

Министерство образования и науки Российской Федерации

**РЫБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени П. А. СОЛОВЬЕВА**

Факультет заочного обучения

Кафедра электротехники и промышленной электроники

**Методическое руководство к выполнению
курсовой работы**

по дисциплине «Электрический привод»

Рыбинск

Содержание

Задание.....	3
Введение.....	4
1. Асинхронные двигатели в системах электропривода.....	5
1.1. Параметры задания и выбор варианта задания.....	5
1.2. Расчет эквивалентной мощности и выбор АД.....	6
1.3. Проверка выбранного двигателя по нагреву.....	7
1.4. Проверка на перегрузку при снижении напряжения.....	9
1.5. Расчет теплового состояния АД.....	10
1.6. Расчет механических характеристик.....	12
1.7. Расчет резисторов пускового реостата.....	16
1.8. Расчет электрических потерь при пуске двигателя.....	17
2. Управление пуском асинхронных двигателей.....	19
2.1. Общие положения.....	19
2.2. Управление пуском АД с короткозамкнутым ротором....	21
2.3. Управление пуском АД с фазным ротором в функции времени.....	21
3. Управление реверсом АД с короткозамкнутым ротором.....	22
Заключение.....	25
Библиографический список.....	26

Задание для выполнения КР

Вариант № _____

Параметры нагрузки на каждой ступени, синхронная частота вращения АД и требуемое снижение частоты вращения ротора в процентах от номинальной приведены в таблице 1.1, а длительность ступеней – в таблице 1.2.

При расчете принять, что в период паузы (t_5) двигатель работает в режиме холостого хода без отключения от сети.

Напряжение питающей (цеховой) сети принять в зависимости от мощности двигателя:

от 22 до 75 кВт – 380 В,

от 45 до 110 кВт – 660 В,

от 45 до 75 кВт – 380 либо 660 В (выбрать по желанию).

Снижение напряжения в питающей сети для проверки выбранного АД на перегрузочную способность принять 10 % от номинального для всех вариантов.

Объектом исследования является асинхронный двигатель с фазным ротором.

Цель работы:

- расчет основных параметров и характеристик АД, работающего в системе электропривода, определение по заданной нагрузочной диаграмме электропривода эквивалентной мощности двигателя и выбору по каталожным данным;

- проверка выбранного двигателя на нагрев по методу средних потерь;

- проверка на перегрузочную способность при снижении напряжения в сети;

- расчет теплового режима выбранного двигателя по заданной нагрузочной диаграмме;

- определение сопротивления добавочного резистора, который необходимо включить в цепь ротора, выбранного двигателя для снижения частоты вращения на заданную величину при номинальном моменте сопротивления;

- построение естественной и реостатных характеристики выбранного двигателя.

Число ступеней пускового реостата для всех вариантов $z = 2$.

Таблица 1.1 – Параметры нагрузки

Последняя цифра варианта	Мощность на ступенях нагрузки, кВт				Синхронная частота вращения, об/мин	Δn , %
	P_1	P_2	P_3	P_4		
0	3	5	9	4	750	5,8
1	7	13	9	18	750	5,5
2	15	10	35	22	750	4,6
3	13	6	10	5	1000	4,8
4	18	22	9	12	1000	4,0
5	22	30	40	25	1000	4,5
6	8	15	5	18	1000	4,2
7	25	12	15	10	1500	5,0
8	25	35	45	12	1500	5,7
9	45	27	40	50	1500	6,0

Таблица 1.2 - Длительность ступеней нагрузки

Длительность ступеней нагрузки, мин	Предпоследняя цифра варианта (шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_1	10	3	2	13	9	6	16	10	11	7
t_2	5	7	9	8	15	8	6	12	7	14
t_3	15	9	4	9	8	18	13	15	18	10
t_4	8	3	8	11	12	10	9	6	9	13
t_5	7	8	7	4	6	8	6	7	5	6

Пример выполнения задания:

1.1 Из приведенных таблиц 1.1 и 1.2 в соответствии с вариантом следует:
 мощности на ступенях нагрузки, кВт,
 $P_1=22, P_2=30, P_3=40, P_4=25,$

длительность каждой ступени нагрузки, мин,
 $t_1=13, t_2=7, t_3=9, t_4=13, t_5=8.$

Синхронная частота вращения АД–1000об/мин. Требуемое снижение частоты вращения на реостатной характеристике $\Delta n=4,5\%.$

1.2 Расчет эквивалентной мощности и выбор АД

Многоступенчатый график нагрузки, характеризующий длительный переменный режим работы электропривода (рисунок 1.1), можно привести к равномерному, воспользовавшись понятием эквивалентной (среднеквадратичной) мощности, кВт,

$$P_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad (1.1)$$

где P_i – мощность, кВт,

t_i – продолжительность нагрузки каждой i -й ступени графика, включая паузу, мин,

$$P_y = \sqrt{\frac{22^2 \cdot 13 + 30^2 \cdot 7 + 40^2 \cdot 9 + 25^2 \cdot 13}{13 + 7 + 9 + 13 + 8}} = 26,5 \text{ кВт}$$

По каталогу выбираем двигатель 4АК225М6УЗ, имеющий следующие параметры:

номинальная мощность P_n , кВт	30
номинальное скольжение S_n , %	3,5
КПД в номинальном режиме η_n , %	89
кратность номинального момента K_m	2,5
напряжение ротора U_p , В	140
ток ротора I_p , А	150
постоянная времени нагрева T_n , мин	30
суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя J , кг*м ²	55×10^{-2}

Характеристика двигателя 4АК225М6УЗ:

двигатель серии 4А с фазным ротором; исполнение по способу защиты – IP44 – защита от проникновения внутрь оболочки предметов длиной до 80 мм и твердых тел размером свыше 12 мм; степень защиты от проникновения внутрь машины воды 3 ; станина алюминиевая, щиты чугунные; высота оси вращения – 225мм; установочный размер по длине станины средний; число полюсов – 6; климатическое исполнение – УЗ, т.е. возможность эксплуатации электрической машины в зоне умеренного климата, в закрытых помещениях.

1.3 Проверка выбранного двигателя по нагреву

Выбор АД гарантирует, что данный двигатель при заданном графике нагрузки удовлетворяет требованиям по нагреву, однако проведем проверку.

Проверка по нагреву производится по методу средних потерь. Для этого вначале определяются потери в номинальном режиме по данным каталога:

Потери в номинальном режиме, кВт,

$$\Delta P_n = \frac{1 + \eta_n}{\eta_n} * P_n, \quad (1.2)$$

где P_n – номинальная мощность выбранного АД, кВт,
 η_n – КПД в номинальном режиме по каталогу.

$$\Delta P_n = \frac{1 + 0.89}{0.89} * 30 = 3,708 \text{ кВт}$$



Найденные потери являются суммой потерь в меди обмоток статора и ротора, в стали и механических. Будем считать, что механические потери остаются постоянными, тогда сумму потерь разделим на две группы:

- постоянные потери или потери х.х., включающие в себя потери в стали, механические и дополнительные,

- переменные потери в обмотках, изменяющиеся с изменением нагрузки.

