

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения»**

А.А. МАРТЫНОВ, О.Б. ЧЕРНЫШЕВА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2023 г

УДК 62-83.681.513.3

М29 А.А. Мартынов, О.Б. Чернышева

Проектирование асинхронных электроприводов. / А.А. Мартынов, О.Б. Чернышева. СПб.: ГУАП, 2023. 72с.: ил.

Рецензенты: доктор технических наук Сериков С.А.,
кандидат технических наук Булатов В.В.

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

В учебном пособии рассматриваются вопросы по основам проектирования асинхронных электроприводов с параметрическим (фазовым) и частотным управлением. Приведены методики расчета асинхронного электропривода для основных производственных механизмов – грузоподъемного, тележки мостового крана и вентилятора. Пособие содержит задания для проведения практических занятий и курсового проектирования.

Учебное пособие «Проектирование асинхронных электроприводов» предназначено для студентов, изучающих курсы «Проектирование электроприводов», «Проектирование и эксплуатация полупроводниковых преобразователей для электромеханотронных систем», «Проектирование и конструирование электромеханических систем специального назначения».

Введение

Асинхронные электроприводы являются важным элементом в промышленности и транспорте, так как они обеспечивают движение механизмов и устройств. Они широко используются в различных отраслях промышленности и благодаря своей эффективности и надежности стали незаменимым компонентом в автоматизации производства.

Проектирование асинхронных электроприводов остается актуальным в современной индустрии по нескольким причинам:

1. Энергоэффективность - являются одними из самых энергоэффективных приводов, что позволяет снизить энергопотребление и экономить ресурсы;

2. Надежность - имеют простую конструкцию и отсутствие щеток и коллекторов, что делает их более надежными и долговечными по сравнению с другими типами приводов;

3. Простота управления - легко управляются и могут быть интегрированы в автоматизированные системы с помощью различных контроллеров и программного обеспечения;

4. Широкое применение - используются во многих отраслях, включая промышленность, транспорт, энергетику, сельское хозяйство и другие. Они могут применяться для различных задач, таких как движение конвейеров, насосы, вентиляторы, компрессоры и т. д.

5. Развитие технологий - с появлением новых технологий и материалов проектирование асинхронных электроприводов становится еще более актуальным. Новые материалы позволяют создавать более компактные и легкие приводы, а новые технологии управления повышают их эффективность и функциональность.

Таким образом, проектирование асинхронных электроприводов остается актуальным и востребованным в современной промышленности благодаря их энергоэффективности, надежности, простоте управления, широкому применению и постоянному развитию новых технологий.

Учебное пособие «Проектирование асинхронных электроприводов» содержит необходимые теоретические сведения об устройстве, принципе работы электроприводов переменного тока. С целью повышения уровня подготовки студентов пособие включает в себя методики расчета асинхронных электроприводов с фазовым и частотным способами управления. Материал, представленный в пособии, может быть использован как при курсовом проектировании, так и при решении практических задач.

Учебное пособие содержит следующие разделы:

- расчет мощности и выбор двигателей при различных характерах нагрузки;
- асинхронный электропривод с частотным управлением;
- асинхронный электропривод с параметрическим (фазовым) управлением.

Также в пособии даны справочные данные по электрическим приводам переменного тока, параметры которых необходимо использовать в процессе решения задач.

В результате освоения дисциплины у студентов должны сформироваться и закрепиться компетенции, предусмотренные стандартами «Электроэнергетика и электротехника» и «Мехатроника и робототехника».

1. Расчет мощности и выбор двигателей при различных характерах нагрузки

Для выбора электродвигателя сначала необходимо рассчитывать требуемую мощность двигателя с учетом характера нагрузки, а затем предварительно выбранный двигатель необходимо проверить по условиям пуска, перегрузке и нагреву [1]. Если выбранный двигатель удовлетворяет условиям проверки, то на этом этап выбора заканчивается. Если выбранный двигатель не удовлетворяет условиям проверки, то следует выбрать другой двигатель (как правило, большей мощности) и повторить проверку.

При проектировании вновь создаваемого ЭП одновременно с выбором двигателя должны производиться выбор механической передачи между двигателем и исполнительным органом рабочей машины и расчет передаточного числа редуктора. Иногда для упрощения задачи выбор двигателя выполняется при известных параметрах механической передачи - ее передаточном числе или радиусе приведения и КПД.

1.1 Расчет мощности и выбор электродвигателя для электропривода грузоподъемного механизма

Рассмотрим кинематическую схему электропривода грузоподъемного механизма, приведенную на рис.1.1, а. Расчет следует начинать с приведения параметров нагрузки к валу электродвигателя, так как это показано на рис.1.1, б.

