

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"КОСТРОМСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ"
"Костромская государственная сельскохозяйственная академия"

Электроэнергетический факультет
Очная форма обучения

Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия
Направленность (профиль) Электрооборудование и электротехнологии

Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

КУРСОВАЯ РАБОТА

138
28.02.2020


по дисциплине «Специальный электропривод»

на тему: «Выбор мощности и регулирование координат электропривода»

26вариант

Выполнил:


Студент 743
группа


подпись

Акулова Т.К.

Проверил:

Преподаватель зав. кафедрой
должность


подпись

Васильков А.А.

Караваево 2020

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"КОСТРОМСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ"

Электроэнергетический факультет

Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия
Направленность (профиль) Электрооборудование и электротехнологии

Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КУРСОВОЙ РАБОТЕ
по дисциплине «Специальный электропривод»

Автор работы



Подпись

дата

Т.К. Акулова

Группа 743

Руководитель работы

Подпись

дата

Васильков А.А.

Работа защищена

09.04.2020

Дата

отлично (87)

оценка прописью

Караваево 2020

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"КОСТРОМСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ"

Кафедра электроснабжение и эксплуатация электрооборудования

РЕЦЕНЗИЯ

на курсовую работу студента Акулова Тинатин
на тему: по дисциплине Специальный электропривод «Выбор мощности и регулирование координат электропривода» вариант № 26

Курсовая работа имеет логическое построение, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников и приложений
Замечания:

✓ Стр. 5 ... На осях графиках необходимо указывать единицы и величины измерения и посмотреть аналогичное замечание по всему тексту работы.

✗ Стр. 13 ... Расчет ступеней не закончен условия завершения указано не верно $s_{ii} \approx s_e$, точность поднять до 0,01, после уточнения ступеней исправить и другие связанные с ошибкой расчеты в первой главе.

✗ Стр. 14 На графике «Пусковой диаграммы» показать как менялся момент двигателя при пуске.

✗ Стр. 23 На графике «Подъема и спуска груза» показать точки равновесия спуска и подъема.

✗ Стр. 24, 26 Схему проверить на наличие одноимённых обозначений элементов, уточнить индексы

✗ Стр. 29 Расчет ^{даны} выпален не верно.

Стр. 38 Уточнить диапазон интеграла в расчета потерь энергии в роторе (пересчитывать не обязательно но $S_1 \neq 0 \dots S_1 = ?$)

Заключение. Рецензируемая работа отвечает (не отвечает) предъявляемым требованиям и

- допускается к защите
- допускается к защите с доработкой

- нуждается в доработке

Рецензент: к.э.н. _____

/ Васильков А.А.

“ ” 03 2020 г.

Содержание

Часть 1. Расчет и выбор асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Расчет пусковых резисторов. Схемы автоматического регулирования.	4
Часть 2. Расчет и выбор асинхронных электродвигателей при повторно- кратковременном режиме работы. Определение времени разбега и допустимого числа включений электродвигателя	298
Часть 3. Расчет и выбор асинхронного электродвигателя для	
кратковременного режима работы. Определение температуры нагрева	40
Часть 4. Расчет характеристик при частотном регулировании угловой	
скорости асинхронного электродвигателя при изменении напряжения	53
Список использованной литературы.....	60

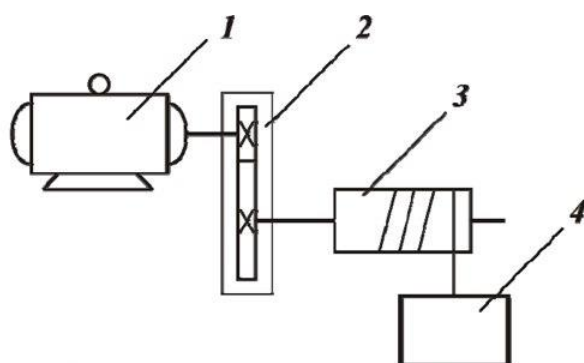
					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

Часть 1. Расчет и выбор асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Расчет пусковых резисторов. Схемы автоматического регулирования.

1.1. Для подъемного механизма, представленного кинематической схемой на рис. 1 выбирать асинхронный электродвигатель из серии 4АК и редуктор.

Исходные данные

Вариант	Масса, т, кг	Скорость груза, v, м/с	Диаметр барабана, D, м	Момент инерции, J, кг·м ²	КПД η _{пер}	ПВ, %
26	1500	1,4	0,39	7	0,8	28



1 – электродвигатель; 2 – редуктор;
3 – барабан; 4 – груз.

Рисунок 1. Кинематическая схема подъемного механизма

Для правильного выбора мощности электродвигателя подъемного механизма следует построить нагрузочную диаграмму (см. рисунок 2), для

чего необходимо определить мощность сопротивления P_c , время работы t_p и время паузы $t_{п}$ по выражениям:

$$P_c = \frac{m \cdot g \cdot v}{\eta_{п}} \quad (1.1)$$

КР.41.702.01. ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Акулова Т.		
Провер.		Васильков А.А.		
Реценз.				
Н. Контр.				
Утверд.				
Расчет и выбор асинхронного электродвигателя с фазным ротором				
		Лит.	Лист	Листов
		4	60	60
ФГБОУ ВО КГСХА				

где m – масса груза, кг;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

v – скорость груза, м/с;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи.

$$P_c = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 1,4}{0,8} = 25751 \text{ Вт}$$

Определяем время работы t_p :

$$t_p = t_{\text{ц}} \cdot \frac{\text{ПВ}\%}{100} \quad (1.2)$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла ($t_{\text{ц}} = 10$ мин);

ПВ% – продолжительность включения, %.

$$t_p = 10 \cdot \frac{28}{100} = 2,8 \text{ мин}$$

Рассчитаем время паузы $t_{\text{п}}$:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{ц}} - t_p \quad (1.3)$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла ($t_{\text{ц}} = 10$ мин);

t_p – время работы, мин.

$$t_{\text{п}} = 10 - 2,8 = 7,2 \text{ мин}$$

Построим нагрузочную диаграмму:

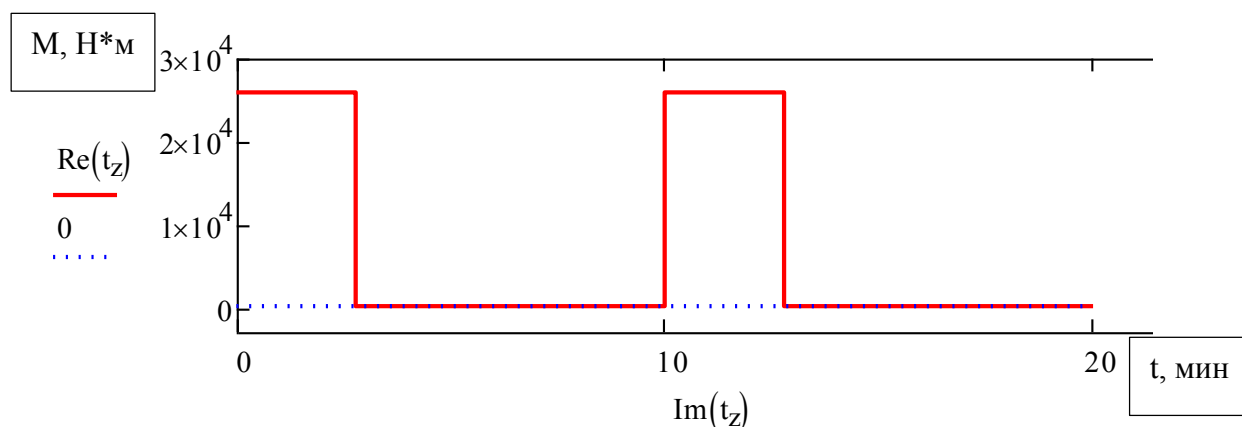


Рисунок 2. Нагрузочная диаграмма подъемного механизма

Определяем по нагрузочной диаграмме эквивалентную мощность $P_{\text{эк}}$ из выражения:

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{P_c^2 \cdot t_p}{t_p + \beta_0 \cdot t_0}} \quad (1.4)$$

где β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения двигателя в период паузы ($\beta_0 = 0,5$)

$t_{\text{ц}}$ – время цикла ($t_{\text{ц}} = 10$ мин);

t_p – время работы, мин;

t_0 – время паузы, мин;

P_c – мощность сопротивления, Вт.

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{25751^2 \cdot 2,8}{2,8 + 0,5 \cdot 7,2}} = 17032 \text{ Вт}$$

Мощность электродвигателя выбирается равной или большей эквивалентной мощности:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{эк}} \quad (1.5)$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;

$P_{\text{эк}}$ – эквивалентная мощность в нагрузочной диаграмме.

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{эк}}$$

$$18000 > 17032$$

Выбираем двигатель марки 4АК180М4УЗ исходя из условия $P_{\text{н}} \geq P_{\text{эк}}$ со следующими данными [1]:

Номинальная мощность, $P_{\text{н}}$ (кВт)	18
КПД,(%)	89
$\cos \varphi$	0,88
Номинальное скольжение, $S_{\text{н}}$ (%)	3,5
Отношение моментов, $M_{\text{кр}}/M_{\text{н}} = \mu_{\text{кр}}$	4

Ток ротора, I_p (А)	38
Номинальное линейное напряжение, U_n (В)	380
Номинальное напряжение ротора, $U_{p(}$ (В)	295
Масса двигателя, m (кг)	250
Номинальная частота вращения магнитного поля статора, n_0 (об/мин)	1500

Для обеспечения надежного пуска двигателя, с учетом снижения напряжения ($\Delta U = 7,5\%$), получают пусковой момент и проверяют двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{\Pi} \geq M_{ТР} + 0,25 \cdot M_H \quad (1.6)$$

где $M_{ТР}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

M_{Π} – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

M_H – номинальный момент электродвигателя, Н · м;

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске:

$$k_u = 1 - \frac{\Delta U}{100} \quad (1.7)$$

$$k_u = 1 - \frac{0,75}{100} = 0,925$$

По паспортным данным двигателя определяют номинальный и критический моменты. У асинхронных двигателей с фазным ротором в паспортных данных отсутствует кратность пускового момента, поэтому пусковой момент принимают равным критическому, с учетом снижения напряжения.

$$M_{кр} = M_{\Pi} \quad (1.8)$$

Синхронная скорость вращения электродвигателя задана ($n_0 = 1500$ об/мин). Исходя из этого, определяется синхронная частота вращения (ω_0):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} \quad (1.9)$$

где n_0 – синхронная скорость вращения электродвигателя.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с}$$

Номинальная частота вращения:

$$\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - S_n) \quad (1.10)$$

где ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с ;

S_n – номинальное скольжение двигателя, %.

$$\omega_n = 157 \cdot (1 - 0,035) = 151,5 \text{ рад/с}$$

Номинальный и критический моменты на естественной характеристике определяются выражениями:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (1.11)$$

где P_n – номинальная мощность выбранного электродвигателя, Вт

ω_n – номинальная частота вращения, рад/с.

$$M_n = \frac{18000}{151,505} = 118,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{кр} = \mu_k \cdot M_n \quad (1.12)$$

где μ_k – кратность критического момента;

M_n – номинальный момент электродвигателя.

$$M_{кр} = 4 \cdot 118,7 = 475 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для определения момента трогания необходимо определить момент сопротивления и соответствующее ему скольжение на механической характеристике электродвигателя:

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

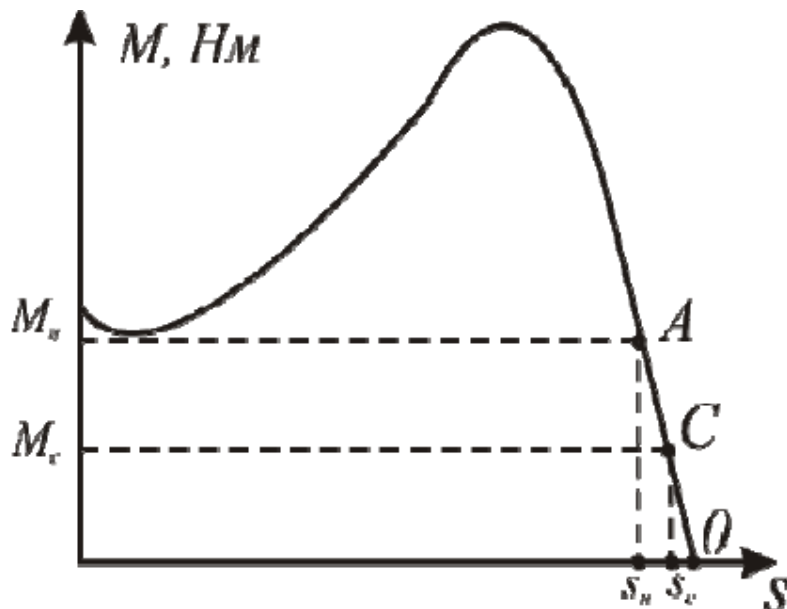


Рисунок 3. Механическая характеристика двигателя

Из подобия треугольников (S_nAO) и (S_cCO) следует:

$$\frac{S_c}{S_n} = \frac{M_c}{M_n} \quad (1.13)$$

где S_c – скольжение при моменте сопротивления;

S_n – скольжение при номинальном моменте сопротивления;

M_c – момент сопротивления электродвигателя, Н · м;

M_n – номинальный момент электродвигателя, Н · м.

Находим момент сопротивления (M_c):

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_c} = \frac{P_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} \quad (1.14)$$

где P_c – мощность сопротивления, кВт;

ω_c – частота вращения с моментом сопротивления, рад/с;

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с ;

S_c – скольжение при моменте сопротивления.