В большинстве случаев соблюдаются следующие соотношения:

$$P_0 = P_c + P_{\text{мех}} \approx 0,35 * \Delta P_H, \quad (1.3)$$

$$P_M \approx 0,65 * \Delta P_H, \quad (1.4)$$

P_0 – потери х.х. (постоянные потери), кВт.

$$P_0 \approx 0,35 * 3,708 = 1,298 \text{ кВт},$$

$$P_M \approx 0,65 * 3,708 = 2,41 \text{ кВт}.$$

Потери в обмотках являются переменными, они пропорциональны квадрату тока или квадрату коэффициента нагрузки. Исходя из этого:

Коэффициенты нагрузки по ступеням графика

$$K_{Hi} = \frac{P_i}{P_H}, \quad (1.5)$$

где P_i – мощность i -й ступени нагрузки,

K_{Hi} – коэффициент нагрузки i -й ступени.

$$K_{H1} = \frac{P_1}{P_H} = \frac{22}{30} = 0,733 \text{ кВт},$$

$$K_{H2} = \frac{P_2}{P_H} = \frac{30}{30} = 1 \text{ кВт},$$

$$K_{H3} = \frac{P_3}{P_H} = \frac{40}{30} = 1,33 \text{ кВт},$$

$$K_{H4} = \frac{P_4}{P_H} = \frac{25}{30} = 0,833 \text{ кВт},$$

$$K_{H5} = \frac{P_5}{P_H} = \frac{0}{30} = 0 \text{ кВт}.$$

Потери на каждой ступени графика нагрузки, кВт,

$$\Delta P_i = P_0 + K_{Hi}^2 * P_M, \quad (1.6)$$

$$\Delta P_1 = P_0 + K_{H1}^2 * P_M = 1,298 + 0,733^2 * 2,41 = 2,594 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_2 = P_0 + K_{H2}^2 * P_M = 1,298 + 1^2 * 2,41 = 3,708 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_3 = P_0 + K_{H3}^2 * P_M = 1,298 + 0,33^2 * 2,41 = 5,582 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_4 = P_0 + K_{H4}^2 * P_M = 1,298 + 0,833^2 * 2,41 = 2,971 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_5 = P_0 + K_{H5}^2 * P_M = 1,298 + 0 = 1,298 \text{ кВт}.$$

Средние потери за цикл, кВт,

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i * t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (1.7)$$

$$\Delta P_{cp} = \frac{2,594 * 13 + 3,708 * 7 + 5,582 * 9 + 2,971 * 13 + 1,298 * 8}{13 + 7 + 9 + 13 + 8} = 3,179 \text{ кВт}.$$

Проверка выбранного двигателя по нагреву заключается в проверке условия:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_H \quad (1.8)$$

$$3,179 \text{ кВт} < 3,708 \text{ кВт}.$$

В нашем случае условие выполняется.

1.4 Проверка на перегрузку при снижении напряжения

В заводских силовых электрических цепях допускается снижение напряжения на 10%. Естественно, что при таком снижении напряжения оборудование не должно терять работоспособность. В то же время известно, что момент на валу асинхронных двигателей снижается пропорционально квадрату напряжения. Поэтому выбранный двигатель должен быть проверен на перегрузочную способность при понижении напряжения. Иногда может быть и большее понижение напряжения.

Проверка сводится к проверке условия, что максимальный момент двигателя при снижении напряжения будет не меньше момента сопротивления на валу.

Должно выполняться условие

$$\frac{P_{max}}{P_H} \leq \left(\frac{1 - \Delta U}{100} \right)^2 * K_{max}, \quad (1.9)$$

где P_{max} – максимальная мощность по нагрузочной диаграмме, кВт,

ΔU – снижение напряжения, %, $\Delta U = 10\%$,

K_{max} – кратность максимального момента по каталогу.

$$\frac{22}{30} \leq \left(\frac{1 - 10}{100} \right)^2 * 2,5, \text{ или } 0,733 \leq 2,25 - \text{верно}.$$

Следовательно, двигатель сохраняет работоспособность при понижении напряжения в цеховой сети.

Таким образом, выбранный двигатель удовлетворяет всем поставленным условиям.

1.5 Расчет теплового состояния АД

Непосредственный расчет теплового режима электрической машины представляет собой сложную многофакторную задачу, решить которую возможно лишь при детальном конструктивном расчете. В данной работе рассмотрим этот процесс с качественной стороны, введя ряд допущений.

Одним из таких допущений будет представление АД однородным телом с равномерно распределенными внутри его объема источниками тепла, которыми являются потери. Процесс нагревания такого тела описывается уравнением:

$$\tau = \tau_{\text{нач}} + (\tau_{\text{уст}} - \tau_{\text{нач}}) * \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_n}}\right), \quad (1.10)$$

где $\tau_{\text{нач}}$ – начальное превышение температуры (в начале расчета $\tau_{\text{нач}} = 0$), °С,

T_n – постоянная времени нагревания,

$\tau_{\text{уст}}$ – установившееся превышение температуры.

Если принять установившееся превышение температуры в номинальном режиме равным допустимому для данного класса термостойкости изоляции, то для любого иного режима

$$\tau_{\text{уст}i} = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_n} * \tau_{\text{доп}}, \quad (1.11)$$

где $\tau_{\text{доп}}$ – допустимое превышение температуры, в данном случае

$\tau_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$,

ΔP_i – потери на i -й ступени нагрузки, кВт.

$$\tau_{\text{уст}1} = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_n} * \tau_{\text{доп}} = \frac{2,594}{3,708} * 80 = 55,964^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{уст}2} = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_n} * \tau_{\text{доп}} = \frac{3,708}{3,708} * 80 = 80^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{уст}3} = \frac{\Delta P_3}{\Delta P_n} * \tau_{\text{доп}} = \frac{5,582}{3,708} * 80 = 120,44^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{уст}4} = \frac{\Delta P_4}{\Delta P_n} * \tau_{\text{доп}} = \frac{2,971}{3,708} * 80 = 64,11^\circ\text{C},$$

$$\tau_{уст5} = \frac{\Delta P_5}{\Delta P_H} * \tau_{доп} = \frac{1,298}{3,708} * 80 = 28 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

За начальное превышение температуры каждой ступени, включая паузу, принимаем конечное превышение, рассчитанное в конце предыдущей ступени.