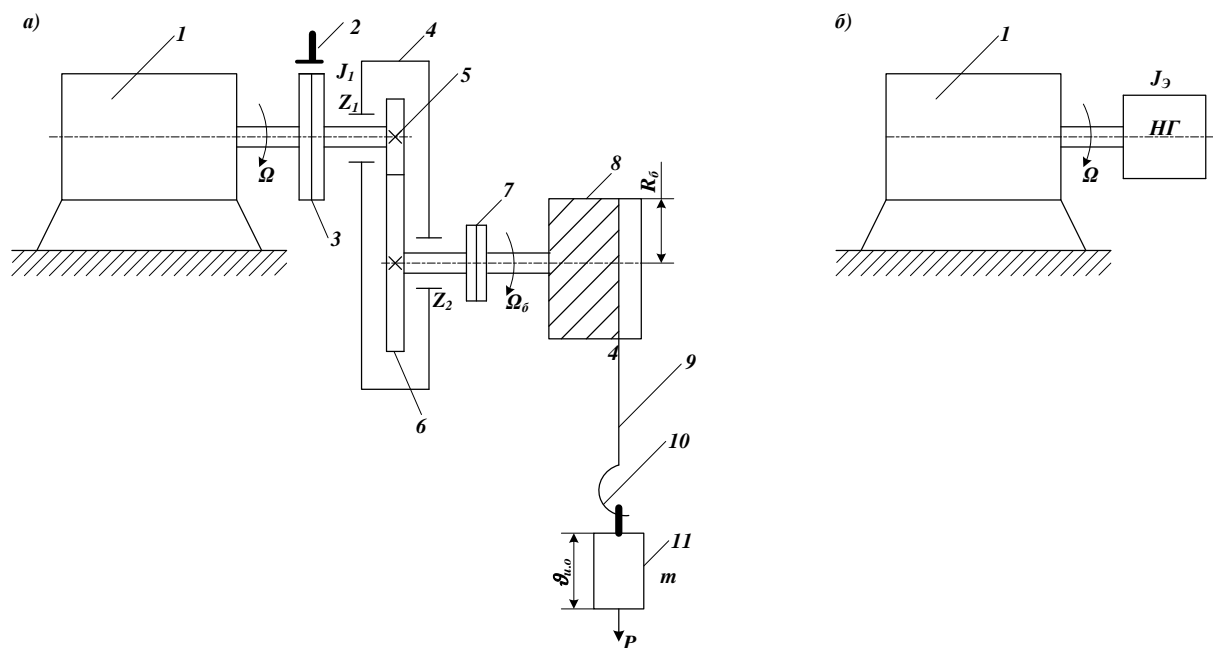


Рис. 1.1. Кинематическая схема электропривода грузоподъемного механизма, где введены следующие обозначения: а-исходная кинематическая схема; б- кинематическая схема с приведенными к валу двигателя параметрами нагрузки

Принятые на рис.1. 1 обозначения:

- 1 - Электродвигатель;
- 2 - Тормоз;
- 3 - Первая муфта;
- 4 - Редуктор;
- 5 - Первое колесо редуктора;
- 6 - Второе колесо;
- 7 - Вторая муфта;
- 8 - Барабан;
- 9 - Трос;
- 10 - Крюк;
- 11 - Груз.

Исходные данные для выбора электродвигателя:

- масса груза $m =$ кг;
- скорость подъема груза $v_n =$ м/с;
- группа классификации (режима) механизма по ИСО 4301/1.

По указанной в задании группы классификации (режима) необходимо установить продолжительность включения электропривода на одном цикле работы.

Взаимосвязь группы классификации (режима) и продолжительности включения приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Взаимосвязь группы классификации (режима) и продолжительности включения

Группа классификации (режима) механизма по ИСО 4301/1	Группа классификации (режима) механизма по ГОСТ	Продолжительность включения ПВ,%
М1-М4	Легкий (Л)	15
М5-М6	Средний (С)	25
М7-М8	Тяжелый (Т)	40

Необходимую мощность электродвигателя при подъеме груза определяем по максимальному усилию в канате:

$$P_{д} = F_{н} v_{п} = mgv_{п} / \eta, \quad (1.1)$$

где $F_{н} = mg$ – сила тяжести груза, Н;

$\eta = \eta_{р}\eta_{б}$, – результирующий КПД кинематической схемы ЭП;

$\eta_{р}$ и $\eta_{б}$ – КПД соответственно редуктора 4 и барабана 8.

На первом этапе проектирования необходимо задаться КПД редуктора и барабана, используя значения КПД механизмов передач, приведенные в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Ориентировочные значения КПД механизмов передач

Тип передачи	η_N
Цилиндрическая передача с нарезными прямыми зубьями	0,98
Цилиндрическая передача с косыми зубьями	0,97-0,98
Коническая зубчатая передача	0,97-0,98
Червячная передача	0,6-0,8
Ременная передача	0,94-0,98
Клиноременная передача	0,8-0,98
Цепная передача	0,98
Фрикционная передача	0,7-0,8
Цапфы опор:	
-плохая смазка	0,94
-хорошая смазка	0,97
-кольцевая смазка	0,98
-шариковый подшипник	0,99
Барабан	0,98

Электродвигатель выбираем по таблицам 5.1 и 5.2 в соответствии с расчетной мощностью и значением ПВ.

Паспортные данные выбранного двигателя:

- номинальная мощность двигателя $P_{дв N} =$ Вт;
- продолжительность включения ПВ= %;
- номинальная угловая скорость вращения двигателя $\Omega_{дN} =$ рад/с;
- номинальное линейное напряжение обмотки статора двигателя $U_{лN} =$ В;
- номинальное значение тока фазы обмотки статора двигателя $I_{фN} =$ А;
- номинальное значение скольжения, s_N ;
- активное сопротивление обмотки фазы статора $R_1 =$ Ом;
- номинальное значение коэффициента мощности, $\cos\phi$;

- момент инерции ротора двигателя $J_{дв} = \text{кгм}^2$.

Определим эквивалентный момент инерции ЭП с учетом приведения момента инерции нагрузки к валу двигателя:

$$J_{\text{э}} = J_{дв} + J_p + m \left(\frac{v_{и.о}}{\Omega_{дН}} \right)^2 = J_{дв} + J_p + m\rho^2, \text{ кгм}^2, \quad (1.2)$$

где J_p – момент инерции редуктора;

На начальном этапе проектирования следует задаться моментом инерции редуктора $J_p \approx 0,1J_{д}$.

Отношение скоростей $v_{п}/\Omega_{д}$ называется радиусом приведения (ρ), т.е.

$v_{п}/\Omega_{д} = R_{\delta}/i_p = \rho$ – радиус приведения;

R_{δ} – радиус барабана лебедки, м;

$i_p = Z_2/Z_1 = \Omega_{д}/\Omega_{\delta}$ – передаточное число редуктора.

Параметры R_{δ} и i_p определим ниже.

Приведенный к валу двигателя статический момент сопротивления нагрузки

$$M_c = mgv_{и.о}/(\Omega_{д}\eta) = FR_{\delta}/(i_p\eta_p), \text{ Н.} \quad (1.3)$$

где η_p – КПД редуктора;

Определим требуемое значение радиуса барабана.

Сначала следует выбрать стальной канат по допустимому разрывному усилию:

$$F_p > k_3 \cdot F_k,$$

где F_p – допустимое разрывное усилие в канате, Н;

k_3 – коэффициент запаса прочности каната на разрыв, зависящий от режима работы механизма, определяется по таблице 1.3.

Таблица 1.3

Минимальные значения коэффициента запаса прочности каната

Группа классификации механизма по ИСО 4301/1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Значения коэффициента запаса прочности для канатов	3,15	3,35	3,55	4,00	4,50	5,60	7,10	9,00

Максимальное рабочее усилие в канате, навиваемом на барабан при подъеме груза, определяется по формуле:

$$\text{для кранов: } F_{\text{к.кр}} = (m + m_{\text{к.п}})g / (a \cdot u \cdot \eta_{\text{общ}}), \text{ Н;} \quad (1.4)$$

$$\text{для строительных подъемников: } F_{\text{к.с.п}} = (m + m_{\text{г.п}})g / a \cdot u \cdot \eta_{\text{общ}}, \text{ Н,} \quad (1.5)$$

где $m_{\text{к.п}}$ – масса крюковой подвески, кг; $m_{\text{г.п}}$ – масса грузовой платформы, кг (при расчетах можно принять $m_{\text{г.п}} = 150$ кг; $m_{\text{к.п}} = (0,06 \dots 0,08)m$, кг; a – число ветвей каната, наматываемых на барабан; u – кратность полистава.