Принимаем допущение, что номинальная частота вращения электродвигателя приблизительно равна частоте вращения с моментом сопротивления:

$$\omega_n = \omega_c \quad (1.15)$$

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_c} = \frac{P_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} = \frac{25751}{151,505} = 169,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Принимаем допущение, что момент сопротивления при запуске электродвигателя равен моменту трогания, т.к. для пуска ему необходимо преодолеть сопротивление:

$$M_c = M_{\text{тр}} \quad (1.16)$$

Проверяем двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{\text{п}} \geq M_{\text{тр}} + 0,25 \cdot M_{\text{н}}$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

$M_{\text{п}}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м.

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжения при пуске.

$$0,925^2 \cdot 475 > 169,8 + 0,25 \cdot 118,808$$

$$406,4 > 205,759$$

Равенство верно, значит двигатель марки 4АК180М4У3 выбран верно.

Для выбора редуктора определяют скорость барабана при заданной скорости подъема груза (ω_6) и передаточное отношение (i):

$$\omega_6 = \frac{2 \cdot v}{D_6} \quad (1.17)$$

где v – скорость груза, м/с;

D_6 – диаметр барабана, м.

$$\omega_6 = \frac{2 \cdot 1,4}{0,39} = 7,179 \text{ рад/с}$$

$$i = \frac{\omega_c}{\omega_6} \quad (1.18)$$

где ω_c – частота вращения с моментом сопротивления, рад/с;

ω_6 – скорость барабана при заданной скорости подъема груза, рад/с.

$$i = \frac{151,505}{7,179} = 21,1$$

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Максимальный крутящий момент редуктора находят по формуле:

$$M_{max} = m \cdot g \cdot \frac{D_6}{2} \quad (1.19)$$

где m – масса груза, кг;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

D_6 – диаметр барабана, м.

$$M_{max} = 1500 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,39}{2} = 2866,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

По величине крутящего момента выбирают редуктор, как правило, цилиндрический, так, чтобы максимальный момент двигателя и передаточное отношение находились в пределах момента и отношения выбранного редуктора.

Выбираем редуктор типа: РМ-650-40-12-ЦЦ У2 [4]

где РМ - тип редуктора (редуктор механический);

650 – межосевое расстояние на тихоходной ступени, мм;

40 – номинальное передаточное число;

12 – вариант сборки;

ЦЦ – вариант исполнения конца входного и выходного вала соответственно;

У2 – климатическое исполнение и категория размещения, для умеренного климата.

1.2. Рассчитать ступени пускового резистора и определить пусковой ток в обмотках статора и ротора

При расчете пусковых резисторов в цепи обмотки ротора требуется определить полное их сопротивление, число ступеней и сопротивление каждой ступени. Для расчета пусковых резисторов необходимо определить пусковой момент двигателя $M_{п1}$, момент при отключении ступеней сопротивления $M_{п2}$, и скольжение s_e , которое соответствует моменту $M_{п1}$ на естественной характеристике.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

Определяем пусковой момент электродвигателя:

$$M_{п1} = k_u^2 \cdot M_{кр} \quad (1.20)$$

$$M_{п2} = (1,1..1,3) \cdot M_c \quad (1.21)$$

где $M_c = M_{тр}$

$$M_{п1} = 0,925^2 \cdot 475 = 406 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{п2} = 1,3 \cdot 169,8 = 220,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Скольжение s_e при моменте $M_{п1}$ определяется из упрощённой формулы Клосса:

$$s_e = s_{ke} \cdot \left(\frac{M_{ке}}{M_{п1}} - \sqrt{\left(\frac{M_{ке}}{M_{п1}} \right)^2 - 1} \right) \quad (1.22)$$

где s_{ke} – критическое скольжение на естественной характеристике;

$M_{ке}$ – критический момент на естественной характеристике, Н · м;

$M_{п1}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

$$s_{ke} = s_n \cdot \left(\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right)$$

где s_n – скольжение при номинальном моменте сопротивления;

μ_k – кратность критического момента;

$$s_{ke} = 0,035 \cdot \left(4 + \sqrt{4^2 - 1} \right) = 0,276$$

$$s_e = 0,276 \cdot \left(\frac{475}{406} - \sqrt{\left(\frac{475}{406} \right)^2 - 1} \right) = 0,0,25$$

Пуск двигателя происходит на первой искусственной характеристике, у которой $M_{ку1} = M_{п1}$ и $S_{ку1} = 1$. Когда момент двигателя достигает значения $M_{п2}$, первая ступень пусковых резисторов отключается, а соответствующее этому моменту скольжение на первой искусственной характеристике определится как:

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

$$S_{u1} = S_{ku1} \cdot \left(\frac{M_{п1}}{M_{п2}} - \sqrt{\left(\frac{M_{п1}}{M_{п2}}\right)^2 - 1} \right) \quad (1.24)$$

где $M_{п1}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

$M_{п2}$ – момент при отключении ступеней сопротивления, Н · м.

$$S_{u1} = 1 \cdot \left(\frac{406}{220,7} - \sqrt{\left(\frac{406}{220,7}\right)^2 - 1} \right) = 0,22$$

После отключения первой ступени электродвигатель должен выходить на вторую искусственную характеристику при $M_{ku2} = M_{п1}$ и $S_{ku2} = S_{u1}$. Тогда при отключении второй ступени сопротивления при моменте $M_{п2}$ скольжение определится как:

$$S_{u2} = S_{ku2} \cdot \left(\frac{M_{п1}}{M_{п2}} - \sqrt{\left(\frac{M_{п1}}{M_{п2}}\right)^2 - 1} \right) \quad (1.25)$$

где $M_{п1}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

$M_{п2}$ – момент при отключении ступеней сопротивления, Н · м.

$$S_{u2} = 0,277 \cdot \left(\frac{406}{220,7} - \sqrt{\left(\frac{406}{220,7}\right)^2 - 1} \right) = 0,23$$

Аналогичным образом находятся все скольжения на искусственных характеристиках при моменте $M_{п2}$ до выполнения условия:

$$S_{un} \leq S_e \quad (1.26)$$

где S_{un} – скольжение на последней искусственной характеристике при $M_{п2}$

$$0,23 < 0,25$$

Условие соответствует, значит расчет закончен.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

По данным строят естественную механическую и искусственные характеристики по упрощенной формуле Клосса, задаваясь скольжением (S) от 0 до 1.

$$M_{e(s)} = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}, \quad M_{u1(s)} = \frac{M_k \cdot k_u^2}{\frac{S}{S_{ku1}} + \frac{S_{ku1}}{S}} \quad (1.28)$$

где S_k – критическое скольжение электродвигателя;

M_k – критический момент электродвигателя, Н · м.

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске;

S – скольжение электродвигателя;

S_{ku1} – критическое скольжение электродвигателя при первой искусственной характеристике;

S_{ku2} – критическое скольжение электродвигателя при второй искусственной характеристике.

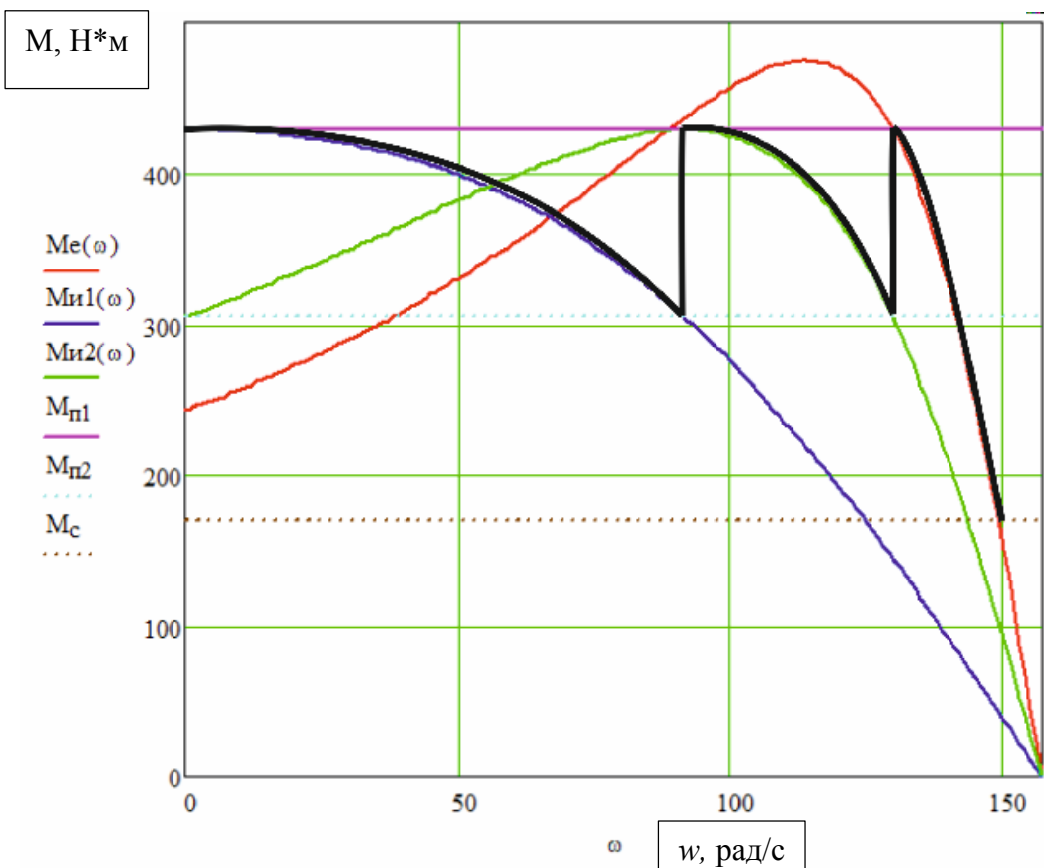


Рисунок 4. График зависимость изменения момента двигателя при пуске до выхода в точку равновесия

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

1.3. Определение сопротивления, которые требуется ввести в цепь ротора, чтобы груз двигался на подъем и на спуск со скоростью, равной половине заданного значения. Построение искусственные механические характеристики. Определение токов в обмотках ротора и статора при указанных режимах работы

Полное добавочное сопротивление цепи ротора R_d подбирается так, чтобы $M_{п1}$ был равен критическому моменту с учетом снижения напряжения, но при $\omega = 0$.

$$R_{d1} = r_2 \cdot \left(\frac{1}{S_{ke}} - 1 \right) \quad (1.29)$$

где r_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом;
 S_{ke} – критическое скольжение на естественной характеристике.

Добавочные сопротивления в цепи ротора для соответствующих искусственных характеристик определяются по выражению:

$$R_{di} = r_2 \cdot \left(\frac{S_{ki}}{S_{ke}} - 1 \right) \quad (1.30)$$

где r_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом;
 S_{ki} – критическое скольжение на i – характеристике;
 S_{ke} – критическое скольжение на естественной характеристике.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора определяется по формуле:

$$r_2 = \frac{U_{2н} \cdot S_n}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} \quad (1.31)$$

где $U_{2н}$ – линейное напряжение неподвижного ротора, В;
 $I_{2н}$ – номинальный ток ротора, А;
 S_n – номинальное скольжение выбранного электродвигателя.

$$r_2 = \frac{295 \cdot 0,035}{\sqrt{3} \cdot 38} = 0,157 \text{ Ом}$$

$$R_{d1} = 0,157 \cdot \left(\frac{1}{0,276} - 1 \right) = 0,414 \text{ Ом}$$

Пусковой ток в обмотках статора можно определить из уравнения закона Ома для Г-образной схемы замещения двигателя:

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$I_{п1} = \frac{U_{\phi 1}}{Z} \quad (1.32)$$

где $U_{\phi 1}$ – фазное напряжение обмотки статора, В;

Z – полное сопротивление по схеме замещения при к.з., Ом:

$$Z = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2' + R'_{д1}}{s}\right)^2 + x_k^2} \quad (1.33)$$

где r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом;

r_2' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом;

$R'_{д1}$ – добавочное сопротивление в цепи ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

x_k – индуктивное сопротивление при к.з., Ом.

Входящие в активные сопротивления фаз обмоток статора r_1 и ротора r_2' определяются из выражений:

$$r_1 = \frac{\Delta P_{вн} - M_H \cdot (\omega_0 - \omega_H)}{3 \cdot I_{1H}^2}, \quad (1.34)$$

где I_{1H} – номинальный ток обмотки статора, А;

$\Delta P_{вн}$ – переменные потери двигателя при номинальной мощности, Вт;

M_H – номинальный момент, Н · м;

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с;

ω_H – номинальная частота вращения, рад/с.

$$\Delta P_{вн} = P_H \cdot \frac{1 - \eta_H}{\eta_H \cdot (1 + \alpha)} \quad (1.35)$$

где α – коэффициент потерь, для асинхронных двигателей принимается

$\alpha = 0,5 \dots 0,7$;

η_H – номинальный КПД электродвигателя;

P_H – номинальная мощность электродвигателя, Вт.

$$\Delta P_{вн} = 18000 \cdot \frac{1 - 0,89}{0,89 \cdot (1 + 0,5)} = 1483 \text{ Вт}$$

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

$$r_1 = \frac{1483 - 118,7 \cdot (157 - 151,505)}{3 \cdot 34,919^2} = 0,227 \text{ Ом}$$

Определяем приведённое к обмотке статора активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$r_2' = \frac{\Delta P_{vH}}{3 \cdot I_{1H}^2} - r_1 \quad (1.36)$$

$$r_2' = \frac{1483}{3 \cdot 34,919^2} - 0,227 = 0,128 \text{ Ом}$$

Определяем индуктивное сопротивление при к.з, Ом:

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot M_k \cdot \omega_0} - r_1\right)^2 - r_1^2} \quad (1.37)$$

где M_k – критический момент электродвигателя, Н · м;

$U_{1\phi}$ – фазное напряжение обмотки статора, В;

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с;

r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot 475} - 0,227\right)^2 - 0,227^2} = 0,711 \text{ Ом}$$

Приведенное к обмотке статора добавочное сопротивление определяется из выражения:

$$R'_{д1} = R_{д1} \cdot K_{тр}^2, \quad (1.38)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трансформации;

$R_{д1}$ – полное добавочное сопротивление цепи ротора, Ом.

$$K_{тр} = \frac{U_p}{U_l} \quad (1.39)$$

где U_p – номинальное напряжение ротора, В;

U_l – номинальное линейное напряжение ротора, В.

$$K_{тр} = \frac{295}{380} = 0,776$$

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

$$R'_{д1} = 0,412 \cdot 0,776^2 = 0,248 \text{ Ом}$$

Теперь определяем полное сопротивление по схеме замещения:

$$Z = \sqrt{\left(0,227 + \frac{0,128 + 0,248}{1}\right)^2 + 0,711^2} = 0,932 \text{ Ом}$$

Пусковой ток ротора определяется по соотношению:

$$\frac{I_{1н}}{I_{2н}} = \frac{I_{1п}}{I_{2п}} \quad (1.40)$$

где $I_{1н}$ – номинальный ток обмотки статора, А;

$I_{2н}$ – номинальный ток обмотки ротора, А;

$I_{1п}$ – пусковой ток обмотки статора, А;

$I_{2п}$ – пусковой ток ротора, А.