Реальные превышения температуры, $^\circ\text{C}$:

в течение первого цикла –

$$\tau_{11} = 0 + (55,964 - 0) * \left(1 - e^{-\frac{13}{30}}\right) = 19,68 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{12} = 19,68 + (80 - 19,68) * \left(1 - e^{-\frac{7}{30}}\right) = 32,233 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{13} = 32,233 + (120,444 - 32,233) * \left(1 - e^{-\frac{9}{30}}\right) = 55,096 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{14} = 55,096 + (64,11 - 55,096) * \left(1 - e^{-\frac{13}{30}}\right) = 58,266 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{15} = 58,266 + (28 - 58,266) * \left(1 - e^{-\frac{8}{30}}\right) = 51,182 \text{ } ^\circ\text{C};$$

в течение второго цикла –

$$\tau_{21} = 51,182 + (55,964 - 51,182) * \left(1 - e^{-\frac{13}{30}}\right) = 52,864 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{22} = 52,864 + (80 - 52,864) * \left(1 - e^{-\frac{7}{30}}\right) = 58,511 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{23} = 58,511 + (120,444 - 58,511) * \left(1 - e^{-\frac{9}{30}}\right) = 74,563 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{24} = 74,563 + (64,11 - 74,563) * \left(1 - e^{-\frac{13}{30}}\right) = 70,888 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{25} = 70,888 + (28 - 70,888) * \left(1 - e^{-\frac{8}{30}}\right) = 60,849 \text{ } ^\circ\text{C};$$

в течение третьего цикла –

$$\tau_{31} = 60,849 + (55,964 - 60,849) * \left(1 - e^{-\frac{13}{30}}\right) = 59,131 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{32} = 59,131 + (80 - 59,131) * \left(1 - e^{-\frac{7}{30}}\right) = 63,474 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{33} = 63,474 + (120,444 - 63,474) * \left(1 - e^{-\frac{9}{30}}\right) = 78,24 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{34} = 78,24 + (64,11 - 78,24) * \left(1 - e^{-\frac{13}{30}}\right) = 73,271 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{35} = 73,271 + (28 - 73,271) * \left(1 - e^{-\frac{8}{30}}\right) = 62,675 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Как видно, превышения температуры после третьего цикла остаются практически неизменными, т.е. тепловой режим двигателя достиг установившегося состояния.

$$\tau_{у.ср} = \frac{\Delta P_{ср}}{\Delta P_H} * \tau_{доп} \tag{1.12}$$

$$\tau_{y, \text{cp}} = \frac{3.179}{3.708} * 80 = 68,58$$

$$\tau_{\text{cp}} = \tau_{y, \text{cp}} * \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}}\right) \quad (1.13)$$

$$\tau_{\text{cp}1} = 68,58 * \left(1 - e^{-\frac{20}{30}}\right) = 33,34 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{cp}2} = 68,58 * \left(1 - e^{-\frac{40}{30}}\right) = 50,49 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{cp}3} = 68,58 * \left(1 - e^{-\frac{60}{30}}\right) = 59,29 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{cp}4} = 68,58 * \left(1 - e^{-\frac{80}{30}}\right) = 63,81 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{cp}5} = 68,58 * \left(1 - e^{-\frac{100}{30}}\right) = 66,13 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{cp}6} = 68,58 * \left(1 - e^{-\frac{160}{30}}\right) = 68,24 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\tau_{\text{cp}7} = 68,58 * \left(1 - e^{-\frac{200}{30}}\right) = 68,49 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

1.6 Расчет механических характеристик

Механическими характеристиками АД называют зависимости $M = f(s)$ и $n = f(M)$.

Аналитические выражения данных характеристик достаточно сложны, требуют знания многих параметров АД и для практических целей используются редко. Более удобной является так называемая формула Клосса, вполне удовлетворительно описывающая реальную характеристику в пределах изменения скольжения от 0 до критического S_k . Вторая часть характеристики, рассчитанная по формуле Клосса, существенно отличается от реальной. Однако в этой части асинхронные двигатели не работают, и практического значения для анализа задач электропривода она не представляет.

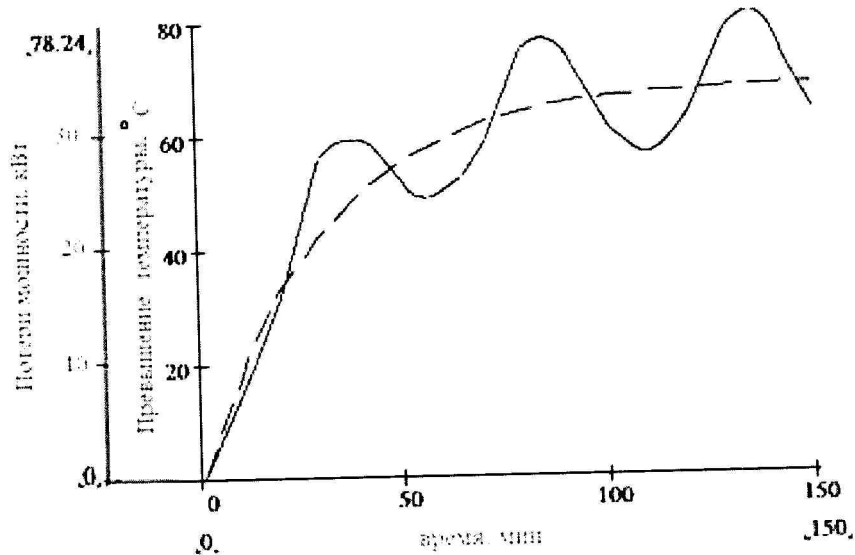


Рис. 1.1 – Диаграмма потерь и кривые нагрева

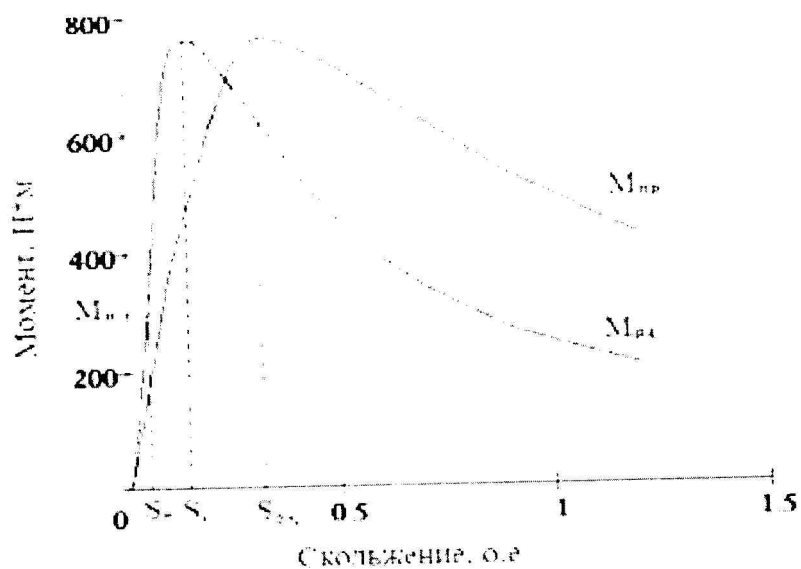
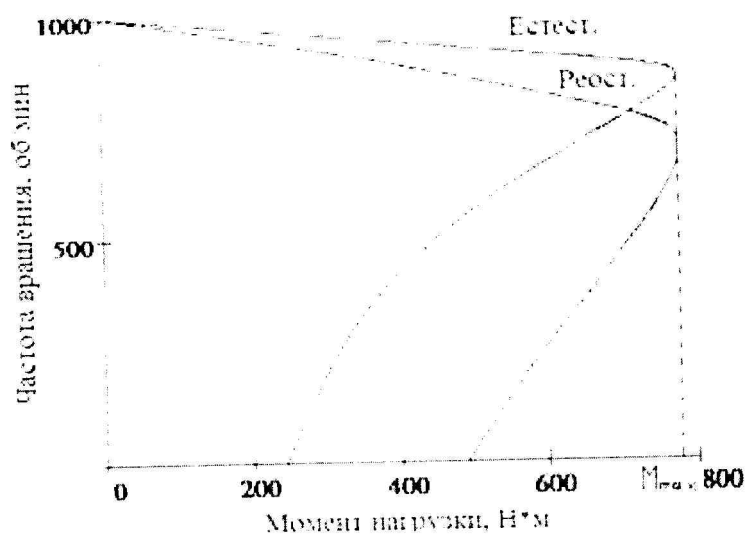