Необходимый диаметр каната и все его данные на основании расчетного разрывного усилия каната определяется по ГОСТ 2688-80, выборочные сведения из которого приведены в таблице 1.4. Условное обозначение выбранного стального каната приводятся в виде: d -Г-І-Н-1568 ГОСТ 2688-80,

где d – диаметр каната, мм;

Г- канат предназначен для подъема грузов;

І - обозначение марки стали проволоки для грузовых канатов;

Н – канат нераскручивающийся правой свивки прядей;

1568- маркировочная группа, МПа, по которой взяты диаметр каната и разрывное усилие.

Таблица 1.4

Разрывное усилие стальных канатов двойной свивки типа ЛК-Р.

Диаметр каната, мм	Масса 1 м каната, кг	Маркировочная группа			
		1372	1568	1764	1960
		Разрывное усилие, Н			
8,3	0,256	-	34800	38150	41600
9,1	0,305	-	41550	45450	49600
9,9	0,359	-	48850	53450	58350
11,0	0,462	-	62850	68800	75100
12,0	0,527	-	71750	78550	85750
13,0	0,597	71050	81250	89000	97000
14,0	0,728	86800	98950	108000	118000
15,0	0,804	100000	114500	125500	137000
16,5	1,025	121500	139000	152000	166000
18	1.220	145000	166000	181500	198000
19,5	1,405	167000	191000	209000	228000
21	1,635	194500	222000	234500	265500
22,5	1,850	220000	251000	275000	303500
23,5	2,110	250500	287000	314000	343000

25,5	2,390	284000	324500	355500	288500
27,0	2,585	319000	365000	399500	436500

Минимальный диаметр барабана определяется по формуле:

$$D_6 > h_1 d, \text{ мм,}$$

где h_1 – коэффициент выбора диаметра (см. таблицу 1.5); d – диаметр каната.

Таблица 1.5

Значение коэффициента выбора диаметра барабана

Группа классификации механизма по ИСО 4301/1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Значение коэффициента выбора диаметра барабана, h_1	11,2	12,5	14,0	16,0	18,0	22,0	22,4	25,0

Полученные значения D_6 увеличивают в большую сторону и принимают из ряда: 160, 200, 250, 320, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000.

Радиус барабана: $R_6 = D_6/2$.

Определить величину угловой скорости вращения вала барабана

$$\Omega_6 = v_{\text{п}} / R_6$$

и величину передаточного отношения редуктора: $i_p = \Omega_{\text{д}} / \Omega_6$.

Радиус приведения: $\rho = R_6 / i_p = v_{\text{п}} / \Omega_{\text{д}}$.

Далее следует выбрать редуктор, выпускаемый отечественной промышленностью [3]. Выбор производится по рассчитанным параметрам:

- передаточного отношения редуктора i_p ;
- мощности на быстроходном валу редуктора, равной мощности двигателя $P_{\text{дN}}$;
- номинальной скорости вращения двигателя n_{N} .

Пример: Определить мощность и выбрать серийный асинхронный двигатель и редуктор для лебедки при следующих исходных данных:

Масса поднимаемого груза $m=3000$ кг;

Скорость подъема груза $v_{\text{п}}=0,28$ м/с;

Группа классификации механизма – М3.

Решение:

Необходимую мощность электродвигателя при подъеме груза определяем по максимальному усилию в канате (1.1):

$$P_{д} = F_{н} v_{п} = mgv_{п} / \eta_{общ},$$

По таблице 1.2 определяем:

КПД барабана $\eta_{б} = 0,98$; КПД редуктора при цилиндрической передаче с нарезными прямыми зубьями $\eta_{р} = 0,98$. Тогда, $\eta_{общ} = \eta_{р} \eta_{б} = 0,98 \cdot 0,98 = 0,9604$.

Мощность двигателя:

$$P_{д} = 3000 \cdot 9,8 \cdot 0,28 / 0,9604 = 8,57 \text{ кВт.}$$

Выбираем асинхронный двигатель типа МТН 211-6 (ПВ=15%) с паспортными данными:

- номинальная мощность двигателя $P_{дв N} = 9,5 \text{ кВт}$;
- продолжительность включения ПВ= 15 %;
- номинальная частота вращения двигателя $n_N = 915 \text{ об/мин}$;
- номинальное линейное напряжение обмотки статора двигателя $U_{лN} = 380 \text{ В}$;
- номинальное значение тока фазы обмотки статора двигателя $I_{фN} = 18,5 \text{ А}$;
- номинальное значение скольжения, $S_N = 8,5\%$;
- номинальное значение коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,8$;
- момент инерции ротора двигателя $J_{дв} = 0,15 \text{ кгм}^2$.

Определяем кратность полиспаста – системы, состоящей из подвижных и неподвижных блоков, предназначенных для подъема грузов:

$$u = k_a / a,$$

где k_a – число ветвей, на которых подвешена крюковая подвеска или грузозахватывающее устройство, принимаем $k_a = 2$;

a – число ветвей каната, наматываемых на барабан, принимаем $a = 1$.

Тогда, $u = 2/1 = 2$.

Для выбора стального каната определим максимальное рабочее усилие в канате по формуле (1.4):

$$F_{к.кр} = (m + m_{к.п})g / (a \cdot u \cdot \eta_{общ}),$$

где $m_{к.п} = (0,06 \dots 0,08)m = 0,07 \cdot 3000 = 210 \text{ кг}$. Тогда,

$$F_{к.кр} = (3000 + 210) \cdot 9,8 / (1 \cdot 2 \cdot 0,9604) = 16377 \text{ Н.}$$

Допустимое разрывное усилие каната

$$F_p > k_3 \cdot F_{к.кр},$$

где $k_3 = 3,55$ – коэффициент запаса прочности каната (по таблице 1.3).

$$F_p > 3,55 \cdot 16377 = 58138,4 \text{ Н.}$$

По таблице 1.4 выбираем стальной канат двойной свивки типа ЛК-Р маркировочной группы 1568 с разрывным усилием 62850 Н и диаметром каната $d=11,0$ мм. Условное обозначение выбранного каната: 11-Г-I-H-1568. По таблице 1.5 значение коэффициента выбора диаметра барабана $h_1=14,0$, следовательно, минимальный диаметр барабана:

$$D_6 > h_1 d = 14,0 \cdot 11,0 = 154 \text{ мм.}$$

С учетом рекомендаций, принимаем $D_6=160$ мм.