Номинальный ток статора определим по формуле:

$$I_{1н} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad (1.41)$$

где P_n – номинальная мощность электродвигателя, Вт.

η – номинальный КПД электродвигателя;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности выбранного электродвигателя ($\cos\varphi = 0,88$)

$$I_{1н} = \frac{18000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,88} = 34,919 \text{ А}$$

Определяем пусковой ток в обмотке статора:

$$I_{1п} = \frac{U_{1ф}}{Z} \quad (1.42)$$

где $U_{1ф}$ – фазное напряжение обмотки статора, В;

Z – полное сопротивление по схеме замещения, Ом

$$I_{1п} = \frac{220}{0,932} = 236 \text{ А}$$

Определяем пусковой ток в обмотке ротора:

$$I_{2п} = \frac{I_{2н} \cdot I_{1п}}{I_{1н}} \quad (1.43)$$

где $I_{1н}$ – номинальный ток обмотки статора, А;

$I_{2н}$ – номинальный ток обмотки ротора, А;

$I_{1п}$ – пусковой ток обмотки статора, А;

$$I_{2п} = \frac{38 \cdot 236}{34,919} = 256,8 \text{ А}$$

Для определения добавочных сопротивлений в цепи ротора при подъеме и опускании груза с половинной скоростью необходимо вычислить соответствующие значения скольжений при моменте двигателя, равном M_c .

При подъеме груза с половинной скоростью скольжение определяется:

$$S_{с.под} = 0,5 \cdot (1 - S_{ce}), \quad (1.44)$$

где S_{ce} – скольжение на естественной характеристике при моменте равном моменту сопротивления

при опускании с половинной скоростью:

$$S_{с.сп} = 1,5 - 0,5 \cdot S_{ce}, \quad (1.44)$$

где S_{ce} – скольжение на естественной характеристике при моменте равном моменту сопротивления

Определим скольжение на естественной характеристике при моменте равном моменту сопротивления:

$$S_{ce} = S_{ке} \cdot \left(\frac{M_{ке}}{M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_{ке}}{M_c} \right)^2 - 1} \right) \quad (1.45)$$

где $s_{ке}$ – критическое скольжение на естественной характеристике;

$M_{ке}$ – критический момент на естественной характеристике, Н · м;

M_c – момент сопротивления, Н · м

$$S_{ce} = 0,276 \cdot \left(\frac{475}{169,8} - \sqrt{\left(\frac{475}{169,8} \right)^2 - 1} \right) = 0,051$$

$$S_{с.под} = 0,5 \cdot (1 - 0,051) = 0,475$$

$$S_{с.сп} = 1,5 - 0,5 \cdot 0,051 = 1,476$$

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Добавочное сопротивление при подъеме $R_{\text{под}}$ и опускании груза с половинной скоростью $R_{\text{сп}}$ определяется из выражений с использованием значений соответствующих скольжений из выражений:

$$R_{\text{под}} = r_2 \cdot \left(\frac{S_{\text{с.под}}}{S_{\text{се}}} - 1 \right) \quad (1.46)$$

где $S_{\text{с.под}}$ – скольжение при подъеме;

$S_{\text{се}}$ – скольжение на естественной характеристике при моменте равном моменту сопротивления;

r_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом.

$$R_{\text{под}} = 0,157 \cdot \left(\frac{0,525}{0,051} - 1 \right) = 1.3 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{сп}} = r_2 \cdot \left(\frac{S_{\text{с.сп}}}{S_{\text{се}}} - 1 \right) \quad (1.47)$$

где $S_{\text{с.сп}}$ – скольжение при спуске;

$S_{\text{се}}$ – скольжение на естественной характеристике при моменте равном моменту сопротивления;

r_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом.

$$R_{\text{сп}} = 0,157 \cdot \left(\frac{1,476}{0,051} - 1 \right) = 4.38 \text{ Ом}$$

Определяем полное сопротивление по схеме замещения при подъёме и отпуске груза при определённом сопротивлении:

$$Z_{\text{с.под}} = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2' + R_{\text{под}} \cdot K_{\text{тр}}^2}{S_{\text{с.под}}} \right)^2 + x_k^2} \quad (1.48)$$

где r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом;

r_2' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом;

$R_{\text{под}}$ – добавочное сопротивление при подъеме, Ом;

$K_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации;

$S_{\text{с.под}}$ – скольжение при подъеме;

x_k – индуктивное сопротивление при к.з., Ом.

						КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			20

$$Z_{с.под} = \sqrt{\left(0,227 + \frac{0,128 + 1,468 \cdot 0,776^2}{0,525}\right)^2 + 0,711^2} = 2.24 \text{ Ом}$$

$$Z_{с.сп} = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2' + R_{сп} \cdot K_{тр}^2}{S_{с.сп}}\right)^2 + x_k^2} \quad (1.49)$$

где r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом;

r_2' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом;

$R_{сп}$ – добавочное сопротивление при спуске, Ом;

$K_{тр}$ – коэффициент трансформации;

$S_{с.сп}$ – скольжение при спуске;

x_k – индуктивное сопротивление при к.з. , Ом.

$$Z_{с.сп} = \sqrt{\left(0,227 + \frac{0,128 + 4.381 \cdot 0,776^2}{1,474}\right)^2 + 0,744^2} = 2.049 \text{ Ом}$$

Определяем пусковой ток статора при подъёме и опускании груза с половинной скоростью:

$$I_{1с.под} = \frac{U_{1ф}}{Z_{с.под}}$$

$$I_{1с.сп} = \frac{U_{1ф}}{Z_{с.сп}} \quad (1.51)$$

$$I_{1с.под} = \frac{220}{2,24} = 98,2 \text{ А}$$

$$I_{1с.сп} = \frac{220}{2,049} = 107,36 \text{ А}$$

Теперь определяем пусковой ток ротора при подъёме и опускании груза с половинной скоростью из соотношения :

$$I_{2с.под} = \frac{I_{2н} \cdot I_{1с.под}}{I_{1н}} \quad (1.52)$$

										Лист
										21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

$$I_{2c.cп} = \frac{I_{2н} \cdot I_{1c.cп}}{I_{1н}} \quad (1.53)$$

$$I_{2c.под} = \frac{38 \cdot 98}{34,919} = 106,8 \text{ А}$$

$$I_{2c.cп} = \frac{38 \cdot 107,36}{34,919} = 116,8 \text{ А}$$

Построим нагрузочные диаграммы при спуске и подъеме с половинной скоростью.

Определяем критическое скольжение на искусственной характеристике подъема с половинной скоростью:

$$S_{к.под} = S_{c.под} \cdot \left(\frac{M_{ке}}{M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_{ке}}{M_c} \right)^2 - 1} \right) \quad (1.53)$$

Определяем критическое скольжение на искусственной характеристике спуска с половинной скоростью:

$$S_{к.cп} = S_{c.cп} \cdot \left(\frac{M_{ке}}{M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_{ке}}{M_c} \right)^2 - 1} \right) \quad (1.54)$$

$$S_{к.под} = 0,467 \cdot \left(\frac{475}{169,8} - \sqrt{\left(\frac{475}{169,8} \right)^2 - 1} \right) = 2,5$$

$$S_{к.cп} = 1,476 \cdot \left(\frac{475}{169,8} - \sqrt{\left(\frac{475}{169,8} \right)^2 - 1} \right) = 7,9$$

Зададим уравнения естественной характеристики, искусственной характеристики подъема и спуска:

$$M_{e(s)} = \frac{M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}, \quad M_{исп(s)} = \frac{M_k}{\frac{S}{S_{к.под}} + \frac{S_{к.под}}{S}}, \quad M_{ипод(s)} = \frac{M_k}{\frac{S}{S_{к.cп}} + \frac{S_{к.cп}}{S}}$$

где S_k – критическое скольжение электродвигателя;

M_k – критический момент электродвигателя, Н · м.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

S – скольжение электродвигателя;

$S_{к.под}$ – критическое скольжение на искусственной характеристике подъема;

$S_{к.сп}$ – критическое скольжение на искусственной характеристике спуска.

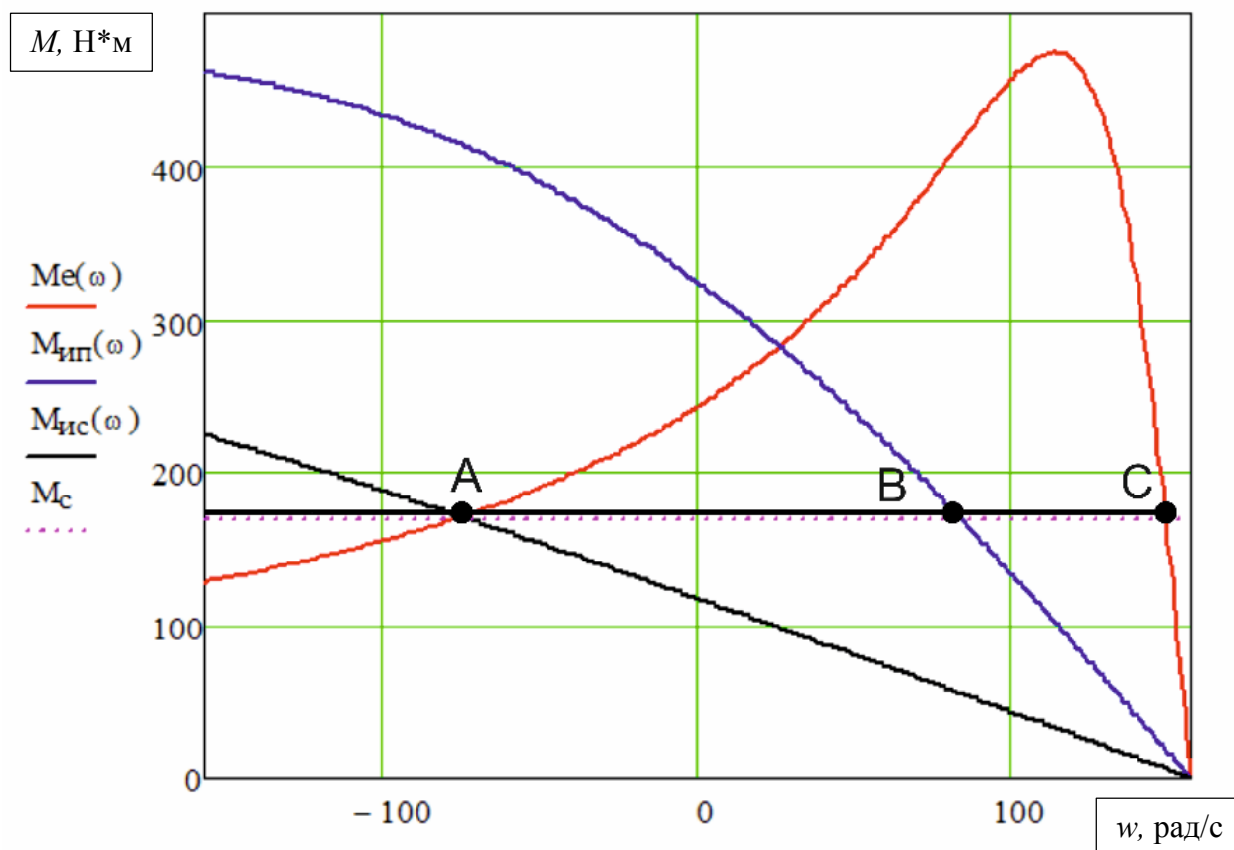


Рисунок 5. График механических характеристик при подъеме и спуске груза

Точка А – рабочая точка при спуске с половинной скоростью, режим противовключения.

Точка В – рабочая точка при подъеме с половинной скоростью, двигательный режим.

Точка С – рабочая точка на естественной механической характеристике, двигательный режим.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

1.4. Составить схемы автоматического управления пуском реверсивного и нереверсивного электропривода с тремя ступенями тока
 Составим схемы автоматического управления пуском реверсивного и нереверсивного электропривода с тремя ступенями скорости (в функции времени). Схема управления АД с фазным ротором, в цепь которого введены резисторы приведена на рисунке 6.