Рис. 1.2 – Механическая характеристика $M = f(s)$

Рис. 1.3 – Механическая характеристика $n = f(M_e)$



Для расчета естественной механической характеристики находим:
– номинальную частоту вращения, об/мин,

$$n_H = n_1 * (1 - S_H), \quad (1.14)$$

где n_1 – синхронная частота вращения, об/мин,
 S_H – номинальное скольжение по каталогу, о.е.

$$n_H = 1000 * (1 - 0,035) = 965 \text{ об/мин};$$

– номинальный момент, Н·м,

$$M_H = 9550 * \frac{P_H}{n_H}, \quad (1.15)$$

где P_H – номинальная мощность,

$$M_H = 9550 * \frac{30000}{965} = 296,8911 \text{ Н} * \text{м};$$

– критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту,

$$S_K = S_H * (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}), \quad (1.16)$$

где S_H – номинальное скольжение,
 K_M – кратность максимального момента.

$$S_K = 0,035 * (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,168;$$

– максимальный момент, Н·м,

$$M_{max} = K_M * M_H, \quad (1.17)$$

$$M_{max} = 2,5 * 296,891 = 742,228 \text{ Н} * \text{м}.$$

Задавшись величиной S от 0 до 1,2, можно рассчитать зависимость $M = f(s)$, которую затем легко перевести в координаты $n = f(M)$ по формуле:

$$n_H = n_1 * (1 - S) \quad (1.18)$$

Расчет механической характеристики производим по упрощенной формуле Клосса, Н·м,

$$M = \frac{2 * K_M * M_H}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}, \quad (1.19)$$

где K_M – коэффициент (кратность) максимального момента, определяющий перегрузочную способность двигателя,

S – текущее значение скольжения,

S_k – критическое скольжение,

M_H – номинальный момент на валу двигателя, Н·м.

При отсутствии резисторов в цепи ротора имеем естественные характеристики.

Результаты расчета приведены в таблице 1.3, характеристики показаны на рисунках 1.1 – 1.3.

Таблица 1.3 – Механические характеристики выбранного АД

S	0	0,035	0,1	0,168	0,2	0,376	0,4	0,8	1,0	1,2
n, об/мин	1000	960	900	832	800	624	600	200	0	0
$M_{\text{ест}}$		233,81	653,0	641,58	730,9	514,91	529,3	298,1	242,1	203,5
$M_{\text{реост}}$		121,35	368,93	485,94	615,7	645,25	740,78	571,2	488,8	423,3

Введение добавочного сопротивления в цепь ротора приводит к увеличению критического скольжения, величина максимального момента при этом не изменяется. Иными словами, механическая характеристика смещается вниз, а $M = f(s)$ – вправо. Тем самым при постоянном моменте сопротивления M_c частота вращения несколько снижается.

При реостатной характеристике частота вращения ротора, при заданном $\Delta n = 4,5\%$, об/мин,

$$n_{\text{р.н}} = n_H * \left(1 - \frac{\Delta n}{100}\right), \quad (1.20)$$

$$n_{\text{р.н}} = 965 * \left(1 - \frac{4,5}{100}\right) = 921,575 \text{ об/мин,}$$

скольжение, соответствующее данной частоте вращения,

$$S_{\text{р.н}} = \frac{n_1 - n_{\text{р.н}}}{n_1}, \quad (1.21)$$

$$S_{p.н} = \frac{1000 - 921,575}{1000} = 0,078$$

Сопротивление ротора выбранного двигателя, Ом,

$$r_p = \frac{U_p}{\sqrt{3} \cdot I_p} \cdot S_{п.н}, \quad (1.22)$$

$$r_p = \frac{140}{\sqrt{3} \cdot 150} \cdot 0,035 = 0,019 \text{ Ом},$$

тогда необходимое добавочное сопротивление, Ом,

$$R_{доб} = r_p \cdot \left(\frac{S_{п.н}}{S_{н}} - 1 \right), \quad (1.23)$$

$$R_{доб} = 0,019 \cdot \left(\frac{0,078}{0,035} - 1 \right) = 0,023 \text{ Ом}.$$

Критическое скольжение на реостатной характеристике,

$$S_{p.к} = S_{к} \cdot \frac{S_{п.н}}{S_{н}} = \left(S_{к} \cdot \frac{R_{доб}}{r_p} + 1 \right), \quad (1.24)$$

$$S_{p.к} = 0,168 \cdot \frac{0,023}{0,019} = 0,376.$$

1.7 Расчет резисторов пускового реостата

Пусковые диаграммы строим по моментам M_1 и M_2 .

По заданию пуск двигателя производится при $M_c = 0$. Выбираем пиковый момент, Н*м,

$$M_1 = 0,75 \cdot M_{max}, \quad (1.25)$$

$$M_1 = 0,75 \cdot 742,228 = 519,56 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По условию задания число пусковых ступеней $z = 2$, тогда переключающий момент, Н*м,

$$M_2 = M_1 \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_{н}} \cdot S_{н}}, \quad (1.26)$$

$$M_2 = 519,56 \cdot \sqrt{\frac{519,56}{296,891} \cdot 0,035} = 128,584 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

или $M_2 = 0,36 \cdot M_{н}$, что вполне допустимо при пуске в режиме х.х.

По найденным моментам построена пусковая диаграмма (рис. 1.4), из которой получаем соотношение отрезков: $ab-cd$ и $bc-cd$.