Радиус барабана: $R_6 = D_6/2 = 160/2 = 80$ мм.

Скорость навивки каната на барабан: $v_k = v_n \cdot u = 0,28 \cdot 2 = 0,56$ м/с.

Угловая скорость вращения вала барабана: $\Omega_6 = v_k / R_6 = 0,56 / 0,08 = 7$ рад/с.

Величина передаточного отношения редуктора: $i_p = \Omega_d / \Omega_6 = 95,77 / 7 = 13,68$.

Синхронная угловая скорость вращения двигателя:

$$\Omega_d = \pi n_N / 30 = 3,14 \cdot 915 / 30 = 95,77 \text{ рад/с.}$$

Радиус приведения: $\rho = R_6 / i_p = v_n / \Omega_d = 80 / 13,68 = 5,84$ мм.

Выбираем цилиндрический двухступенчатый горизонтальный редуктор кранового типа Ц2-500, предназначенный для использования в подъемно-транспортном оборудовании, а также в качестве привода общего назначения.

Параметры выбранного редуктора:

Частота вращения входного вала - 1000 об/мин;

Режим работы – ПВ=15%;

Передаточное число редуктора: номинальное – 16, фактическое – 16,3;

КПД редуктора – 0,96;

Номинальный крутящий момент на выходном валу редуктора – 24,2 кНм.

В таблице 1.6 приведены варианты контрольных заданий для самостоятельной работы по теме «Выбор электродвигателя для электропривода лебедки».

Таблица 1.6

**Контрольные задания для самостоятельной работы по теме
«Выбор электродвигателя для электропривода лебедки»**

№ варианта	Масса поднимаемого груза, m , кг	Скорость подъема груза, м/с	Группа классификации механизма
1	500	0,33	М3
2	600	0,44	М4
3	700	0,55	М5
4	800	0,66	М2

5	900	0,77	M3
6	1000	0,70	M4
7	1100	0,60	M5
8	1200	0,50	M2
9	1300	0,40	M3
10	1400	0,30	M4
11	1500	0,36	M5
12	1600	0,46	M2
13	1700	0,56	M3
14	1800	0,66	M4
15	1900	0,76	M5
16	2000	0,75	M2
17	2100	0,65	M3
18	2200	0,55	M4
19	2300	0,45	M5
20	2400	0,39	M2
21	2500	0,34	M3
22	2600	0,44	M4
23	2700	0,48	M5
24	2800	0,38	M2
25	3000	0,28	M3

Порядок выполнения задания:

- Изучить устройство, кинематическую схему электропривода грузоподъемного механизма, принцип работы, вывод основных расчетных соотношений для расчета мощности асинхронного двигателя.
- Для заданного варианта задачи необходимо выполнить расчет:
 - мощность двигателя, $P_{дN}$;
 - диаметра каната, d ;
 - диаметр барабана $D_б$;
 - эквивалентный момент инерции, приведенный к валу двигателя, $J_э$;
 - передаточное отношение редуктора i_p и выбрать редуктор.

Все рассчитанные параметры свести в единую таблицу. Рассчитанные параметры электропривода являются неотъемлемой частью исходных данных для расчета параметров полупроводникового преобразователя асинхронного электропривода.

1.2. Расчет мощности и выбор электродвигателя для электропривода тележки мостового крана

На рис.1.2 приведен один из вариантов кинематической схемы электропривода тележки мостового крана.

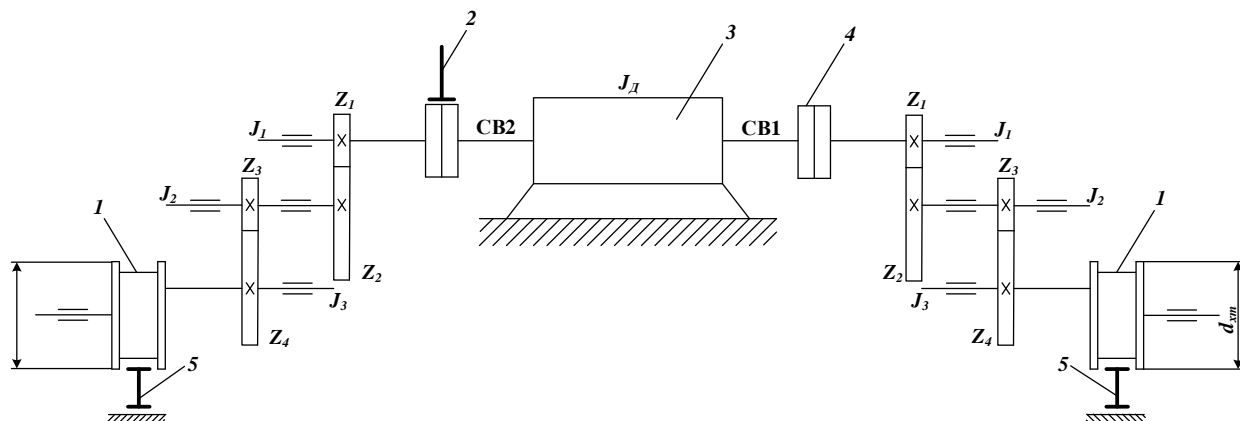


Рис.1.2. Кинематическая схема электропривода тележки мостового крана

Принятые на рис.1.2 обозначения:

- 1 – ходовое колесо;
- 2 – муфта тормозом;
- 3 – двигатель;
- 4 – муфта;
- 5 – рельс.

Электропривод содержит электродвигатель 3, две муфты 4, одна из них с тормозом 2, два редуктора, два ходовых колеса 1, передвигающихся по рельсам 5. Особенность этого варианта электропривода заключается в том, что электродвигатель выполнен с двумя выходами вала и имеет два редуктора.