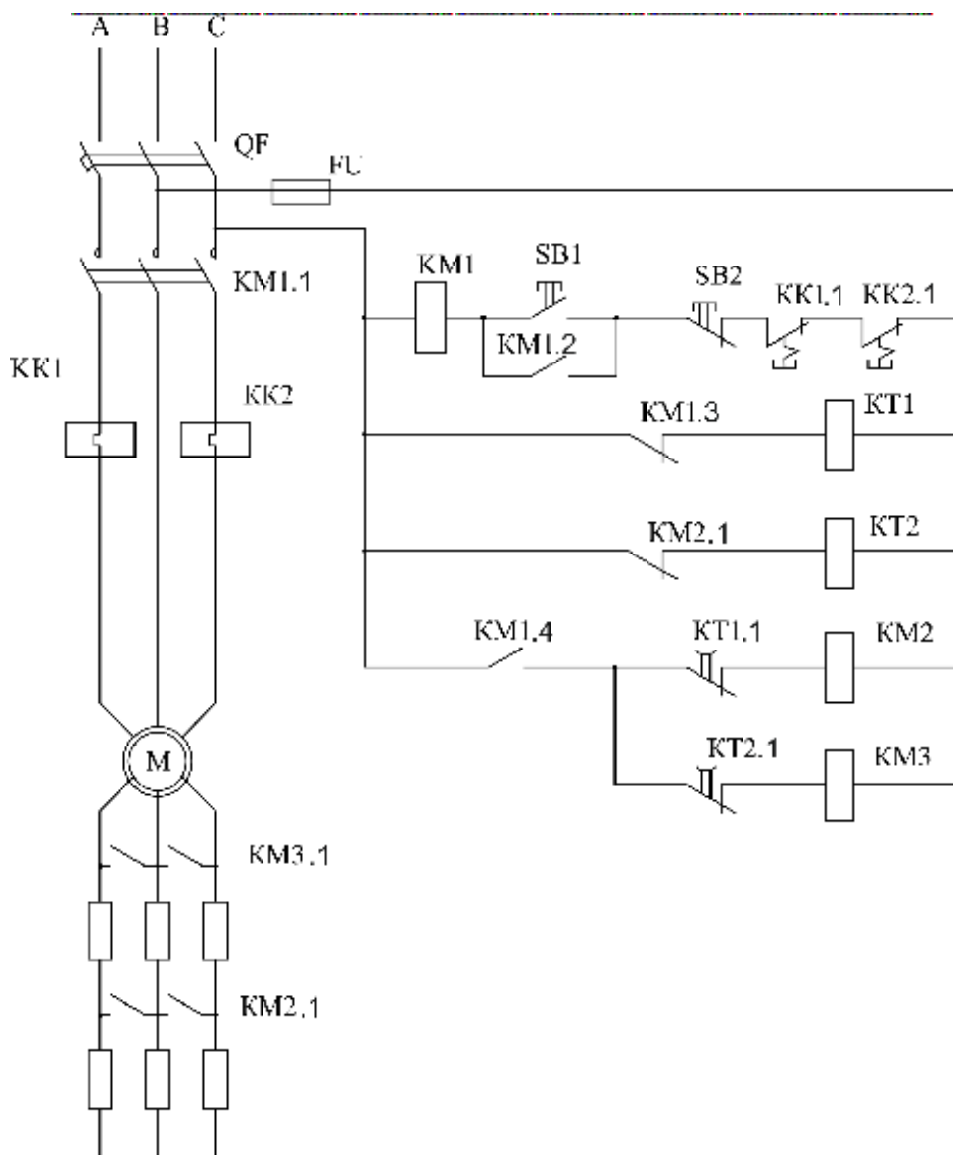


Рисунок 6. Схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции времени

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КР.41.702.01. ПЗ

Лист

24

Описание работы схемы (рис.6): При подаче напряжения на схему управления включением QF получают питание реле времени КТ1 и КТ2, которые разомкнут свой размыкающие контакты в цепях магнитных пускателей КМ2 и КМ3, схема готова к работе.

При нажатии кнопки «Пуск» (SB1) замкнется цепь магнитного пускателя КМ1, и будет подано напряжение на обмотку статора двигателя М; в обмотку ротора при этом включены все пусковые резисторы – начинается пуск привода на первой реостатной характеристике. При включении магнитного пускателя КМ1 один из его замыкающих вспомогательных контактов шунтирует кнопку SB1, и отпадает необходимость длительно удерживать ее в нажатом состоянии, а другой – размыкающий контакт прерывает цепь реле времени КТ1. Следует отметить, что размыкающий контакт КТ1 остается еще открытым; по истечении выдержки времени реле КТ1 его размыкающий контакт закроется. В результате этих переключений в схеме управления включится магнитный пускатель КМ2, и будет шунтирована первая пусковая ступень добавочных сопротивлений – двигатель с первой характеристики перейдет на вторую, разгоняясь до большей угловой скорости. Кроме того КМ2 разомкнет свой контакт в цепи реле времени КТ2. Начнется отсчет времени, на которое настроено реле КТ2 (соответственно времени пуска двигателя на последней реостатной характеристике), по окончании которого КТ2 замкнет свой контакт в цепи магнитного пускателя КМ3, который в свою очередь шунтирует вторую ступень добавочных сопротивлений, обмотка ротора М окажется замкнутой накоротко, и двигатель начнет разгоняться в соответствии с его естественной характеристикой.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

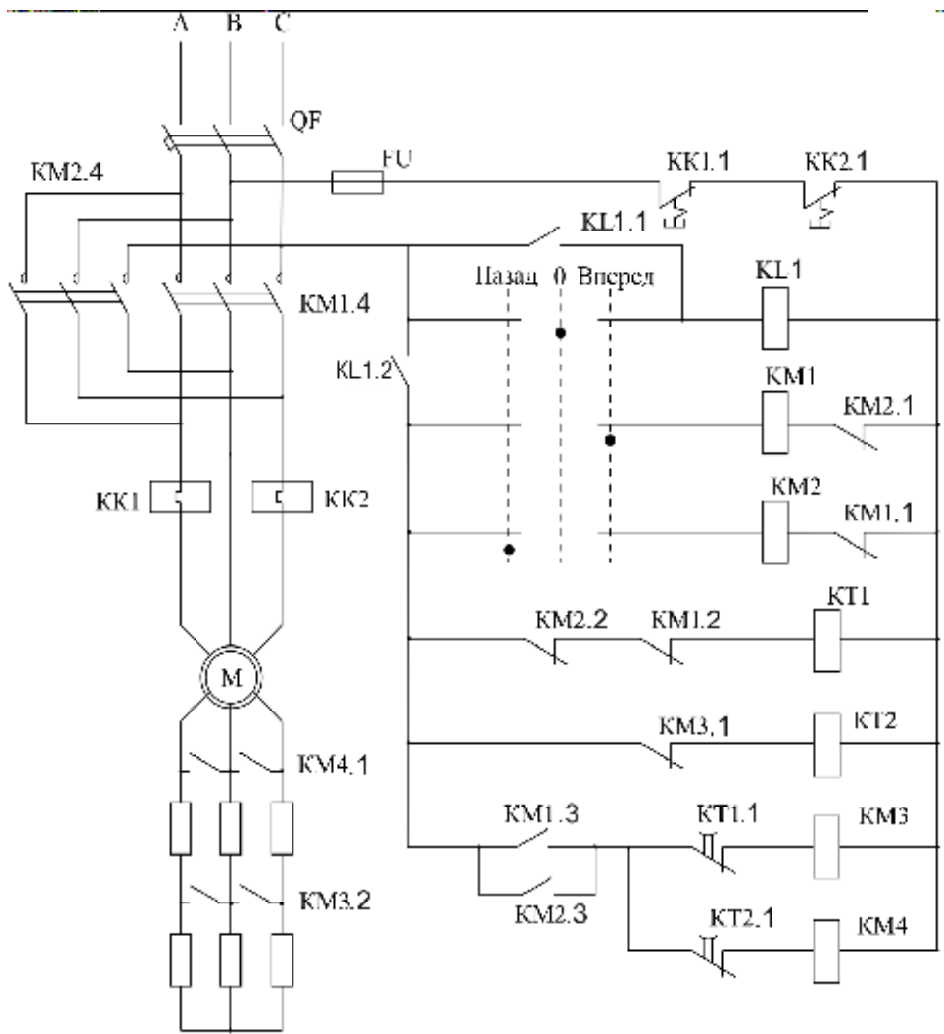


Рисунок 7. Схема автоматического управления пуском электродвигателя с использованием командоконтроллера в функции времени

Описание работы схемы (рис.7): При подаче напряжения на схему управления включением автомата QF, если командоконтроллер находится в исходном (нулевом) положении, получает питание реле напряжения KL, замыкающие контакты его замыкаются и подается напряжение на реле времени KT1 и KT2, которые размыкают свои контакты в цепи магнитных пускателей KM3 и KM4. Схема готова к работе.

Для пуска двигателя в одном направлении необходимо повернуть рукоятку командоконтроллера в одно из положений, например *Вперед*. В этом случае будет включен магнитный пускатель КМ1, который подает напряжение на обмотку статора двигателя; в обмотку ротора при этом включены все пусковые резисторы – начинается пуск привода на первой реостатной характеристике. Одновременно с этим КМ1 разомкнет свой контакт в цепи реле времени КТ1. Оно начнет отсчет времени, по окончании которого замкнет свой контакт в цепи магнитного пускателя КМ3, который в свою очередь шунтирует первую ступень добавочных сопротивлений - двигатель с первой характеристики перейдет на вторую, разгоняясь до большей угловой скорости. Кроме того КМ3 разомкнет цепь реле времени КТ2. Оно начнет отсчет времени, по окончании которого замкнет свой контакт в цепи магнитного пускателя КМ4, который в свою очередь шунтирует вторую ступень добавочных сопротивлений, обмотка ротора М окажется замкнутой накоротко, и двигатель начнет разгоняться в соответствии с его естественной характеристикой.

Реверсирование двигателя производится путем перевода командоконтроллера из положения *Вперед* в положение *Назад*. Во время прохождения командоконтроллера через нулевое положение система управления возвращается в исходное состояние, двигатель тормозится. Переход на положение *Назад* сопровождается включением магнитного пускателя КМ2, который изменяет чередование фаз на статоре двигателя. Включение аппаратов управления происходит в порядке, который был изложен выше.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Часть 2. Расчет и выбор асинхронных электродвигателей при повторно-кратковременном режиме работы. Определение времени разбега и допустимого числа включений электродвигателя

2.1. Для кинематической схемы выбрать асинхронные электродвигатели из серии 4АС и 4А.

Для повторно-кратковременного режима работы (S3) выпускается серия специальных электродвигателей, рассчитанных на этот режим – это двигатели серии 4АС (двигатели с повышенным скольжением).

Если продолжительность включения окажется нестандартной, следует мощность нагрузки P_c пересчитать на ближайшее большее стандартное значение относительной продолжительности включения:

$$P_c' = \frac{P_c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_{ст}}{\varepsilon_{\phi}} + \alpha \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ст}}{\varepsilon_{\phi}} - 1\right)}} \quad (2.1)$$

где P_c – мощность сопротивления при фактической продолжительности включения, Вт;

P_c' – мощность сопротивления, приведенная к стандартной ПВ ($\varepsilon_{ст}$), Вт;

$\alpha = (0,5 \dots 0,7)$ – коэффициент потерь;

ε_{ϕ} – фактическая продолжительность включения ($\varepsilon_{\phi} = 0,28$)

$$P_c' = \frac{25751,21}{\sqrt{\frac{0,4}{0,28} + 0,6 \cdot \left(\frac{0,4}{0,28} - 1\right)}} = 19833 \text{ Вт} \quad (2.2)$$

По полученному значению мощность сопротивления, приведенная к стандартному значению ($\varepsilon_{ст}$), выбирают двигатель так, чтобы его номинальная мощность, при принятой по формуле стандартной продолжительности включения, была равной или большей.

					КР.41.702.01. ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Акулова Т.			Расчет и выбор асинхронных электродвигателей при повторно - кратковременном режиме работы. Определение времени разбега и допустимого числа включений электродвигателя	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Васильков А.А.					28	60
Реценз.						ФГБОУ ВО КГСХА		
Н. Контр.								
Утверд.								

$$P_{н.ст} \geq P'_c$$

После чего двигатель необходимо проверить по условию запуска.

$$21000 > 19833$$

При повторно – кратковременном режиме работы могут быть использованы двигатели продолжительного режима (S1) из серии 4А. Выбор в этом случае производится аналогично выбору двигателя из серии 4АК

Выбираем двигатель марки 4АС180S4У3[5]:

Номинальная мощность, P_n (кВт) при ПВ 40%	21
КПД, (%)	86
$\cos \varphi$	0,92
Номинальное скольжение, S_n (%)	5,5
Отношение моментов, $M_{кр}/M_n = \mu_{кр}$	2,2
Синхронная частота вращения магнитного поля статора, n_0 (об/мин)	1418

Для обеспечения надежного пуска двигателя, с учетом снижения напряжения ($\Delta U = 7,5\%$), получают пусковой момент и проверяют двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{п} \geq M_{тр} + 0,25 \cdot M_n \quad (2.3)$$

где $M_{тр}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

$M_{п}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

M_n – номинальный момент электродвигателя, Н · м;

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске:

$$k_u = 1 - \frac{\Delta U}{100} \quad (2.4)$$

$$k_u = 1 - \frac{0,75}{100} = 0,925$$

По паспортным данным двигателя определяют номинальный и критический моменты. У асинхронных двигателей с фазным ротором в

						КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			29

паспортных данных отсутствует кратность пускового момента, поэтому пусковой момент принимают равным критическому, с учетом снижения напряжения.

$$M_{кр} = M_{п} \quad (2.5)$$

Синхронная скорость вращения электродвигателя задана ($n_0 = 1500$ об/мин). Исходя из этого, определяется синхронная частота вращения (ω_0):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} \quad (2.6)$$

где n_0 - синхронная скорость вращения электродвигателя.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1418}{60} = 148 \text{ рад/с}$$

Номинальная частота вращения:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H) \quad (2.7)$$

где ω_0 - синхронная частота вращения, рад/с;

S_H - номинальное скольжение двигателя, %.

$$\omega_H = 148 \cdot (1 - 0,055) = 147,5 \text{ рад/с}$$

Номинальный и критический моменты на естественной характеристике определяются выражениями:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad (2.8)$$

где P_H - номинальная мощность выбранного электродвигателя, Вт

ω_H - номинальная частота вращения, рад/с.

$$M_H = \frac{21000}{147,5} = 142,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{кр} = \mu_k \cdot M_H \quad (2.9)$$

где μ_k - кратность критического момента;

M_H - номинальный момент электродвигателя.

$$M_{кр} = 2,2 \cdot 142,3 = 313,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Находим момент сопротивления (M_c):

$$M_c = \frac{P'_c}{\omega_c} = \frac{P'_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} \quad (2.10)$$

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

где P'_c – мощность сопротивления, приведенная к стандартной ПВ ($\varepsilon_{ст}$),
Вт;

ω_c – частота вращения с моментом сопротивления, рад/с;

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с ;

S_c – скольжение при моменте сопротивления.