Следовательно, сопротивление секций пускового реостата, Ом,

$$r_1 = r_p \cdot \frac{ab}{cd}; \quad r_2 = r_p \cdot \frac{bc}{cd} \quad (1.27)$$

$$r_1 = 0,019 \cdot 4,04 = 0,232 \text{ Ом,}$$

$$r_2 = 0,019 \cdot 3 = 0,057 \text{ Ом.}$$

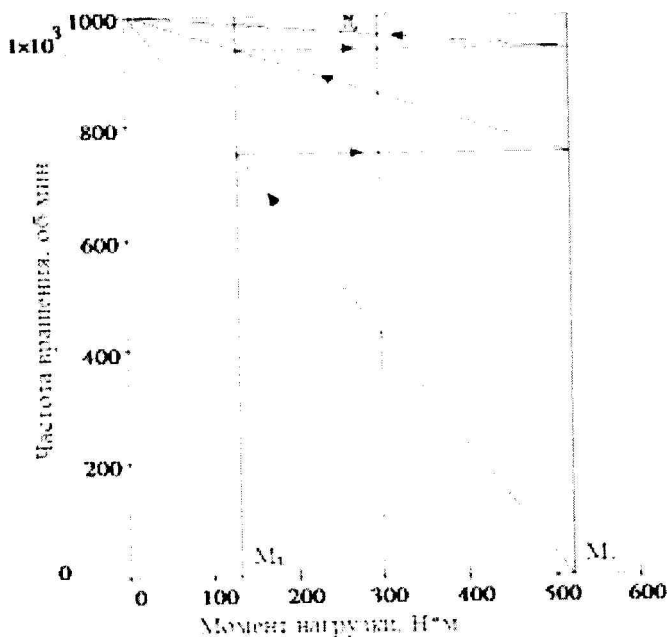


Рис.1.4 Пусковая диаграмма двигателя

1.8 Расчет электрических потерь при пуске двигателя

Электрические потери при пуске асинхронных двигателей состоят из потерь в роторной цепи, определяемых запасом кинетической энергии, которую приобретает привод к концу пуска, и потерь в статорной цепи, зависящих от соотношения активных сопротивлений статорной и роторной цепей.

Незначительными постоянными потерями в процессе пуска и влиянием намагничивающего тока можно пренебречь.

Для расчета электрических потерь необходимо предварительно определить скольжения при переходе с одной характеристики на другую. По пусковой диаграмме (рис. 1.4) находим, что первое переключение должно быть при частоте вращения 958 об/мин, второе — 1304 об/мин, следовательно по уравнениям 1.28 скольжение соответствующее ей частоте —

$$S_{n1} = 1 - \frac{n_{5n1}}{n_1}, \quad S_{n2} = 1 - \frac{n_{5n2}}{n_1} \quad (1.28)$$

$$S_{n1} = 1 - \frac{752,513}{1000} = 0,247,$$

$$S_{n2} = 1 - \frac{(752.513+186.237)}{1000} = 0,061.$$

Угловая синхронная частота вращения, рад/с,

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}, \quad (1.29)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000}{60} = 104,72 \text{ рад/с.}$$

В выражениях (1.30) – (1.32) присутствует соотношение сопротивлений $\frac{R_1}{r_p}$, и если принять $R_1 = r_p$, то оно остается тем же в результате замены этого равенства на $R_1 = r_p$. В дальнейшем расчеты ведутся по реальным значениям сопротивлений ротора.

Потери электрической энергии, Дж, при реостатном пуске, принимая

$$R_1 = r_p$$

на первой реостатной характеристике

$$A_{n1} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} (1 - S_{n1}^2) * \left(1 + \frac{R_1}{r_p + r_1' + r_2'}\right), \quad (1.30)$$

$$A_{n1} = \frac{0,55 \cdot 104,72^2}{2} (1 - 0,247^2) * \left(1 + \frac{0,019}{0,019 + 0,232 + 0,057}\right) = 3004 \text{ Дж,}$$

на второй реостатной характеристике

$$A_{n2} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} (S_{n1}^2 - S_{n2}^2) * \left(1 + \frac{R_1}{r_p + r_2'}\right), \quad (1.31)$$

$$A_{n2} = \frac{0,55 \cdot 104,72^2}{2} (0,247^2 - 0,061^2) * \left(1 + \frac{0,019}{0,019 + 0,057}\right) = 216,313 \text{ Дж,}$$

на естественной характеристике

$$A_{n3} = J * \omega_0^2 * S_{n2}^2, \quad (1.32)$$

$$A_{n3} = 0,55 * 104,72^2 * 0,061^2 = 22,627 \text{ Дж.}$$

Суммарные электрические потери при реостатном пуске, Дж,

$$A_{n,p} = A_{n1} + A_{n2} + A_{n3}, \quad (1.33)$$

$$A_{n,p} = 3004 + 216,313 + 22,627 = 3243 \text{ Дж,}$$

в практических единицах, кВт*ч,

$$A_{н.р} = \frac{3243}{3.6} = 900,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для сравнения потери в случае прямого пуска, Дж,

$$A_{н.н} = J \cdot \omega_0^2. \quad (1.34)$$

$$A_{нз} = 0,55 \cdot 104,72^2 = 6031,5 \text{ Дж},$$

в практических единицах, кВт*ч,

$$A_{н.р} = \frac{6031.5}{3.6} = 1675 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Как видно, потери в случае прямого пуска больше, нежели при реостатном. Иначе говоря, при реостатном пуске экономится 775 кВт*ч.

1 Управление пуском асинхронных двигателей

1.1 Общие положения

Управление электроприводом заключается в осуществлении пуска, регулировании скорости, торможения, реверсирования, а также поддержании режима работы привода в соответствии с требованиями технологического процесса.

Современные электроприводы для автоматических линий и механизмов обычно строятся с применением релейно-контакторной аппаратуры, на которую возлагаются функции включения питания (подсоединение к сети) силовых блоков и блоков управления, защиты и ввода первоначальных и конечных команд в систему управления приводом. Но наряду с электроприводами, выполняющими сложные функции, в ряде случаев содержащими микропроцессоры или программные устройства управления, существует большое количество электроприводов, на которые возлагаются относительно простые функции. Это обычно нерегулируемые или регулируемые ступенчато в небольшом диапазоне электроприводы с невысоким быстродействием. В задачу систем управления такими электроприводами чаще всего входит организация пуска, торможения, перехода с одной ступени на другую, реверса и осуществление этих операций в определенной последовательности во времени или по командам от рабочей машины, завершившей очередную технологическую операцию. Причем необязательно, чтобы система управления выполняла все эти функции: набор функций зависит от требований к приводу.

Автоматизация упрощает обслуживание механизмов, дает возможность осуществить дистанционное управление электроприводами. Последнее особенно важно там, где нельзя управлять двигателями в непосредственной близости по условиям территориального расположения машин или в связи с особенностями технологического процесса.

Для автоматического управления электроприводами применяются различные аппараты: контакторы, автоматы, регуляторы, реле, кнопочные станции, путевые выключатели, бесконтактные логические элементы, а так же разного рода вспомогательные электрические аппараты и машины. Каждый из этих аппаратов состоит из ряда элементов: электромагнитной системы, создающей необходимое тяговое усилие; главных и вспомогательных контактов и т.д. С помощью проводов отдельные аппараты и их элементы электрически соединяются в общую систему, призванную осуществлять заданные операции в определенной последовательности.