Возможен вариант выполнения электропривода тележки мостового крана с одним редуктором, имеющим два выходных вала и электродвигателем с одним валом. Вращающий момент от каждого из выходных валов редуктора передается ходовым колесам с помощью трансмиссионного вала.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя являются нагрузочная диаграмма. Нагрузочная диаграмма электропривода тележки мостового крана представляет собой график изменения приведенных к валу двигателя статического и динамического моментов нагрузки во времени $M(t)$. Эта диаграмма рассчитывается на основании технологических данных, характеризующих работу машин и механизмов, и параметров механической передачи.

На рис. 1.3 приведена нагрузочная диаграмма тележки мостового крана, которая показывает изменение скорости вращения вала двигателя во времени $\Omega(t)$ на интервале одного периода работы электропривода.

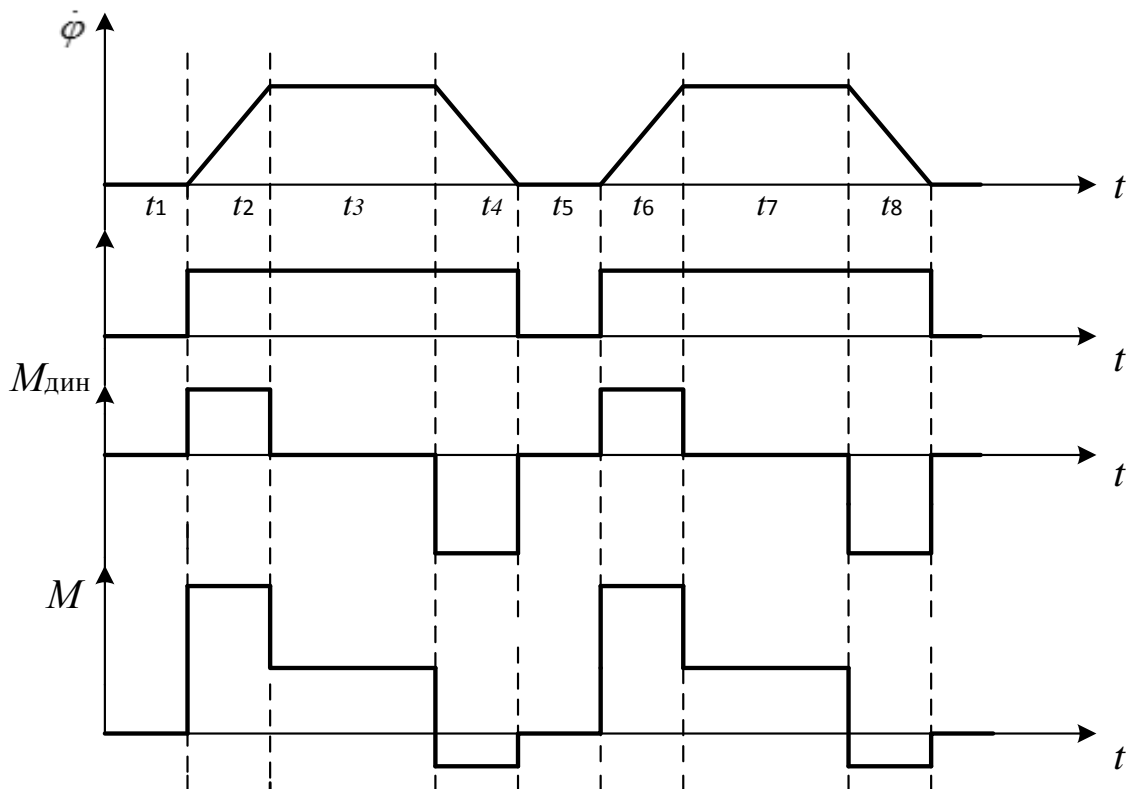


Рис.1.3. Тахограмма электропривода тележки мостового крана

Из рис.1.3 следует, что нагрузка электропривода тележки мостового крана имеет циклический характер.

Рабочий цикл ЭП разбит на следующие временные интервалы:

t_1 – пауза 1;

t_2 – пуск двигателя при наличии груза;

t_3 – движение с постоянной скоростью с грузом;

t_4 – торможение с грузом;

t_5 – пауза 2;

t_6 – пуск двигателя без груза;

t_7 – движение с постоянной скоростью без груза;

t_8 – торможение без груза.

Сумма времени: $t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 = T_{ц}$.

$T_{ц}$ – время периода одного цикла работы электропривода.

Значения временных интервалов времени $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ и t_8 подлежат расчету.

На интервалах времени паузы t_1 и t_5 момент двигателя равен нулю.

При пуске (интервалы времени t_2 и t_6) и торможении (интервалы времени t_4 и t_8) двигатель развивает максимально возможный момент

$$M_{д \max} = k_{\text{пер}} M_{д. \text{ ном}}, \quad (1.6)$$

где $k_{\text{пер}}$ – допустимый коэффициент перегрузки двигателя. Значение $k_{\text{пер}}$ может быть принято от 1,5 до 2,0. Принимаем, к примеру, $k_{\text{пер}} = 1,5$.

Таким образом,

$$M_{\text{э}2} = M_{\text{э}6} = M_{\text{э}4} = M_{\text{э}8} = M_{д \max} = 1,5 M_{д. \text{ ном}}. \quad (1.7)$$

На интервале времени t_3 при движении тележки с грузом с постоянной скоростью от двигателя требуется момент, равный статическому моменту сопротивления $M_{с.г}$, деленному на передаточное отношение редуктора i_p :

$$M'_{с.г} = M_{с.г} / i_p. \quad (1.8)$$

На интервале времени t_7 при движении тележки без груза с постоянной скоростью от двигателя требуется момент, равный статическому моменту сопротивления $M_{с.0}$, деленному на передаточное отношение редуктора i_p :

$$M'_{с0} = M_{с.0} / i_p. \quad (1.9)$$

При циклическом характере изменения нагрузки расчетная мощность двигателя

$$P_{\text{расч}} = M_{\text{расч}} \Omega_{\text{расч}} = k_3 M_{с.э} \Omega_{\text{уст}}, \quad (1.10)$$

где $M_{с.э}$ – эквивалентный за цикл момент сопротивления нагрузки;

k_3 – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя, когда он работает с повышенными моментами.

Ориентировочно расчетный момент двигателя должен удовлетворять условию

$$M_{\text{расч}} \geq k_3 M_{с.э}, \quad (1.11)$$

где $M_{с.э}$ – эквивалентный момент нагрузки; k_3 – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя, когда он работает с повышенными токами и моментами.