Принимаем допущение, что номинальная частота вращения электродвигателя приблизительно равна частоте вращения с моментом сопротивления:

$$\omega_n = \omega_c$$
$$M_c = \frac{17770}{147,423} = 120,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Принимаем допущение, что момент сопротивления при запуске электродвигателя равен моменту трогания, т.к. для пуска ему необходимо преодолеть сопротивление:

$$M_c = M_{тр}$$

Проверяем двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{п} \geq M_{тр} + 0,25 \cdot M_n \quad (2.7)$$

где $M_{тр}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

$M_{п}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м.

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске.

$$0,925^2 \cdot 313,1 > 120,4 + 0,25 \cdot 142,3$$

$$267,9 > 156$$

Равенство верно, значит двигатель марки 4АС180S4У3 выбран верно.

Теперь аналогично выбираем электродвигатель для серии 4А:

Мощность электродвигателя выбирается равной или большей эквивалентной мощности:

$$P_n \geq P_{эк}$$

где P_n – номинальная мощность двигателя, Вт;

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

$P_{эк}$ – эквивалентная мощность в нагрузочной диаграмме.

$$22000 > 17032$$

Выбираем двигатель марки 4А180S4У3 исходя из условия $P_n \geq P_{эк}$

со следующими данными [5]:

Номинальная мощность, P_n (кВт)	22
КПД, (%)	90
$\cos \varphi$	0,90
Номинальное скольжение, S_n (%)	2
Отношение моментов, $M_{кр}/M_n = \mu_{кр}$	2,3
Момент инерции двигателя J_d кг*м ²	0,19
Синхронная частота вращения магнитного поля статора, n_0 (об/мин)	1500

Для обеспечения надежного пуска двигателя, с учетом снижения напряжения ($\Delta U = 7,5\%$), получают пусковой момент и проверяют двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{п} \geq M_{тр} + 0,25 \cdot M_n \quad (2.8)$$

где $M_{тр}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

$M_{п}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

M_n – номинальный момент электродвигателя, Н · м;

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске:

$$k_u = 1 - \frac{\Delta U}{100} \quad (2.9)$$

$$k_u = 1 - \frac{0,75}{100} = 0,925$$

По паспортным данным двигателя определяют номинальный и критический моменты. У асинхронных двигателей с фазным ротором в паспортных данных отсутствует кратность пускового момента, поэтому пусковой момент принимают равным критическому, с учетом снижения напряжения.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

$$M_{кр} = M_{п} \quad (2.10)$$

Синхронная скорость вращения электродвигателя задана ($n_0 = 1000$ об/мин). Исходя из этого, определяется синхронная частота вращения (ω_0):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} \quad (2.11)$$

где n_0 – синхронная скорость вращения электродвигателя.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/сек}$$

Номинальная частота вращения:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H) \quad (2.12)$$

где ω_0 – синхронная частота вращения, рад/сек ;

S_H – номинальное скольжение двигателя, %.

$$\omega_H = 157 \cdot (1 - 0,02) = 153,86 \text{ рад/сек}$$

Номинальный и критический моменты на естественной характеристике определяются выражениями:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad (2.13)$$

где P_H – номинальная мощность выбранного электродвигателя, Вт

ω_H – номинальная частота вращения, рад/с.

$$M_H = \frac{22000}{153,86} = 142,987 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{кр} = \mu_k \cdot M_H \quad (2.14)$$

где μ_k – кратность критического момента;

M_H – номинальный момент электродвигателя.

$$M_{кр} = 2,3 \cdot 142,987 = 328,870 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Находим момент сопротивления (M_c):

$$M_c = \frac{P'_c}{\omega_c} = \frac{P'_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} \quad (2.15)$$

где P_c – мощность сопротивления, приведенная к стандартной ПВ ($\varepsilon_{ст}$), Вт;
 ω_c – частота вращения с моментом сопротивления, рад/сек;
 ω_0 – синхронная частота вращения, рад/сек;
 S_c – скольжение при моменте сопротивления.

Принимаем допущение, что номинальная частота вращения электродвигателя приблизительно равна частоте вращения с моментом сопротивления:

$$\omega_n = \omega_c$$

$$M_c = \frac{17770}{153,86} = 115,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Принимаем допущение, что момент сопротивления при запуске электродвигателя равен моменту трогания, т.к. для пуска ему необходимо преодолеть сопротивление:

$$M_c = M_{тр}$$

Проверяем двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{п} \geq M_{тр} + 0,25 \cdot M_n \quad (2.16)$$

где $M_{тр}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

$M_{п}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м.

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске.

$$0,925^2 \cdot 328,870 > 115,4 + 0,25 \cdot 142,987$$

$$281,389 > 151,1$$

Равенство верно, значит двигатель марки 4A180S4Y3 выбран верно.

2.2. Для двигателя из серии 4А определить допустимое число включений в час. Построить зависимость $\omega = f(t)$ и $M_{дв} = \phi(t)$ в процессе пуска. Определить время разбега привода графоаналитическим методом и на ЭВМ.

Допустимое число включений в час можно определить по выражению

$$h_{доп} = 3600 \cdot \frac{\Delta P_n \cdot \beta \cdot (1 - \varepsilon_\phi) + (\Delta P_n - \Delta P_\phi) \cdot \varepsilon_\phi}{\Delta A_{п} + \Delta A_{т}} \quad (2.17)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

где ΔP_H – потери мощности при номинальной нагрузке, Вт;
 ΔP_ϕ – фактические потери мощности (при нагрузке P_c), Вт;
 β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения двигателя в период паузы
($\beta_0 = 0,5$);
 ε_ϕ – фактическая продолжительность включения;
 ΔA_H – потери энергии при пуске, Дж;
 ΔA_T – потери энергии при торможении, Дж (принять равным нулю)

Номинальные и фактические потери определяются из выражений:

$$\Delta P_H = P_H \cdot \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \quad (2.18)$$

где η_H – номинальный КПД электродвигателя;
 P_H – номинальная мощность электродвигателя.

$$\Delta P_H = 22000 \cdot \frac{1 - 0,9}{0,9} = 2444,44 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_\phi = \Delta P_H \cdot \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1} \quad (2.19)$$

где x – коэффициент загрузки;
 ΔP_H – номинальные и фактические потери;
 α – коэффициент потерь.

$$x = \frac{P_c}{P_H} \quad (2.20)$$

где P_c – мощность сопротивления;
 P_H – номинальная мощность.

$$x = \frac{32591}{22000} = 1,481$$

$$\Delta P_\phi = 2444,44 \cdot \frac{0,6 + 1,481^2}{0,6 + 1} = 3047,5 \text{ Вт}$$

При решении задач по определению времени разбега электропривода и потерь энергии в роторе электродвигателя необходимо в уравнение механической характеристики двигателя (в упрощенную формулу Клосса) ввести корректировочный коэффициент, позволяющий получить механическую характеристику с действительным пусковым моментом, т.е. записать уравнение в виде:

$$M_{\text{д}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \cdot (1 + \alpha \cdot \varepsilon)}{\frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot \varepsilon} \quad (2.21)$$

где α – поправочный коэффициент, $(\alpha = \frac{r_1}{r_2} \approx 1)$

$s_{\text{к}}$ – критическое скольжение;

ε – поправочный коэффициент, $(\varepsilon \approx s_{\text{к}})$.

$M_{\text{к}}$ – критический момент электродвигателя.

Время разбега определяется из основного уравнения движения:

$$t(s) = J \cdot \omega_0 \cdot \int_{s_2}^{s_1} \frac{ds}{M_{\text{д}}(s) - M_{\text{с}}(s)}, \quad (2.22)$$

где $M_{\text{д}}(s)$ – действительный пусковой момент, Н · м;

$M_{\text{с}}(s) = M_{\text{с}}$ – момент сопротивления, определяемый в 1-й части;

J – приведенный к скорости вала двигателя момент инерции подвижных частей подъёмного механизма ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$), определяемый как:

$$J = k \cdot J_{\text{д}} + J_{\text{б}} \cdot \frac{1}{i^2} + m \cdot \frac{v^2}{\omega_{\text{д}}^2} \quad (2.23)$$

где k – коэффициент, учитывающий моменты инерции передаточного механизма ($k = 1, 2$);

$J_{\text{д}}$ – момент инерции ротора двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{\text{б}}$ – момент инерции барабана, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$\omega_{\text{д}}$ – угловая скорость вала двигателя, рад/сек;

i – передаточное число, определяемое как:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$i = \frac{\omega_c}{\omega_6} \quad (2.24)$$

$$i = \frac{151,505}{7,179} = 21,1$$

где ω_6 – угловая скорость барабана, рад/сек;

ω_c – угловая скорость вала двигателя, рад/сек.

$$\omega_6 = \frac{2 \cdot v}{D_6}, \quad (2.25)$$

$$\omega_6 = \frac{2 \cdot 1,4}{0,39} = 7,179 \text{ рад/сек}$$

$$J = 1,2 \cdot 0,19 + 7 \cdot \frac{1}{21,1^2} + 1500 \cdot \frac{1,4^2}{157^2} = 0,363 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Потери энергии в роторе определяются из уравнения потерь:

$$\Delta A_p = J \cdot \omega_0^2 \cdot \int_{s_2}^{s_1} \frac{M_d(s) \cdot s \cdot ds}{M_d(s) - M_c(s)} \quad (2.26)$$

где $M_d(s)$ – действительный пусковой момент, Н · м;

s – переменная, которая равняется 1 для единичного примера.

Определяем критическое скольжение электродвигателя:

$$s_{кр} = s_n \cdot (\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}) \quad (2.27)$$

$$s_{кр} = 0,02 \cdot (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}) = 0,087$$

$$M_n = 1,4 \cdot 142,987 = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определяем значение постоянной из уравнения Клосса:

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{s_k} + s_k - 2 \frac{M_k}{M_n}}{2 \left(\frac{M_k}{M_n} - 1 \right)}, \quad (2.28)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{0,087} + 0,087 - 2 \frac{328,870}{200}}{2 \left(\frac{328,870}{200} - 1 \right)} = 3,62.$$

Механическая характеристика с действительным пусковым моментом:

										Лист
										37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

$$M_d = \frac{2 \cdot 328,870(1 + 3,62)}{\frac{0,087}{0,02} + \frac{0,02}{0,087} + 2 \cdot 3,62} = 257.$$

Подставив в формулу потери энергии в роторе уравнение Клосса получим:

$$\Delta A_p = 0,363 \cdot 157^2 \cdot \int_0^1 \frac{257 \cdot ds}{257 - 132,2} = 9224,4 \text{ Вт}$$

Определяем потери двигателя при пуске:

$$A_{\pi} = 2 \cdot A_p \quad (2.29)$$

$$A_{\pi} = 2 \cdot 9224,4 = 18448,8 \text{ Дж}$$

Теперь находим число включений:

$$h_{\text{доп}} = 3600 \cdot \frac{2444,44 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,28) + (2444,44 - 3047,5) \cdot 0,28}{18448,8 + 0} = 229,6$$

Теперь определяем время разбега из основного уравнения движения:

$$t(s) = 0,363 \cdot 157 \cdot \int_0^1 \frac{1}{257 - 132,2} ds = 0,354 \text{ сек} \quad (2.30)$$

Для построения зависимостей $M_{\text{дв}} = f(t)$ и $\omega = \varphi(t)$ (изменение момента и скорости двигателя в переходном процессе) необходимо предварительно построить механические характеристики двигателя и рабочей машины $M_{\text{д}} = f_1(\omega)$ и $M_{\text{с}} = f_2(\omega)$. Механическая характеристика двигателя строится по координатам 5 точек. Механическая характеристика рабочей машины строится по уравнению $M_{\text{с}} = M_{\text{тр}}$.