В системах цепи делятся на две категории: цепи главного тока и вспомогательные. К первым относятся цепи двигателей и генераторов. Вспомогательные цепи включают в себя цепи управления, где присоединяются катушки контактов и реле, контактные реле, вспомогательные контакты контакторов и другие элементы аппаратов. Кроме того, к вспомогательным относятся цепи защиты, сигнализации и цепи, связанные со специальными блокировками между отдельными электроприводами.

Принципиальная схема содержит условные графические изображения элементов всех аппаратов и машин, которые располагаются на схеме так, чтобы её было удобно читать, а не по действительному пространственному расположению элементов, т.е. отдельные токоведущие элементы аппаратов и машин показаны на схеме в электрической цепи вне зависимости от кинематической или конструктивной связи этих элементов. Каждому аппарату в схеме присваивается буквенное обозначение, соответствующее функции данного аппарата.

В схемах предусмотрены различные способы защиты двигателей от перегрузки и короткого замыкания, от резкого снижения питающего напряжения и др.

1.2 Управление пуском АД с короткозамкнутым ротором

Схема управления асинхронным двигателем с использованием магнитного пускателя (рис. 2.1) включает в себя магнитный пускатель, состоящий из контактора *КМ* и двух встроенных в него тепловых реле защиты *КК*. Такая схема обеспечивает прямой (без ограничения тока и момента) пуск АД, отключение его от сети, а также защиту от коротких замыканий (предохранители *FA*) и перегрузки (тепловые реле *КК*).

Для пуска двигателя замыкается выключатель QF и нажимается кнопка пуска $SB1$. При этом получает питание катушка контактора KM , который, включившись, своими главными силовыми контактами в цепи статора подключает двигатель к источнику питания, а вспомогательным контактом шунтирует кнопку $SB1$. Происходит разбег асинхронного двигателя по его естественной характеристике. При нажатии кнопки остановки $SB2$ контактор KM теряет питание и отключает АД от сети. Начинается процесс торможения асинхронного двигателя выбегом под действием момента нагрузки на его валу.

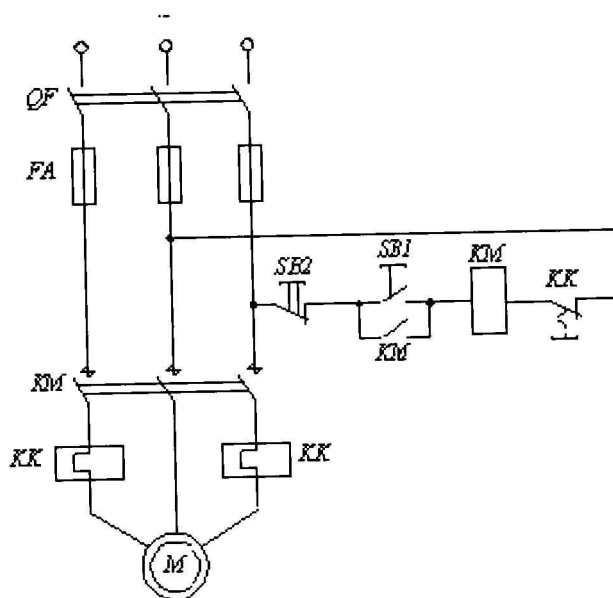


Рис . 2.1 – Принципиальная схема управления пуском АД с короткозамкнутым ротором

1.3. Управление пуском АД с фазным ротором в функции времени

Упрощенная схема управления пуском АД с фазным ротором в функции времени в две пусковые ступени приведена на рис. 2.2. В данной схеме применены реле времени $KT1$ и $KT2$, имеющие свои контакты $KT1$ и $KT2$ в цепях силовых контакторов $KM2$ и $KM3$. Контакты $KT1$ и $KT2$ работают на замыкание после потери питания катушек реле $KT1$ и $KT2$ с задержкой по времени.

При замыкании рубильника Q напряжение сразу подается на катушки реле времени $KT1$ и $KT2$ через замкнутые контакты $KM1$ и $KM2$. Тем самым контакты реле $KT1$ и $KT2$ оказываются разомкнутыми. После нажатия кнопки пуска $SB1$ получает питание катушка контактора $KM1$, в результате чего подается напряжение на статор двигателя, блокируется кнопка $SB1$ и теряет питание катушка реле времени $KT1$. Начинается отсчет времени пуска со всеми пусковыми резисторами. После выдержки времени замыкается контакт $KT1$, получает питание силовой контактор $KM2$, что приводит к выводу из цепи ротора резистора $R_{д1}$ и к потере питания реле времени $KT2$. По окончании времени уста-

новки катушки реле $KT2$ замыкается контакт реле $KT2$, получает питание силовой контактор $KM3$, шунтируется оставшийся резистор $R_{Д2}$, двигатель переходит на естественную характеристику. Все время автоматического пуска складывается из двух установок реле времени $KT1$ и $KT2$ и времени разгона двигателя по естественной характеристике.

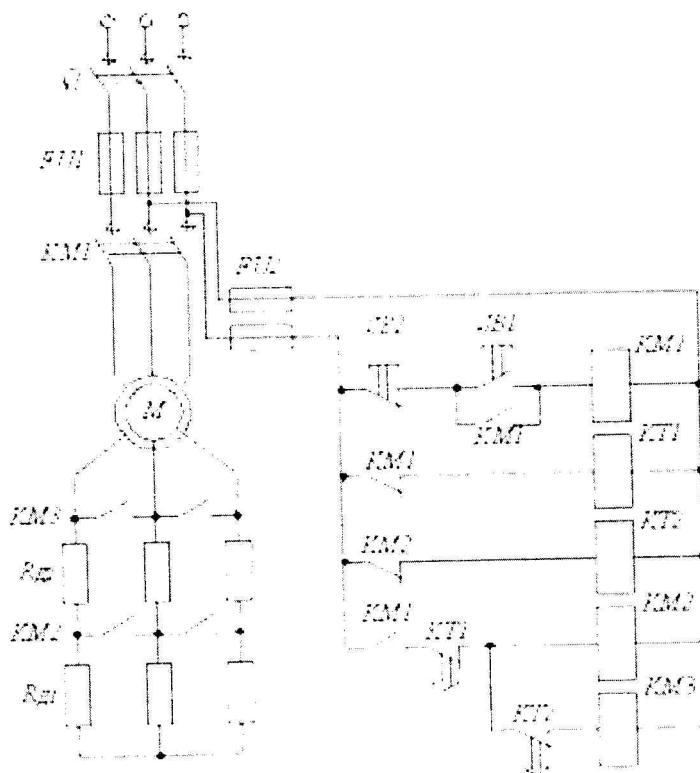


Рис. 2.2 – Принципиальная схема пуском АД с фазным ротором

Защита АД предусмотрена такая же, как в схеме, приведенной на рис.2.2. Нажатием кнопки остановки SB2 двигатель отключается от сети, при этом катушка контактора $KM1$ теряет питание и замыкающие контакторы его $KM1$ размыкают цепь статора.