Эквивалентный момент нагрузки $M_{с.э}$ определяется как среднеквадратичная величина моментов на участках рабочего цикла электропривода:

$$M_{с.э} = \sqrt{\sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i / T_{ц}}, \quad (1.12)$$

где M_{ci} , t_i , – соответственно момент и длительность i -го участка тахограммы электропривода тележки мостового крана.

Расчетная мощность двигателя

$$P_{\text{расч}} = M_{\text{расч}} \Omega_{\text{расч}} = k_3 M_{\text{с.э}} \Omega_{\text{уст.}} \quad (1.13)$$

Рассмотрим методику расчета выбора асинхронного двигателя для электропривода тележки мостового крана на примере. Кинематическая схема электропривода приведена на рис.1.2.

Пример:

Исходные данные:

- масса полезного груза $m_T = 1000$ кг;
- скорость движения тележки $v_T = 0,70$ м/с;
- момент инерции муфты с тормозом на валу двигателя $J_{\text{м.т}} = 0,1$ кгм²;
- момент инерции ходового вала с муфтами и ходовыми колесами $J_{\text{х.к}} = 0,6$ кгм²;
- длина пролета моста $L = 30$ м.

Для выбора электродвигателя в первом приближении необходимо определить максимальное значение статического момента сопротивления при движении тележки с грузом.

На расстояние $l_p = L/2 = 30/2 = 15$ м в одну сторону тележка проходит с полным грузом, а в другую сторону без груза. Количество циклов в час $N = 30$. Определим по таблице 1.2 ориентировочное значение КПД редуктора при полной нагрузке, $\eta_p = 0,87$.

При расчете момента статической нагрузки электропривода необходимо использовать зависимости параметров тележки, приведенные в таблицах 1.7 и 1.8.

Таблица 1.7

Зависимость веса тележки крана от грузоподъемности

Показатель	Значения							
Грузоподъемность, кН	2	5	10	20	50	80	100	125
Вес тележки, кН	2,0	4,0	6,0	8,0	19,6	21,6	23,5	29,4

По таблице 1.7 определим вес тележки. При грузоподъемности крана

$$Q = m \cdot g = 1000 \cdot 9,8 = 9800 \text{ Н} = 9,8 \text{ кН}$$

вес тележки должен быть равен 6 кН.

В таблице 1.8 приведена зависимость диаметра колеса тележки от нагрузки на колесо.

Таблица 1.8

Зависимость диаметра колеса тележки от нагрузки на колесо

Показатель	Значения				
Нагрузка на колесо, $P_{к\max}$, кН	1...19	20...30	31...50	51...100	101...200
Диаметр колеса, D_k , см	16	18	22	26...40	41...50

Тележка имеет 4 ходовых колеса.

Максимальную нагрузку на одно ходовое колесо P_{\max} можно определить по формуле:

$$P_{\max}=(G_T+Q)/4=(6,0+9,8)/4=3,95 \text{ кН},$$

где Q – грузоподъемность крана, кН;

G_T – вес тележки с учетом подвески, кН.

Величина максимальной нагрузки на колесо определяется по формуле:

$$P_{к\max}=P_{\max}k_n=3,95 \cdot 1,1=4,345 \text{ кН},$$

где $k_n=1,1$ - коэффициент неравномерности распределения нагрузки.

По таблице 1.9 определим диаметр ходового колеса тележки: $D_k=16$ см.

Диаметр цапфы ходового колеса принимаем равным $0,4 \cdot D_k$, т.е. $d_{ц}=0,064$ см.

Угловая скорость вращения колеса: $\Omega_k=v_T/R_{x.k}=0,70/0,08=8,75$ рад/с.

Для выбора электродвигателя при циклическом изменении момента нагрузки необходимо использовать значения моментов сопротивления $M(t)$ на интервалах времени рабочего цикла.

Определим величину статического момента сопротивления при движении тележки с грузом по формуле (1.14):

$$M_{с.г}=k_p g(m_T + m_T)(0,5\mu_c d_{ц} + f_k), \quad (1.14)$$

Момент сопротивления при движении тележки с грузом

$$M_{с.г}=k_p g(m_T + m_T)(0,5\mu_c d_{ц} + f_k)=2,2 \cdot 9,8(1000+600)(0,5 \cdot 0,01 \cdot 0,08+0,05)=1743 \text{ Нм},$$

где μ_c – коэффициент трения скольжения;

$g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

k_p – коэффициент, учитывающий трение реборд ходовых колес о рельсы, обычно $k_p=2, \dots, 2,5$;

$d_{ц}$ – диаметр цапфы, в первом приближении можно принять равным:

$$0,5D_{x.k}=0,08\text{м};$$

f_k – коэффициент трения качения.

Значения коэффициентов μ_c и f_k приведены в таблицах 1.9 и 1.10, соответственно.

Таблица 1.9

Значения коэффициента трения скольжения подшипников

Тип подшипника	Коэффициент трения скольжения μ_c
Подшипники скольжения	0,07-0,1
Шариковые и роликовые подшипники	0,005-0,01
Подшипники из древеспластмасс	0,01-0,02

Таблица 1.10

Значение коэффициента трения качения

Соприкасающиеся поверхности	Коэффициент трения качения, f_k
Необработанные колеса по рельсам	0,1
Обработанные колеса по рельсам	0,05

Момент сопротивления при движении тележки без груза:

$$M_{co}=k_p g m_T (0,5 \mu_c d_{ц} + f_k). \quad (1.15)$$

$$M_{c.o} = k_p g m_T (0,5 \mu_c d_{ц} + f_k) = 2,2 \cdot 9,8 \cdot 600 \cdot (0,5 \cdot 0,01 \cdot 0,06 + 0,05) = 653,625 \text{ Нм}$$

Сила сопротивления движению колеса, радиус которого $R_{x.k}=0,08$ м:

$$F_c = M_c / R_{x.k} = 1743 / 0,08 = 21787 \text{ Н.}$$

Полезная мощность, затрачиваемая на перемещение тележки с грузом:

$$P_{п} = F_c v_T = 21787 \cdot 0,70 = 15251 \text{ Вт.}$$

Максимальное значение мощности двигателя с учетом КПД редуктора η_p :

$$P_{дм} = P_{п} / \eta_p = 15251 / 0,97 = 15723 \text{ Вт.}$$

При выборе двигателя следует учитывать циклический характер изменения нагрузки тележки мостового крана. Номинальную мощность двигателя в первом приближении можно принять примерно равной $0,7 P_{дм}$.

$$P_{дN} = 0,7 \cdot 15723 = 11000 \text{ Вт.}$$

По справочным данным, приведенным в разделе 5, выбираем асинхронный двигатель МТКВ412-6.

