным индуктивным сопротивлением в цепи статора

$$M_K = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot [(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x'_2)^2}]}$$

Критическое скольжение с добавочными сопротивлениями в цепи статора и ротора

$$s_K = +(r'_2 + r'_{2д}) / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x'_2)^2}.$$

Скольжение  $s_H$  при номинальной нагрузке с дополнительными сопротивлениями из формулы Клосса

$$M = 2 \cdot M_K \left/ \left( \frac{s_K}{s_H} + \frac{s_H}{s_K} \right) \right.,$$

$$s_H^2 - \frac{2M_K s_K}{M_H} s_H + s_K^2 = 0.$$

Скорость при включенных сопротивлениях

$$\omega_{нх} = \omega_1 (1 - s_H).$$

## 5. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

25. Статическая точность разомкнутой системы при увеличении тока до номинального значения 220 А определяется падением скорости из уравнения электромеханической

характеристики:

$$\Delta\omega_p = \frac{I_n r_{яц}}{k\Phi}.$$

Скорость холостого хода  $\omega_0 = \omega_n + \Delta\omega_p$

Для выполнения расчета необходимо определить коэффициенты передачи системы:

Коэффициент передачи ТП при линейной регулировочной характеристике и номинальном напряжении  $U_{yn} = 10$  В:

$$K_{ТП} = \frac{\Delta U_{ТП}}{\Delta U_y} \approx \frac{U_{ТП.Н}}{U_{y.Н}};$$

Коэффициент передачи устройства изменения скорости:

$$K_{yuc} = \gamma = \frac{\Delta U_{GT}}{\Delta\omega} \approx \frac{U_{GT}}{\omega_n};$$

Передаточный коэффициент двигателя:

$$K_{ДВ} = \frac{\Delta\omega}{\Delta U_{ТП}} = \frac{1}{k\Phi}.$$

Требуемый коэффициент усиления разомкнутой системы регулирования напряжения ТП  $K_{mp}$ :

$$K_{mp} = K_y \cdot K_{yuc} \cdot K_{ТП} \cdot K_{ДВ} = \frac{\delta\omega_p \cdot D}{\Delta\omega} - 1,$$

где  $\delta\omega_p$  – статическая ошибка разомкнутой системы регулирования тиристорного привода в % к номинальной скорости при изменении тока нагрузки двигателя  $\delta\omega_p = 100 \Delta\omega_p / \omega_n$ ;  $\delta\omega$  – статическая точность, выраженная в %, требуемая при регулировании скорости в диапазоне  $D$ .

При данных значениях параметров коэффициент усиления из условия заданной статической точности равен:

$$K_y = K_{тр} / (K_{BR} K_{ТП} K_{\delta\omega}).$$

26. Значения номинальных скольжений для ступеней реостатного пуска

$$s_{n1} = \frac{r_1}{R_{2H}}, \dots, s_i = \frac{r_i}{R_{2H}}, s_{ne} = \frac{r_{2p}}{R_{2H}}.$$

Электромеханические постоянные времени

$$T_{M1} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{H1}}{M_H}, \dots, T_{Mi} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{Hi}}{M_H}, T_{Me} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{He}}{M_H}$$

Время пуска на реостатных ступенях

$$t_{n1} = T_{M1} \ln \left( \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c} \right), \dots, t_{ni} = T_{Mi} \ln \left( \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c} \right), t_e = 3T_{Me}.$$

Время пуска

$$t_n = t_{n1} + t_{n2} + \dots + t_{ni} + t_e.$$

27. Номинальный момент двигателя

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}.$$

Машинная постоянная

$$c\Phi_H = \frac{M_H}{I_H}.$$

Скорость холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_H}{c\Phi_H}.$$

Добавочное сопротивление, вводимое в цепь якоря

$$R_{доб} = \frac{U_H}{I_n} - r_a$$

Максимальный момент при пуске

$$M_k = 2,5M_H$$

Жесткость естественной механической характеристики

$$\gamma_e = \frac{(c\Phi_n)^2}{r_a}$$

Жесткость пусковой механической характеристики

$$\gamma_n = \frac{(c\Phi_n)^2}{r_a + R_n}$$

Электромеханическая постоянная времени при работе на естественной характеристике

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\gamma_e}$$

Электромеханическая постоянная времени при работе на пусковой характеристике

$$T_{мп} = \frac{J_\Sigma}{\gamma_n}$$

Электромагнитная постоянная времени при работе на естественной характеристике

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

При  $T_a \ll T_M$ , первой можно пренебречь.