Основным элементом в схеме управления реверсом (рис. 3.1) является реверсивный магнитный пускатель, который включает в себя два линейных контактора ($KM1$ и $KM2$) и два тепловых реле защиты (KK). Такая схема обеспечивает прямой пуск и реверс асинхронного двигателя, а также торможение АД противовключением при ручном (неавтоматическом) управлении.

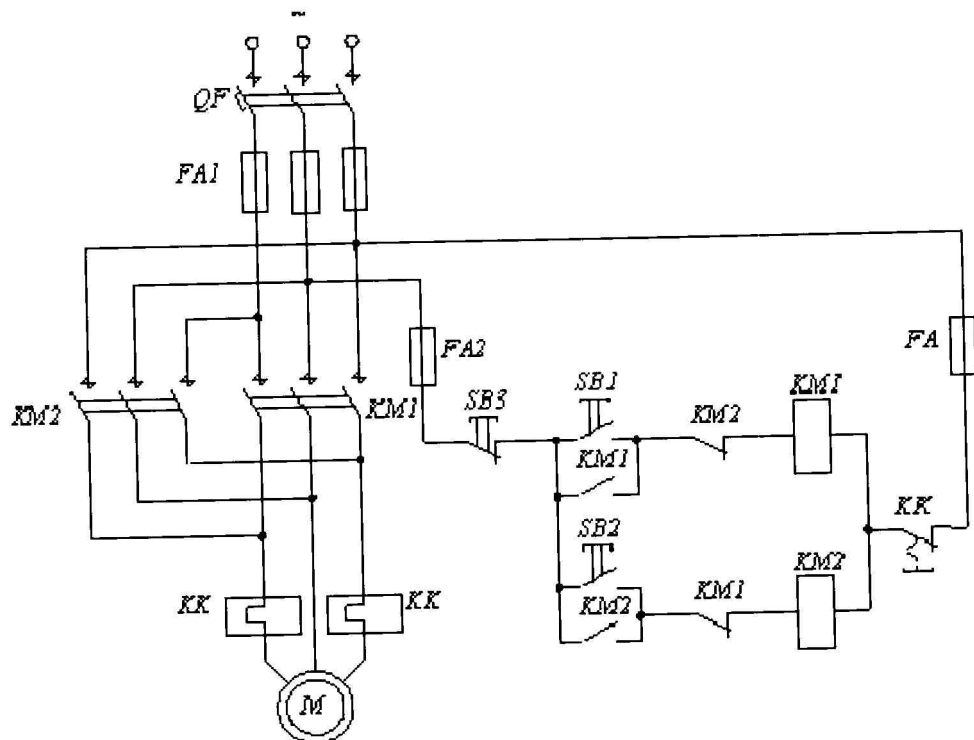


Рис. 3.1 – Принципиальная схема управления реверсом АД с короткозамкнутым ротором

В схеме (рис. 3.1) предусмотрена также защита от перегрузок АД (реле *КК*) и коротких замыканий в цепях статора (автоматический выключатель *QF*) и управления (предохранители *FA*). Кроме того, в ней обеспечивается и нулевая защита от исчезновения (снижения) напряжения сети (контакторы *КМ1* и *КМ2*).

Пуск двигателя в условном направлении “Вперед” или “Назад” осуществляется нажатием соответственно кнопки *SB1* или *SB2*, что приводит к срабатыванию контактора *КМ1* или *КМ2* и подключению АД к сети (при включенном автоматическом выключателе *QF*).

Для обеспечения реверса или торможения двигателя сначала нажимается кнопка *SB3*, что приводит к отключению включенного до тех пор контактора (например, *КМ1*), а затем – кнопка *SB2*, что приводит к включению контактора *КМ2* и подаче на АД напряжения питания с другим чередованием фаз. После этого магнитное поле двигателя изменяет свое направление вращения и начинается процесс реверса, состоящий из двух этапов – торможения противовключением и разбега в противоположную сторону.

В случае необходимости только затормозить двигатель при достижении им нулевой скорости следует вновь нажать кнопку *SB3*, что приведет к отключению его от сети и возвращению схемы в исходное положение. Если кнопку *SB3* не нажимать, последует разбег АД в другую сторону, т. е. его реверс.

Во избежание короткого замыкания в цепи статора, которое может возникнуть в результате одновременного ошибочного нажатия кнопок *SB1* и *SB2*, в реверсивных магнитных пускателях иногда предусматривается специальная механическая блокировка – рычажная система, которая предотвращает одновременное включение двух контакторов. В дополнение к механической в такой схеме используется типовая электрическая блокировка, применяемая в реверсивных схемах управления, которая заключается в перекрестном включении размыкающих контактов аппарата *KM1* в цепь катушки аппарата *KM2*, и наоборот.

Отметим, что повышению надежности работы ЭП и удобства его в эксплуатации способствует использование в схеме управления воздушного автоматического выключателя *QF*, который исключает возможность работы привода при обрыве одной фазы и при однофазном коротком замыкании, как это может иметь место при использовании предохранителей.

Заключение

1. По заданной нагрузочной диаграмме электропривода определили эквивалентную мощность и выбрали асинхронный двигатель 4АК225М6УЗ с фазным ротором, при чем учли условие $P_H \geq P_э$. Проверили выбранный двигатель на нагрев по методу средних потерь. Условие $\Delta P_{ср} \leq \Delta P_H$ – выполняется. А также проверили на перегрузочную способность при снижении напряжения в сети. Условие $\frac{P_{max}}{P_H} < \left(\frac{1-\Delta U}{100}\right)^2 * K_{max}$ – выполняется.

2. Произвели расчет теплового режима выбранного двигателя по заданной нагрузочной диаграмме, до установившегося теплового состояния двигатель прошел 4 цикла.

3. Определили сопротивление добавочного резистора, который необходимо включить в цепь ротора выбранного двигателя для снижения частоты вращения на заданную величину при номинальном моменте сопротивления.

4. Построили естественную и реостатную механические характеристики двигателя.

5. Рассчитали сопротивления секций пускового резистора и потери электрической энергии при реостатном и прямом пуске. Пришли к выводу, что при прямом пуске расходуется в 1,5-2 раза больше энергии.

6. Начертили и представили краткое описание схемы управления пуском и реверсом асинхронных двигателей.