Паспортные данные двигателя:

- номинальная мощность $P_N=11$ кВт;
- номинальное линейное напряжение $U_{лN}=380$ В;
- номинальное значение частоты напряжения $f_N=50$ Гц;
- скорость вращения $n_N=975$ об/мин;
- пусковой момент $M_{п}=1,2$ о.е.;
- минимальный момент $M_{\min}=1,0$ о.е.;
- максимальный (критический) момент $M_{кр}=2,0$ о.е.;
- момент инерции ротора $J=0,637$ кгм².

Угловая скорость вращения ротора двигателя: $\Omega_{д}=2\pi \cdot 975/60=102$ рад/с.

Номинальный момент двигателя: $M_N= P_N/ \Omega_{дN}=11000/102=107$ Нм.

Передаточное отношение редуктора: $i_p= \Omega_{д}/ \Omega_{к}=102/8,75=11,66$.

По справочному пособию [3] выбираем редуктор типа Ц2-250.

Основные характеристики редуктора

- передаточное отношение $i_p=12,4$;
- мощность на быстроходном валу $P_1=14$ кВт;
- скорость быстроходного вала $n_1=1000$ об/мин.

Приведенный к валу электродвигателя статический момент нагрузки (тележка с грузом):

$$M'_{с.г}= M_{с.г}/i_p=1743/12,4=140,56 \text{ Нм.}$$

Приведенный к валу электродвигателя статический момент нагрузки (тележка без груза):

$$M'_{с.о}= M_{с.о}/i_p=653,625/12,4=52,66 \text{ Нм.}$$

Определим приведенный к валу двигателя момент инерции тележки с грузом

$$J_{\text{э}}=J_{\text{дв}} + J_{\text{м.т}} + \frac{J_{\text{х.в}}}{i_p^2} + (m_{\text{г}} + m_{\text{т}}) \left(\frac{v_{\text{т}}}{\Omega_{\text{дN}}} \right)^2, \text{ кгм}^2, \quad (1.16)$$

$$\begin{aligned} J_{\text{э}} &= J_{\text{дв}} + J_{\text{м.т}} + \frac{J_{\text{х.в}}}{i_p^2} + (m_{\text{г}} + m_{\text{т}}) \left(\frac{v_{\text{т}}}{\Omega_{\text{дN}}} \right)^2 = \\ &= 0,22 + 0,1 + 0,6 / 8,84^2 + 1600(0,7 / 102)^2 = 0,4029 \text{ кгм}^2. \end{aligned}$$

Определим приведенный к валу двигателя момент инерции тележки без груза

$$J_{\text{э}}=J_{\text{дв}} + J_{\text{м.т}} + \frac{J_{\text{х.в}}}{i_p^2} + m_{\text{т}} \left(\frac{v_{\text{т}}}{\Omega_{\text{дN}}} \right)^2, \text{ кгм}^2, \quad (1.17)$$

$$J_{\text{э}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{м.т}} + \frac{J_{\text{х.в}}}{i_{\text{п}}^2} + m_{\text{т}} \left(\frac{v_{\text{т}}}{\Omega_{\text{дN}}} \right)^2 =$$

$$= 0,22 + 0,1 + 0,6 / 8,84^2 + 1000(0,7 / 102)^2 = 0,374 \text{ кгм}^2.$$

Принимая момент двигателя на интервале пуска электропривода неизменным и равным $1,5M_{\text{д.ном}}$, определим время пуска тележки с грузом $t_{\text{п.г}}$ и пуска без груза $t_{\text{п.0}}$ до номинальной скорости:

$$t_{\text{п.г}} = \frac{J_{\text{э.г}} \omega_N}{M_{\text{дmax}} - M_{\text{с.г}}} = \frac{J_{\text{э.г}} \omega_N}{1,5M_{\text{дN}} - M_{\text{сг}}} = \frac{0,4029 \cdot 102}{160,5 - 152} = 5,48 \text{ с.} \quad (1.18)$$

$$t_{\text{п.0}} = \frac{J_{\text{э.0}} \omega_N}{M_{\text{дmax}} - M_{\text{с.0}}} = \frac{J_{\text{э.0}} \omega_N}{1,5M_{\text{дN}} - M_{\text{с0}}} = \frac{0,374 \cdot 102}{165 - 57,3} = 0,369 \text{ с.} \quad (1.19)$$

Путь, пройденный тележкой при пуске до установившейся скорости $v_{\text{т}}$ с грузом, $l_{\text{п.г}}$ и без груза $l_{\text{п.0}}$:

$$l_{\text{п.г}} = v_{\text{т}} * t_{\text{п.г}} / 2 = 0,7 * 5,48 / 2 = 1,918 \text{ м;} \quad (1.20)$$

$$l_{\text{п.0}} = v_{\text{т}} * t_{\text{п.0}} / 2 = 0,7 * 0,369 / 2 = 0,129 \text{ м.} \quad (1.21)$$

Принимая, что торможение тележки производится за счет перевода электродвигателя в генераторный режим при тормозном моменте двигателя, равном $1,5 M_{\text{дN}}$, определим время торможения тележки с полной скорости до нуля с грузом

$t_{\text{т.г}}$ и без груза $t_{\text{т.0}}$:

$$t_{\text{т.г}} = \frac{J_{\text{э.г}} \omega_N}{M_{\text{дmax}} + M_{\text{с.г}}} = \frac{J_{\text{э.г}} \omega_N}{1,5M_{\text{дN}} + M_{\text{с.г}}} = \frac{0,4029 \cdot 102}{160,5 + 152} = 0,131 \text{ с.} \quad (1.22)$$

$$t_{\text{т.0}} = \frac{J_{\text{э.0}} \omega_N}{M_{\text{дmax}} + M_{\text{с.0}}} = \frac{J_{\text{э.0}} \omega_N}{1,5M_{\text{дN}} + M_{\text{с0}}} = \frac{0,374 \cdot 102}{160,5 + 57,3} = 0,175 \text{ с.} \quad (1.23)$$