Двигатель марки 4А180S4У3 (стр 32)

- 1) $M_{\pi} = \mu_{\pi} \cdot M_{\text{H}} = 1,4 \cdot 142,9 = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $w = 0 \text{ рад/с}$
- 2) $M_{\text{min}} = \mu_{\text{min}} \cdot M_{\text{H}} = 1, \cdot 142,9 = 142,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $w_{\text{min}} = 26,1 \text{ рад/с}$
- 3) $M_{\text{к}} = \mu_{\text{к}} \cdot M_{\text{H}} = 2,3 \cdot 142,9 = 328,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $w_{\text{к}} = 141 \text{ рад/с}$
- 4) $M_{\text{H}} = 142,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $w_{\text{H}} = 153,8 \text{ рад/с}$
- 5) $M_0 = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $w_0 = 157 \text{ рад/с}$

Определяем время разбега графоаналитическим методом:

$$t = (OK) \cdot m_t \quad (2.31)$$

где ОК – длина разбега, (ОК=80);

m_t – масштаб по времени.

$$m_t = \frac{m_\omega \cdot m_J}{m_M}, \quad (2.32)$$

где m_ω – масштаб по угловой скорости;

m_J – масштаб по моменту инерции;

m_M – масштаб по моменту двигателя.

$$m_\omega = \frac{\omega}{l}; m_J = \frac{J}{l}; m_M = \frac{M}{l}; \quad (2.33)$$

где l – реальная длина участка на миллиметровке, мм.

$$m_\omega = \frac{\omega}{l} = \frac{157}{157} = 1 \frac{\text{с}^{-1}}{\text{мм}}; m_J = \frac{J}{l} = \frac{0,363}{18} = 0,02; m_M = \frac{M}{l} = \frac{200}{80} = 2,5$$

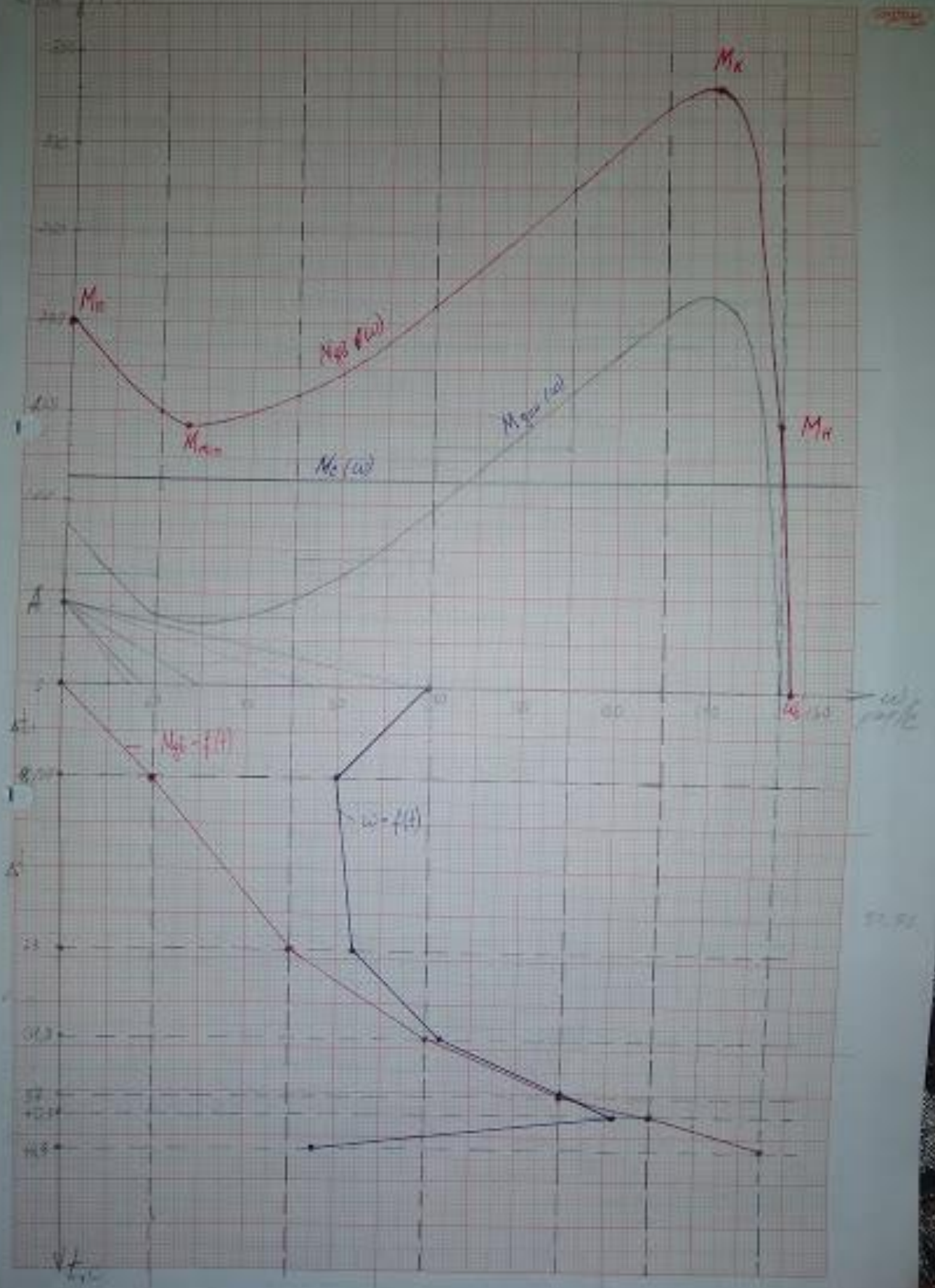
$$m_t = \frac{1 \cdot 0,02}{2,5} = 0,008$$

$$t = 80 \cdot 0,08 = 0,64$$

Время разбега, получившееся путем графических расчетов, отличается от времени разбега, получившегося с помощью аналитического расчета на ЭВМ (на 0,286). Данное различие можно объяснить погрешностью в расчетах и построении графика.

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

Handwritten title at the top left of the page.



Часть 3. Расчет и выбор асинхронного электродвигателя для

кратковременного режима работы. Определение температуры нагрева

3.1 Правильно выбранным по нагреву электродвигателем при любом режиме работы считается тот, у которого в процессе работы превышение температуры максимально приближается к допустимому, но не превышает его. Для полного использования по нагреву двигателя продолжительного режима (например, серии 4AP) при работе в кратковременном режиме его следует перегружать, т.е. выбирать, исходя из условия:

$$P_n < P_c \quad (3.1)$$

Выбираем электродвигатель марки 4AP180S4Y3[6]:

Номинальная мощность, P_n (кВт)	22,0
КПД,(%)	90
$\cos \varphi$	0,90
Номинальное скольжение, S_n (%)	2
Кратность пускового (начального) момента электродвигателя	1,4
Кратность критического (максимального) момента	2,3
Масса двигателя, m (кг)	145
Номинальная частота вращения магнитного поля статора, n_0 (об/мин)	1500

$$22000 < 25751$$

Постоянная времени нагрева (T_n, c) определяется как:

$$T_n = \frac{C}{A}, \quad (3.2)$$

где $C = c_0 \cdot m$ – теплоёмкость двигателя, Дж/°С;

					КР.41.702.01.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Акулова Т.			Расчет и выбор асинхронного электродвигателя для кратковременного режима работы. Определение температуры нагрева	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Васильков А.А.					40	60
Реценз.						ФГБОУ ВО КГСХА		
Н. Контр.								
Утверд.								

c_0 – удельная теплоемкость (берется для стали), Дж/кг·град;

m – масса электродвигателя, кг;

A – теплоотдача двигателя, Дж/с·град:

$$A = \frac{\Delta P_n}{\tau_n}, \quad (3.3)$$

где τ_n – номинальное превышение температуры, соответствующее нагревостойкости изоляции (принимается по таблице 1 [1]).

$$\Delta P_n = 22000 \frac{1 - 0,9}{0,9} = 2444,4 \text{ Вт};$$

$$A = \frac{2444,4}{115} = 21,25 \text{ Дж/сек} \cdot \text{град};$$

$$C = 480 \cdot 145 = 69600 \text{ Дж/сек} \cdot \text{град};$$

$$T_n = \frac{69600}{21,256} = 3274,369 \text{ сек.}$$

Определяем коэффициенты термической (p_m) и механической (p_M) перегрузок:

$$p_m = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_n}\right)}, \quad (3.4)$$

$$p_M = \sqrt{p_m(1 + \alpha) - \alpha}, \quad (3.5)$$

где t_p – время работы, принимается 600 с;

α – коэффициент потерь, принимается 0,6.

$$p_m = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{600}{3894}\right)} = 7;$$

$$p_M = \sqrt{7(1 + 0,6) - 0,6} = 3,256.$$

После определения коэффициента механической перегрузки производится расчет потребной мощности электродвигателя, т.к. $\rho_M = 2$, то полное использование двигателей по нагреву ограничивается перегрузочной способностью, тогда:

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

$$P_{\text{рас}} = \frac{P_c}{\rho_m} \quad (3.7)$$

где P_c – мощность сопротивления, Вт;

ρ_m – коэффициент механической перегрузки.

$$P_{\text{рас}} = \frac{25751}{2} = 12875,5 \text{ Вт}$$

Номинальная мощность электродвигателя выбирается равной или большей расчетной мощности:

$$P_n \geq P_{\text{рас}}$$

$$18500 > 12875,5$$

Выбираем двигатель марки 4AP160M4У3 [6] со следующими данными:

Номинальная мощность, P_n (кВт)	18,5
КПД,(%)	89,5
$\cos \varphi$	0,88
Номинальное скольжение, S_n (%)	2,2
Кратность пускового (начального) момента электродвигателя	1,4
Кратность критического (максимального) момента	2,3
Масса двигателя, m (кг)	120
Номинальная частота вращения магнитного поля статора, n_0 (об/мин)	1500

Для выбранного по этому условию электродвигателя необходимо рассчитать превышение температуры в конце рабочего цикла и далее проверить по условиям запуска.

Если данный двигатель не обеспечивает надежного пуска, необходимо произвести выбор следующего по мощности. Для этого двигателя также рассчитать превышение температуры в конце рабочего цикла и сопоставить его с нагревом двигателя, выбранного по условиям нагрева и перегрузочной способности.

3.2. Превышение температуры двигателя в любой момент рабочего периода определяется по уравнению нагрева:

$$\tau_{\tau_p} = \tau_{y\phi} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_p}{T_H}}\right) \quad (3.8)$$

где $\tau_{y\phi}$ – установившееся превышение температуры при нагрузке P_c , °C;

T_H – постоянная времени нагрева, сек;

Найдем установившееся превышение температуры при нагрузке P_c :

$$\tau_{y\phi} = \tau_H \cdot \frac{\Delta P_\phi}{\Delta P_H} \quad (3.9)$$

где ΔP_ϕ – потери мощности при нагрузке P_c , Вт;

ΔP_H – номинальные потери мощности, Вт.

Рассчитаем превышение температуры в конце периода работы электродвигателя, для этого определим номинальные потери мощности:

$$\Delta P_H = P_H \cdot \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (3.10)$$

$$\Delta P_H = 18500 \cdot \frac{1 - 0,895}{0,895} = 2170,391 \text{ Вт}$$

Найдем коэффициент загрузки электродвигателя:

$$x_1 = \frac{P_c}{P_H} \quad (3.11)$$

$$x_1 = \frac{25751}{18500} = 1,39$$

Определяем номинальные потери электродвигателя:

$$\Delta P_\phi = \Delta P_H \cdot \frac{\alpha + x_1^2}{\alpha + 1} \quad (3.12)$$

где ΔP_H – номинальные потери мощности электродвигателя, Вт;

α – (0,5...0,7) – коэффициент потерь;

x_1 – коэффициент загрузки электродвигателя.

$$\Delta P_\phi = 2170,391 \cdot \frac{0,6 + 1,39^2}{0,6 + 1} = 3442,1 \text{ Вт}$$

Определим превышение температуры электродвигателя из уравнения кривой нагрева:

$$\tau_{y\phi} = \tau_H \cdot \frac{\Delta P_\phi}{\Delta P_H} \quad (3.13)$$

где ΔP_H – номинальные потери мощности электродвигателя, Вт;

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

τ_n – номинальное превышение температуры, соответствующее нагревостойкости изоляции (принимается по таблице);

ΔP_ϕ – номинальные потери электродвигателя, Вт.

$$\tau_{y\phi} = 115 \cdot \frac{3442,1}{2170,391} = 174,45 \text{ }^\circ\text{C}$$

Постоянная времени нагрева определяется как:

$$T_n = \frac{C}{A} \quad (3.14)$$

где $C = c_0 \cdot m$ – теплоемкость двигателя, Дж $^\circ$ С;

c_0 – удельная теплоемкость (берется по стали), Дж/кг · град;

m – масса электродвигателя, кг;

A – теплоотдача двигателя, Дж/сек · град;

$$A = \frac{\Delta P_n}{\tau_n} \quad (3.15)$$

где τ_n – номинальное превышение температуры, соответствующее нагревостойкости изоляции (принимается по таблице);

Выбираем по классу изоляции нагревостойкости номинальное превышение температуры и предельно допустимую температуру:

150...365 мм – класса F, поскольку ось вращения электродвигателя 160 мм.

$$\tau_n = 115^\circ\text{C}$$

Предельно допустимая температура:

$$A = \frac{2170,391}{115} = 18,873 \text{ Дж/сек} \cdot \text{град}$$

Удельную теплоёмкость берём равную $c_0 = 480$ Дж/с · град

$$C = 480 \cdot 115 = 57600 \text{ Дж/сек} \cdot \text{град}$$

$$T_n = \frac{57600}{18,873} = 3051,979 \text{ сек}$$

Превышение температуры в конце рабочего периода:

$$\tau_{\tau_p} = \tau_{y\phi} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_p}{T_n}}\right) \quad (3.16)$$

$$\tau_{\tau_p} = 174,45 \cdot \left(1 - e^{\frac{-600}{3051,979}}\right) = 31,44 \text{ сек}$$

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

Так как за время работы электродвигателя превышение температуры не превышает номинального значения ($31,44 < 115$), то значит по условиям нагрева электродвигатель выбран правильно.