Библиографический список

1. Справочник по электрическим машинам / Под Ред. И.П. Копылова, Б. К. Клокова, М.: Энергоатомиздат, 1998.
2. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер, М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек, Л.: Энергия, 1978.
4. Касаткин А. С. Электротехника / А.С. Касаткин, М. В. Немцов, М.: Высшая школа, 2000.
5. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко, М.: Высшая школа, 1991.
6. Асинхронные двигатели в системах электропривода: методические указания к выполнению курсовой работы / Авилов В. Г., Беляев В. П., Савельева Е. Н., Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2005. 44с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Как рассчитывается требуемая мощность двигателя и как осуществляется его выбор?
2. Как определяется момент сопротивления электропривода на каждой ступени нагрузки?
3. При каких условиях осуществляется пуск и торможение двигателя? Нагрузочная диаграмма электропривода.
4. Как рассчитывается естественная механическая характеристика двигателя при заданных паспортных данных?
5. Как рассчитываются сопротивления ступеней пускового реостата и резистора торможения?
6. Какими должны быть допустимые значения тока и электромагнитного момента при пуске и торможении двигателя, а также значение момента переключения ступеней пускового реостата?
7. Какие электрические схемы силовых цепей двигателей используются для их пуска и торможения?
8. Как выполняется расчет переходных режимов электроприводов?
9. Как рассчитываются электромеханические постоянные времени и время переходного процесса на каждой ступени пуска и при торможении электропривода с ДПТ НВ?
10. Как осуществляется проверка двигателя по нагреву при повторно-кратковременном режиме работы электропривода?
11. Как рассчитываются потери и расход энергии в переходных и установившихся режимах работы электропривода?
12. Как осуществляется защита двигателя и управление его пуском, торможением и остановкой?

4.1. Содержание (дидактика) дисциплины

Раздел 1. «Основные понятия и определения электропривода».

- 1.1. Назначения электроприводов. Структура электропривода.
- 1.2. История развития электропривода и его роль в современных технологиях.
- 1.3. Классификация электроприводов.

Раздел 2. «Механика электропривода».

- 2.1. Уравнение движения электропривода.
- 2.2. Расчетные схемы механической части электропривода. Одномассовая схема.
- 2.3. Многомассовые расчетные схемы.
- 2.4. Установившееся движение электропривода и его устойчивость.
- 2.5. Неустановившееся движение электропривода при постоянном динамическом моменте.
- 2.6. Неустановившееся движение при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа.
- 2.7. Неустановившееся движение электропривода при произвольном динамическом моменте.

Раздел 3. «Регулирование координат электропривода».

- 3.1. Регулирование скорости.
- 3.2. Регулирование момента и тока.
- 3.3. Регулирование положения.
- 3.4. Структуры электропривода, применяемые при регулировании координат.

Раздел 4. «Электроприводы с двигателями постоянного тока».

- 4.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
- 4.2. Энергетические режимы работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
- 4.3. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи якоря.
- 4.4. Расчет регулировочных резисторов в цепи якоря
- 4.5. Регулирование тока и момента при пуске, торможении и реверсе
- 4.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением магнитного потока.
- 4.7. Регулирование координат электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения якоря. Система «преобразователь - двигатель».
- 4.8. Переходные процессы в разомкнутой системе «преобразователь - двигатель».
- 4.9. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения в схеме с шунтированием якоря.
- 4.10. Регулирование координат в системе «источник тока - двигатель».
- 4.11. Импульсное регулирование скорости электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.
- 4.12. Схема включения, статические характеристики и режимы работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
- 4.13. Регулирование координат электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения с помощью резисторов. Расчет регулировочных резисторов.

4.14. Регулирование скорости двигателя с последовательным возбуждением изменением магнитного потока, напряжения и шунтированием резистором якоря.

4.15. Торможение электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения.

4.16. Свойства и характеристики электропривода с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения.

Раздел 5. «Электроприводы с асинхронным двигателем».

5.1. Схема включения, статические характеристики и режимы работы асинхронного двигателя.

5.2. Регулирование координат асинхронного двигателя с помощью резисторов.

5.3. Расчет регулировочных резисторов.

5.4. Регулирование координат электропривода с асинхронным двигателем изменением напряжения.

5.5. Повышение экономичности работы асинхронного электропривода с помощью регулятора напряжения.

5.6. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения.

5.7. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов.

5.8. Регулирование скорости асинхронного двигателя в каскадных схемах его включения.

5.9. Импульсный способ регулирования координат электропривода с асинхронным двигателем.

5.10. Торможение асинхронного двигателя.

5.11. Особенности переходных процессов в асинхронном двигателе и их формирование.

5.12. Электропривод с однофазным асинхронным двигателем.

5.13. Электропривод с линейным асинхронным двигателем.

Раздел 6. «Электроприводы с синхронным двигателем».

6.1. Схема включения, статические характеристики и режимы работы синхронного двигателя.

6.2. Пуск синхронного двигателя.

6.3. Регулирование скорости и торможение синхронного двигателя.

6.4. Синхронный двигатель как компенсатор реактивной мощности.

6.5. Особенности переходных процессов электропривода с синхронным двигателем.

6.6. Электропривод с вентильным двигателем.

6.7. Электропривод с шаговым двигателем.

6.8. Вентильно-индукторный электропривод.

Раздел 7. «Взаимосвязанный электропривод».

7.1. Электропривод с механическим соединением валов двигателей.

7.2. Электропривод с механическим дифференциалом.

7.3. Электропривод с электрическим валом.

Раздел 8. «Энергетика электропривода».

8.1. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода.

8.2. Потери мощности и энергии в переходных режимах электропривода.

8.3. Коэффициент полезного действия электропривода.

8.4. Коэффициент мощности электропривода.

8.5. Энергосбережение средствами электропривода.

Раздел 9. «Выбор и проверка двигателей и резисторов».

- 9.1. Расчет мощности и выбор двигателей.
- 9.2. Проверка двигателей по нагреву прямым методом.
- 9.3. Проверка двигателей по нагреву косвенными методами.
- 9.4. Выбор и проверка по нагреву резисторов в силовых цепях двигателей.

Раздел 10. «Разомкнутые схемы управления электропривода».

- 10.1. Электрические аппараты ручного управления.
- 10.2. Электрические аппараты дистанционного управления.
- 10.3. Датчики времени, скорости, тока и положения.
- 10.4. Виды и аппараты защиты, блокировки и сигнализации в электроприводе.
- 10.5. Бесконтактные логические элементы.
- 10.6. Электромагнитные муфты и тормозные устройства.
- 10.7. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с двигателями постоянного тока.
- 10.8. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с асинхронными двигателями.
- 10.9. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с синхронными двигателями.
- 10.10. Выбор аппаратов коммутации, управления и защиты.

Раздел 11. «Замкнутые схемы управления электропривода».

- 11.1. Схемы замкнутых структур электропривода.
- 11.2. Технические средства замкнутых схем управления электропривода.
- 11.3. Аналоговые элементы и устройства управления электропривода.
- 11.4. Дискретные элементы и устройства управления электропривода.
- 11.5. Датчики скорости и положения, применяющиеся в замкнутых схемах управления.
- 11.6. Микропроцессорные средства управления электропривода.
- 11.7. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями постоянного тока.
- 11.8. Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями переменного тока.
- 11.9. Комплектные и интегрированные электроприводы.
- 11.10. Следящий электропривод.
- 11.11. Электропривод с программным управлением.
- 11.12. Электропривод с адаптивным управлением.