Для построения характеристики переходного процесса при пуске холостую используется известная формула

$$\omega = \omega_0 (1 - e^{-t/T_{мп}})$$

После разгона на холостом ходу при установлении  $R_n=0$ , к валу двигателя будет приложен момент  $M_c=M_n$ . Установившееся значение скорости после приложения нагрузки

$$\omega_{уст} = \omega_0 - \frac{M_c}{\gamma_e}$$

Для построения переходного процесса изменения скорости, связанного с приложением нагрузки, используется формула

$$\omega = \omega_{уст} - (\omega_{уст} - \omega_0)e^{-t/T_M}$$

28. Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

Электрохимическая постоянная времени

$$T_M = \frac{J_\Sigma R_a}{(c\Phi)^2}$$

Коэффициент усиления усилителя  $K_{ур}$  в разомкнутой системе

$$k_{ур} = \frac{U_n U_{y.тп}}{U_{тп} U_y}$$

где  $U_y$  - напряжение управления ТП, соответствующее  $U_n = 220$  В:  $U_{y.тп} = U_y k_{ур}$ .

Коэффициент усиления ТП

$$k_{п} = \frac{U_n}{U_{y.тп}}$$

Коэффициент усиления усилителя  $k_{y.з}$  в замкнутой системе регулирования определяется из соотношения  $U_{y.тп} = k_{y.з}(U_y - U_{оос})$ , где  $U_{оос}$  – напряжение обратной связи по скорости

$$k_{y.з} = \frac{U_{y.тп}}{U_y - k_c \omega_n}$$

Коэффициент усиления разомкнутой системы

$$K = \frac{k_{y.з} k_c k_{п}}{c\Phi}$$

Эквивалентная электрохимическая постоянная времени

$T_{м.экв}$  в замкнутой по скорости системе

$$T_{м.экв} = \frac{T_m}{K - 1}$$

В разомкнутой (замкнутой) системе регулирования при  $T_m > 4 T_a$  ( $T_{м.экв} > 4 T_a$ ) переходный процесс будет монотонным, носить аperiodический характер, а при  $T_m < 4 T_a$  ( $T_{м.экв} < 4 T_a$ ) - процесс носит колебательный характер с затуханием.

Назначение электропривода - создавать движение рабочих машин и управлять этим движением. Переменными величинами, характеризующими движение, являются:

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Онищенко Г.Б.* Электрический привод. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
2. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1985.
3. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования. Учебное пособие / *В.В. Алексеев, А.Е. Козярук; Э.А. Загривный*; СПГГИ. СПб, 2006,
4. *Башарин А.В., Постников Ю.В.* Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат. 1990.
5. Автоматизированный электропривод: Задачи для самоконтроля студентов Санкт-Петербургский горный ин-т. *В.В. Рудаков*, Л, 1990. 50 с.

Приложение. Величины, характеризующие движение рабочей машины

Поступательное движение			Вращательное движение		
Величина	Обозначение	Размерность	Величина	Обозначение	Размерность
Путь	$S$	м	Угол поворота	$\varphi$	радиан
Скорость	$V = \frac{dS}{dt}$	м/с	Угловая скорость (частота вращения)	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	рад/с; 1/с
Ускорение	$a = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2}$	м/с <sup>2</sup>	Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$	рад/с <sup>2</sup> ; 1/с <sup>2</sup>
Сила	$F$	Н	Момент	$M$	Н.м
Масса	$m$	кг	Момент инерции	$J$	кг м <sup>2</sup>