Для обеспечения надежного пуска двигателя, с учетом снижения напряжения ($\Delta U = 7,5\%$), получают пусковой момент и проверяют двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{\Pi} \geq M_{\text{ТР}} + 0,25 \cdot M_{\text{Н}} \quad (3.17)$$

где $M_{\text{ТР}}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

M_{Π} – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

$M_{\text{Н}}$ – номинальный момент электродвигателя, Н · м;

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске:

$$k_u = 1 - \frac{\Delta U}{100} \quad (3.18)$$

$$k_u = 1 - \frac{0,75}{100} = 0,925$$

По паспортным данным двигателя определяют номинальный и критический моменты. У асинхронных двигателей с фазным ротором в паспортных данных отсутствует кратность пускового момента, поэтому пусковой момент принимают равным критическому, с учетом снижения напряжения.

$$M_{\text{кр}} = M_{\Pi} \quad (3.19)$$

Синхронная скорость вращения электродвигателя задана ($n_0 = 1000$ об/мин). Исходя из этого, определяется синхронная частота вращения (ω_0):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} \quad (3.20)$$

где n_0 – синхронная скорость вращения электродвигателя.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с}$$

Номинальная частота вращения:

$$\omega_{\text{Н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{Н}}) \quad (3.21)$$

где ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с ;

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

S_H – номинальное скольжение двигателя, %.

$$\omega_H = 157 \cdot (1 - 0,022) = 153,564 \text{ рад/с}$$

Номинальный и критический моменты на естественной характеристике определяются выражениями:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad (3.22)$$

где P_H – номинальная мощность выбранного электродвигателя, Вт

ω_H – номинальная частота вращения, рад/с.

$$M_H = \frac{18500}{153,564} = 120,485 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{кр} = \mu_k \cdot M_H \quad (3.23)$$

где μ_k – кратность критического момента;

M_H – номинальный момент электродвигателя.

$$M_{кр} = 2,3 \cdot 120,485 = 277,116 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Находим момент сопротивления (M_c):

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_c} = \frac{P_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} \quad (3.24)$$

где P_c – мощность сопротивления, кВт;

ω_c – частота вращения с моментом сопротивления, рад/с;

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с ;

S_c – скольжение при моменте сопротивления.

Принимаем допущение, что номинальная частота вращения электродвигателя приблизительно равна частоте вращения с моментом сопротивления:

$$\omega_H = \omega_c \quad (3.25)$$

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_c} = \frac{P_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} = \frac{32591}{153,564} = 212,256 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Принимаем допущение, что момент сопротивления при запуске электродвигателя равен моменту трогания, т.к. для пуска ему необходимо преодолеть сопротивление:

$$M_c = M_{тр} \quad (3.26)$$

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

Проверяем двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{\Pi} \geq M_{\text{ТР}} + 0,25 \cdot M_{\text{Н}}$$

где $M_{\text{ТР}}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

M_{Π} – пусковой момент электродвигателя, Н · м.

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске.

$$0,925^2 \cdot 168,679 \geq 212,256 + 0,25 \cdot 120,485$$

$$144,326 \geq 242,377$$

Условие не выполняется, значит двигатель марки 4AP160M4Y3 выбран неверно.

Сделаем пересчёт превышения температуры электродвигателя, взяв большую номинальную мощность.

Выбираем двигатель марки 4AP180S4Y3 исходя из условия $P_{\text{н}} \geq P_{\text{рас}}$ со следующими данными:

Номинальная мощность, $P_{\text{н}}$ (кВт)	22,0
КПД, (%)	90
$\cos \varphi$	0,90
Номинальное скольжение, $S_{\text{н}}$ (%)	2
Кратность пускового (начального) момента электродвигателя	1,4
Кратность критического (максимального) момента	2,3
Масса двигателя, m (кг)	145
Номинальная частота вращения магнитного поля статора, n_0 (об/мин)	1500

Превышение температуры двигателя в любой момент рабочего периода определяется по уравнению нагрева:

$$\tau_{\tau_p} = \tau_{\text{уф}} \cdot (1 - e^{\frac{-t_p}{T_{\text{н}}}}) \quad (3.27)$$

где $\tau_{\text{уф}}$ – установившееся превышение температуры при нагрузке $P_{\text{с}}$, °С;

$T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева, сек;

Найдем установившееся превышение температуры при нагрузке $P_{\text{с}}$:

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

$$\tau_{уф} = \tau_{н} \cdot \frac{\Delta P_{\phi}}{\Delta P_{н}} \quad (3.28)$$

где ΔP_{ϕ} – потери мощности при нагрузке P_c , Вт;

$\Delta P_{н}$ – номинальные потери мощности, Вт.

Рассчитаем превышение температуры в конце периода работы электродвигателя, для этого определим номинальные потери мощности:

$$\Delta P_{н} = P_{н} \cdot \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (3.29)$$

$$\Delta P_{н} = 22000 \cdot \frac{1 - 0,9}{0,9} = 2444,44 \text{ Вт}$$

Найдем коэффициент загрузки электродвигателя:

$$x_1 = \frac{P_c}{P_{н}} \quad (3.30)$$

$$x_1 = \frac{25751}{22000} = 1,17$$

Определяем номинальные потери электродвигателя:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{н} \cdot \frac{\alpha + x_1^2}{\alpha + 1} \quad (3.31)$$

где $\Delta P_{н}$ – номинальные потери мощности электродвигателя, Вт;

α – (0,5...0,7) – коэффициент потерь;

x_1 – коэффициент загрузки электродвигателя.

$$\Delta P_{\phi} = 2444,44 \cdot \frac{0,6 + 1,481^2}{0,6 + 1} = 3009,8 \text{ Вт}$$

Определим превышение температуры электродвигателя из уравнения кривой нагрева:

$$\tau_{уф} = \tau_{н} \cdot \frac{\Delta P_{\phi}}{\Delta P_{н}} \quad (3.32)$$

где $\Delta P_{н}$ – номинальные потери мощности электродвигателя, Вт;

$\tau_{н}$ – номинальное превышение температуры, соответствующее нагревостойкости изоляции (принимается по таблице);

ΔP_{ϕ} – номинальные потери электродвигателя, Вт.

$$\tau_{уф} = 115 \cdot \frac{3009,8}{2444,44} = 141,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Постоянная времени нагрева определяется как:

$$T_H = \frac{C}{A} \quad (3.33)$$

где $C = c_0 \cdot m$ – теплоемкость двигателя, Дж $^\circ\text{C}$;

c_0 – удельная теплоемкость (берется по стали), Дж/кг \cdot град;

m – масса электродвигателя, кг;

A – теплоотдача двигателя, Дж/сек \cdot град;

$$A = \frac{\Delta P_H}{\tau_H} \quad (3.34)$$

где τ_H – номинальное превышение температуры, соответствующее нагревостойкости изоляции (принимается по таблице);

Выбираем по классу изоляции нагревостойкости номинальное превышение температуры и предельно допустимую температуру:

150...365 мм – класса F, поскольку ось вращения электродвигателя 180 мм.

$$\tau_H = 115^\circ\text{C}$$

Предельно допустимая температура:

$$A = \frac{2444,44}{115} = 21,256 \text{ Дж/сек} \cdot \text{град}$$

Удельную теплоёмкость берём равную $c_0 = 480$ Дж/сек \cdot град

$$C = 480 \cdot 145 = 69600 \text{ Дж/сек} \cdot \text{град}$$

$$T_H = \frac{69600}{21,256} = 3274,369 \text{ сек}$$

Превышение температуры в конце рабочего периода:

$$\tau_{\tau_p} = \tau_{уф} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t_p}{T_H}} \right) \quad (3.35)$$

$$\tau_{\tau_p} = 141,6 \cdot \left(1 - e^{\frac{-600}{3274,369}} \right) = 23,7 \text{ сек}$$

Так как за время работы электродвигателя превышение температуры не превышает номинального значения ($23,7 < 115$), то значит по условиям нагрева двигатель выбран правильно.

										Лист
										49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Для обеспечения надежного пуска двигателя, с учетом снижения напряжения ($\Delta U = 7,5\%$), получают пусковой момент и проверяют двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{\Pi} \geq M_{\text{ТР}} + 0,25 \cdot M_{\text{Н}} \quad (3.36)$$

где $M_{\text{ТР}}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;

M_{Π} – пусковой момент электродвигателя, Н · м;

$M_{\text{Н}}$ – номинальный момент электродвигателя, Н · м;

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжение при пуске:

$$k_u = 1 - \frac{\Delta U}{100} \quad (3.37)$$

$$k_u = 1 - \frac{0,75}{100} = 0,925$$

По паспортным данным двигателя определяют номинальный и критический моменты. У асинхронных двигателей с фазным ротором в паспортных данных отсутствует кратность пускового момента, поэтому пусковой момент принимают равным критическому, с учетом снижения напряжения.

$$M_{\text{кр}} = M_{\Pi} \quad (3.38)$$

Синхронная скорость вращения электродвигателя задана ($n_0 = 1000$ об/мин). Исходя из этого, определяется синхронная частота вращения (ω_0):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} \quad (3.39)$$

где n_0 – синхронная скорость вращения электродвигателя.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/сек}$$

Номинальная частота вращения:

$$\omega_{\text{Н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{Н}}) \quad (3.40)$$

где ω_0 – синхронная частота вращения, рад/сек ;

$S_{\text{Н}}$ – номинальное скольжение двигателя, %.

$$\omega_{\text{Н}} = 157 \cdot (1 - 0,02) = 153,86 \text{ рад/сек}$$

Номинальный и критический моменты на естественной характеристике определяются выражениями:

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad (3.41)$$

где P_H – номинальная мощность выбранного электродвигателя, Вт
 ω_H – номинальная частота вращения, рад/сек.

$$M_H = \frac{22000}{153,86} = 142,987 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{кр} = \mu_k \cdot M_H \quad (3.42)$$

где μ_k – кратность критического момента;
 M_H – номинальный момент электродвигателя.

$$M_{кр} = 2,3 \cdot 142,987 = 328,871 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Находим момент сопротивления (M_c):

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_c} = \frac{P_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} \quad (3.43)$$

где P_c – мощность сопротивления, кВт;
 ω_c – частота вращения с моментом сопротивления, рад/сек;
 ω_0 – синхронная частота вращения, рад/сек;
 S_c – скольжение при моменте сопротивления.

Принимаем допущение, что номинальная частота вращения электродвигателя приблизительно равна частоте вращения с моментом сопротивления:

$$\omega_H = \omega_c \quad (3.44)$$

$$M_c = \frac{P_c}{\omega_c} = \frac{P_c}{\omega_0 \cdot (1 - S_c)} = \frac{32591}{153,86} = 211,822 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Принимаем допущение, что момент сопротивления при запуске электродвигателя равен моменту трогания, т.к. для пуска ему необходимо преодолеть сопротивление:

$$M_c = M_{тр} \quad (3.45)$$

Проверяем двигатель на надежность пуска по условию:

$$k_u^2 \cdot M_{п} \geq M_{тр} + 0,25 \cdot M_H$$

где $M_{тр}$ – момент трогания рабочей машины, Н · м;
 $M_{п}$ – пусковой момент электродвигателя, Н · м.

k_u – коэффициент, учитывающий снижение напряжения при пуске.

$$0,925^2 \cdot 328,817 \geq 211,822 + 0,25 \cdot 142,987$$

$$281,344 > 247,568$$

Условие выполняется, значит двигатель марки 4AP180S4У3 выбран верно.

Построим графики изменения превышения температуры за рабочий цикл:

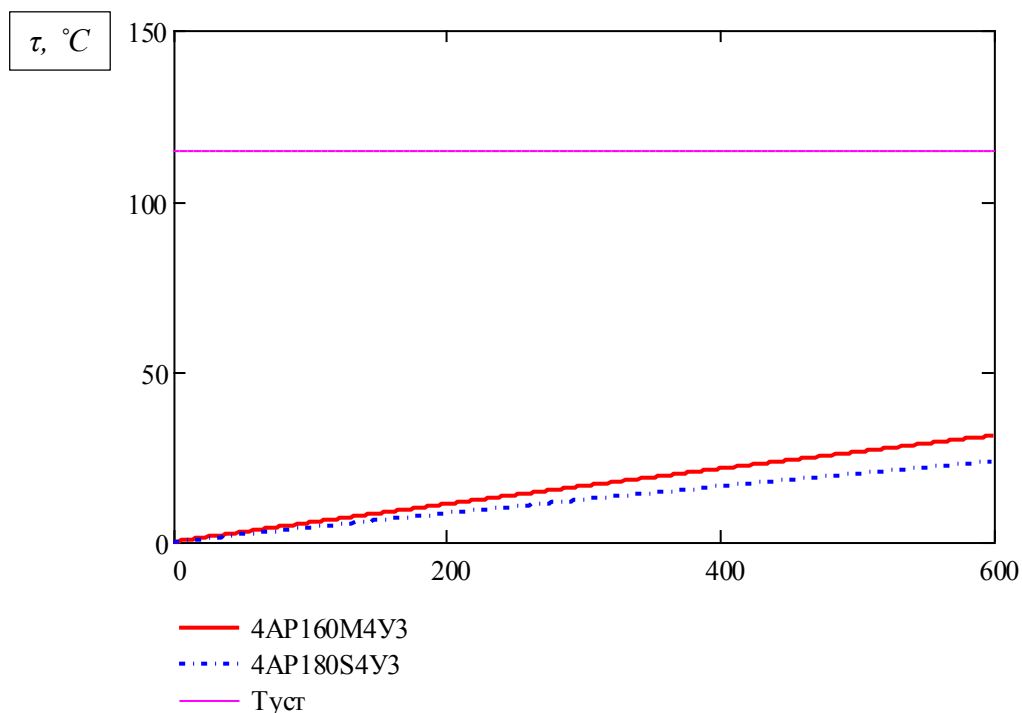


Рисунок 6. Графики изменения превышения температуры двигателей за рабочий цикл.

Часть 4. Расчет характеристик при частотном регулировании угловой скорости асинхронного электродвигателя при изменении напряжения

Для асинхронного электродвигателя серии 4А, выбранного в части 2, определяем параметры схемы замещения по каталожным данным.

Для определения параметров двигателя достаточно воспользоваться упрощенной Г – образной схемой замещения:

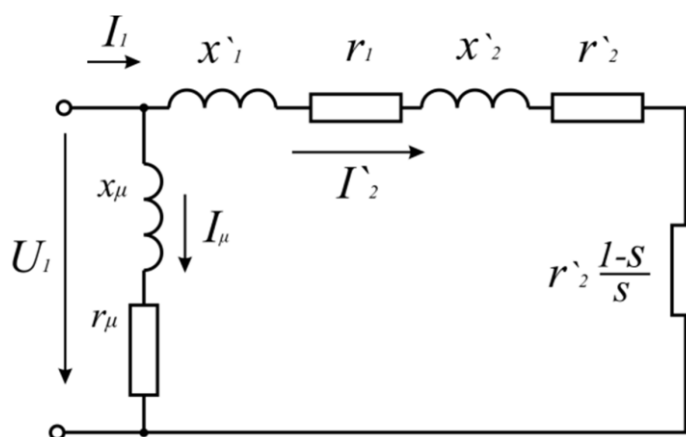


Рисунок 7. Упрощенная Г-образная схема замещения одной фазы асинхронного электродвигателя.

Для начала необходимо рассчитать параметры схемы замещения, для этого воспользуемся паспортными данными электродвигателя серии 4А180S4У3.[5].

Номинальная мощность, P_n (кВт)	22.0
КПД, (%)	90
$\cos \varphi$	0,90
Номинальное скольжение, S_n (%)	2
Кратность пускового (начального) момента электродвигателя	1,4
Кратность критического (максимального) момента	2,3
Номинальная частота вращения магнитного поля статора, n_0 (об/мин)	1500

					КР.41.702.01.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.	Акулова Т.				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Васильков А.А					53	60
Реценз.					ФГБОУ ВО КГСХА		
Н. Контр.							
Утверд.							
					Расчет характеристик при частотном регулировании угловой скорости асинхронного электродвигателя при изменении напряжения		

Определяем номинальные потери электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (4.1)$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность электродвигателя, Вт;

η – номинальный КПД электродвигателя.

$$\Delta P_{\text{н}} = 22000 \cdot \frac{1 - 0,9}{0,9} = 2444,44 \text{ Вт}$$

Номинальный ток статора определим по формуле:

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad (4.2)$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность электродвигателя, Вт;

η – номинальный КПД электродвигателя.

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности электродвигателя ($\cos\varphi = 0,855$)

$$I_{1\text{н}} = \frac{22000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 41,267 \text{ А}$$

Синхронная скорость вращения электродвигателя задана ($n_0 = 1000$ об/мин). Исходя из этого, определяется синхронная частота вращения (ω_0):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} \quad (4.3)$$

где n_0 – синхронная скорость вращения электродвигателя.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с}$$

Номинальная частота вращения:

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{н}}) \quad (4.4)$$

где ω_0 – синхронная частота вращения, рад/сек;

$S_{\text{н}}$ – номинальное скольжение двигателя, %.

$$\omega_{\text{н}} = 157 \cdot (1 - 0,02) = 153,56 \text{ рад/сек}$$

Номинальный и критический моменты на естественной характеристике определяются выражениями:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (4.5)$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность выбранного электродвигателя, Вт;

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

ω_H – номинальная частота вращения, рад/сек.

$$M_H = \frac{22000}{153,56} = 142,987 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{кр} = \mu_k \cdot M_H \quad (4.6)$$

где μ_k – кратность критического момента;

M_H – номинальный момент электродвигателя, Н · м.

$$M_{кр} = 2,3 \cdot 142,987 = 328,870 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определим переменные потери мощности в электродвигателе:

$$\Delta P_v = \frac{\Delta P_H}{\alpha + 1} \quad (4.7)$$

где ΔP_H – номинальные потери электродвигателя, Вт;

α – (0,5...0,7) – коэффициент потерь.

$$\Delta P_v = \frac{2444,44}{0,6 + 1} = 1527,775 \text{ Вт}$$

Определяем активное сопротивление статора r_1 :

$$r_1 = \frac{\Delta P_v - M_H \cdot (\omega_0 - \omega_H)}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}^2} \quad (4.8)$$

где ΔP_v – переменные потери мощности в электродвигателе, Вт;

M_H – номинальный момент электродвигателя, Н · м;

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/сек;

ω_H – номинальная частота вращения, рад/сек;

I_{1H} – номинальный ток статора, А.

$$r_1 = \frac{1527,775 - 142,987 \cdot (157 - 153,56)}{\sqrt{3} \cdot 41,267^2} = 0,351 \text{ Ом}$$

Сумму реактивных сопротивлений статора и ротора определяем путем преобразования выражения для критического момента двигателя:

Определяем индуктивное сопротивление x_k при к.з, Ом:

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot M_k \cdot \omega_0} - r_1\right)^2 - r_1^2} \quad (4.9)$$

где M_k – критический момент электродвигателя, Н · м;

$U_{1\phi}$ – фазное напряжение обмотки статора, В;

ω_0 – синхронная частота вращения, рад/с;

r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot 328,870} - 0,351\right)^2 - 0,351^2} = 0,995 \text{ Ом}$$

Определяем активное сопротивление ротора r'_2

$$r'_2 = \frac{\Delta P_H}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}^2} - r_1 \quad (4.10)$$

где ΔP_H – номинальные потери электродвигателя, Вт;

I_{1H} – номинальный ток статора, А;

r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

$$r'_2 = \frac{2444,44}{\sqrt{3} \cdot 41,267^2} - 0,351 = 0,477 \text{ Ом}$$

Определим ток обмотки ротора, приведенный к току обмотки статора:

$$I'_{2H} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{S_H}\right) + x_k^2}} \quad (4.11)$$

где $U_{1\phi}$ – фазное напряжение обмотки статора, В;

r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом;

r'_2 – активное сопротивление ротора, Ом;

S_H – скольжение при номинальном моменте сопротивления;

x_k – индуктивное сопротивление при к.з, Ом.

$$I'_{2H} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,351 + \frac{0,477}{0,020}\right) + 0,995^2}} = 43,832 \text{ А}$$

Для построения механических характеристик асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости необходимо в уравнение механической характеристики в параметрической форме ввести относительные значения напряжения и частоты.

Построим механические характеристики двигателя при частотном регулировании по закону $\frac{U}{f} = const$, эти относительные величины между собою равны, т.е. $U = f$ при частотах 10, 25, 50 и 100 Гц.

Определим для каждой частоты: угловую скорость, критический момент, относительную частоту:

Относительная частота для сети 10 Гц:

$$\varphi_1 = \frac{f}{f_H} \quad (4.12)$$

$$\varphi_1 = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ Гц}$$

Угловая скорость вращения вала:

$$\omega_{010} = \omega_0 \cdot \varphi_1 \quad (4.13)$$

$$\omega_{010} = 157 \cdot 0,2 = 31,4 \text{ рад/сек}$$

Критический момент:

$$M_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot u_1^2 \cdot r'_2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_1 - \omega)}{[r_1 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_1 - \omega) + r'_2 \cdot \omega_{0H} \cdot \varphi_1]^2 + x_{кH}^2 \cdot \varphi_1^2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_1 - \omega)^2} \quad (4.14)$$

где ω_{0H} – синхронная скорость при номинальной частоте тока, рад/сек;

m – количество фаз в двигателе, принимаем $m = 3$;

U_{1H} – фазное напряжение, В;

r'_2 – активное сопротивление ротора, Ом;

x_k – индуктивное сопротивление при к.з, Ом.

Относительная частота для сети 25 Гц:

$$\varphi_2 = \frac{f}{f_H} \quad (4.15)$$

$$\varphi_2 = \frac{25}{50} = 0,5 \text{ Гц}$$

Угловая скорость вращения вала:

$$\omega_{025} = \omega_0 \cdot \varphi_1 \quad (4.16)$$

$$\omega_{025} = 157 \cdot 0,5 = 78,5 \text{ рад/сек}$$

Критический момент:

(4.17)

$$M_2 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot u_2^2 \cdot r'_2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_2 - \omega)}{[r_1 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_2 - \omega) + r'_2 \cdot \omega_{0H} \cdot \varphi_2]^2 + x_{кн}^2 \cdot \varphi_2^2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_2 - \omega)^2}$$

Относительная частота для сети 50 Гц:

$$\varphi_3 = \frac{f}{f_H} \quad (4.18)$$

$$\varphi_3 = \frac{50}{50} = 1 \text{ Гц}$$

Угловая скорость вращения вала:

$$\omega_{050} = \omega_0 \cdot \varphi_1 \quad (4.19)$$

$$\omega_{050} = 157 \cdot 1 = 157 \text{ рад/сек}$$

Критический момент:

(4.20)

$$M_3 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot u_3^2 \cdot r'_2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_3 - \omega)}{[r_1 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_3 - \omega) + r'_2 \cdot \omega_{0H} \cdot \varphi_3]^2 + x_{кн}^2 \cdot \varphi_3^2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_3 - \omega)^2}$$

Относительная частота для сети 100 Гц:

$$\varphi_4 = \frac{f}{f_H} \quad (4.21)$$

$$\varphi_4 = \frac{100}{50} = 2 \text{ Гц}$$

Угловая скорость вращения вала:

$$\omega_{0100} = \omega_0 \cdot \varphi_1 \quad (4.22)$$

$$\omega_{0100} = 157 \cdot 2 = 314 \text{ рад/сек}$$

Критический момент:

(4.23)

$$M_4 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot u_4^2 \cdot r'_2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_4 - \omega)}{[r_1 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_4 - \omega) + r'_2 \cdot \omega_{0H} \cdot \varphi_4]^2 + x_{KH}^2 \cdot \varphi_4^2 \cdot (\omega_{0H} \cdot \varphi_4 - \omega)^2}$$

Строим механическую характеристику при частотном регулировании синхронной скорости электродвигателя:

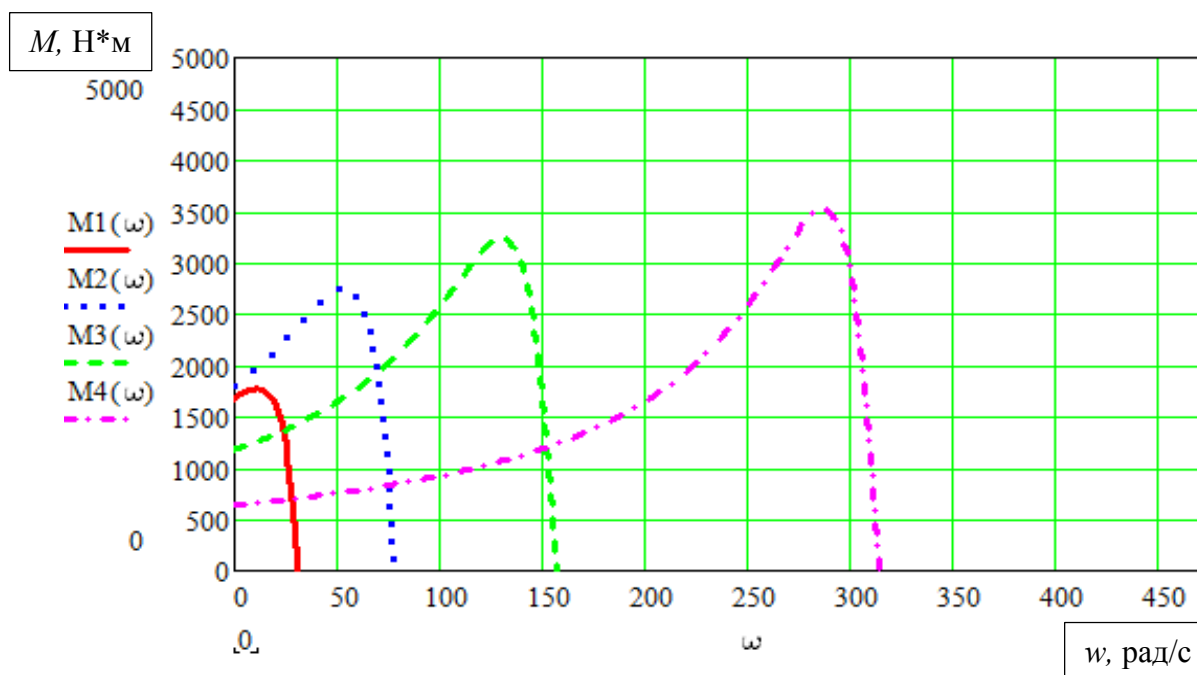


Рисунок 8. Механические характеристики двигателя при частотном регулировании по закону $\frac{U}{f} = const$ при частотах 10, 25, 50 и 100 Гц.

Список использованной литературы

1. Специальный электропривод: методические рекомендации по выполнению курсовой работы для студентов направления подготовки 35.03.02 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» очной и заочной форм обучения / сост. Н.А. Фалилеев, А.А. Васильков. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 23 с.

2. Симоненко, А.С. Основы электропривода [Текст] / учебное пособие для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» очной и заочной форм обучения / А.С. Симоненко - 2-е изд., стереотип. - Кострома: КГСХА, 2015. - 182 с. (Учебник и учебное пособие для вузов).

3. <http://www.online-electric.ru/dbase/adfr.php>

4. <http://1000a.ru/catalog/cilindricheskie-reduktory/>

5. <http://www.studfiles.ru/preview/5441520/page:18/>

6. <http://www.studfiles.ru/preview/5725728/page:11/>

					КР.41.702.01. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60