Путь пройденный тележкой при торможении с грузом, $l_{\text{т.г}}$ и без груза $l_{\text{т.0}}$:

$$l_{\text{т.г}} = v_{\text{т}} * t_{\text{т.г}} / 2 = 0,7 * 0,131 / 2 = 0,046 \text{ м;} \quad (1.24)$$

$$l_{\text{т.0}} = v_{\text{т}} * t_{\text{т.0}} / 2 = 0,7 * 0,175 / 2 = 0,061 \text{ м.} \quad (1.25)$$

Путь пройденный тележкой при установившемся движении с грузом и без груза:

$$l_{\text{у.г}} = l_{\text{р}} - l_{\text{п.г}} - l_{\text{т.г}} = 15 - 1,918 - 0,129 = 12,953 \text{ м.}$$

$$l_{\text{у0}} = l_{\text{р}} - l_{\text{п.0}} - l_{\text{т.0}} = 15 - 0,046 - 0,061 = 14,9 \text{ м.}$$

Время установившегося движения тележки с грузом и без груза:

$$t_{\text{у.г}} = l_{\text{у.г}} / v_{\text{т}} = 12,953 / 0,7 = 18,504 \text{ с.}$$

$$t_{y0} = l_{y.0} / v_T = 14,9 / 0,7 = 21,28 \text{ с.}$$

Время одного рабочего цикла:

$$T_{ц} = 3600 / 30 = 120 \text{ с.}$$

Суммарное время пауз в одном рабочем цикле:

$$t_{п} = T_{ц} - t_{п.г.} - t_{п.0} - t_{y.г.} - t_{y0} - t_{т.г.} - t_{т0} = 120 - 5,48 - 0,369 - 18,504 - 21,28 - 0,131 - 0,175 = 74,061 \text{ с.}$$

Поскольку в рабочем цикле две паузы, принимаем длительность этих пауз равными

$$t_1 = t_5 = t_{п} / 2 = 37,03 \text{ с.}$$

Таким образом, рассчитаны значения всех временных интервалов рабочего цикла.

Относительная расчетная продолжительность включения двигателя составит

$$ПВ_p = t_p / T_{ц} = (T_{ц} - t_{п}) / T_{ц} = (120 - 74,061) / 120 = 0,358 = 38,3\%. \quad (1.26)$$

Следовательно, двигатель необходимо выбирать на стандартное значение $ПВ = 40\%$.

Определим эквивалентный момент двигателя на рабочем цикле:

$$M_э = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + M_4^2 \cdot t_4 + M_5^2 \cdot t_5 + M_6^2 \cdot t_6 + M_7^2 \cdot t_7 + M_8^2 \cdot t_8}{T_{ц}}} \quad (1.27)$$

$$M_э = \sqrt{\frac{0 + 141166 + 365506 + 3774 + 0 + 9505 + 59011 + 4508}{120}} = 69,73 \text{ Нм.}$$

Сравним полученное значение $M_э = 69,73 \text{ Нм}$ с номинальным значением момента двигателя $M_N = 107,8 \text{ Нм}$. Коэффициент запаса двигателя по моменту, $M_N / M_э = 1,546$, обеспечивает условие проверки двигателя на нагрев.

В таблице 1.11 приведены варианты контрольных заданий для самостоятельной работы «Выбор электродвигателя для электропривода тележки мостового крана».

Таблица 1.11

**Контрольные задания для самостоятельной работы по теме
«Выбор электродвигателя для электропривода тележки мостового крана»**

№ варианта	Масса полезного груза, m_r , кг	Скорость движения тележки, м/с	Длина пролета моста, м	Момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	
				$J_{м.т}$	$J_{х.к}$
1	500	0,3	20	0,10	0,90

2	600	0,4	22	0,11	0,89
3	700	0,5	24	0,12	0,88
4	800	0,6	26	0,13	0,87
5	900	0,7	28	0,14	0,86
6	1000	0,8	30	0,15	0,85
7	1100	0,9	32	0,16	0,84
8	1200	1,0	34	0,17	0,83
9	1300	0,9	36	0,10	0,82
10	1400	0,8	38	0,11	0,81
11	1500	0,7	40	0,12	0,80
12	1600	0,6	38	0,13	0,79
13	1700	0,5	36	0,14	0,78
14	1800	0,4	34	0,15	0,77
15	1900	0,3	32	0,16	0,76
16	2000	0,4	30	0,17	0,75
17	1850	0,5	28	0,10	0,74
18	1750	0,6	26	0,11	0,73
19	1650	0,7	24	0,12	0,72
20	1550	0,8	22	0,13	0,71
21	1450	0,9	20	0,14	0,70
22	1350	1,0	18	0,15	0,69
23	1250	0,9	16	0,16	0,68
24	1150	0,8	21	0,17	0,67
25	1050	0,7	23	0,10	0,66
26	950	0,6	25	0,11	0,65

Порядок выполнения задания:

- Изучить устройство, кинематическую схему электропривода тележки мостового крана, принцип работы, вывод основных расчетных соотношений для расчета мощности асинхронного двигателя.
- Для заданного варианта задачи необходимо выполнить расчет:
 - статического момента сопротивления при движении тележки с грузом;
 - статического момента сопротивления при движении тележки без груза;

- мощности двигателя, $P_{дN}$;
- передаточного отношения редуктора i_p и выбрать редуктор;
- приведенного к валу двигателя эквивалентный момент инерции тележки с грузом;
- приведенного к валу двигателя эквивалентный момент инерции тележки без груза;
- значение временных интервалов рабочего цикла $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ и t_8 ;
- значение эквивалентных моментов $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7$ и M_8 на соответствующих временных интервалах рабочего цикла $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$ и t_8 ;
- рассчитать эквивалентный момент нагрузки и сравнить его величину с номинальным моментом двигателя.

Сделать заключение по проверке двигателя на нагрев.

Все рассчитанные параметры свести в единую таблицу. Рассчитанные параметры электропривода являются неотъемлемой частью исходных данных для расчета параметров полупроводникового преобразователя асинхронного электропривода.

1.3. Расчет мощности и выбор электродвигателя для электропривода вентилятора

Основным параметром, характеризующим работу вентилятора, является его производительность (количество подаваемого воздуха за единицу времени). Требуемая производительность определяется из учета объема воздуха для создания в помещении оптимальных условий воздушной среды.

При работе в обычном режиме производительность требуется регулировать (работать на меньшей производительности) для создания комфортных условий воздушной среды и для обеспечения энергосбережения. В случае аварийных режимов приходится увеличивать производительность относительно номинального режима работы вентилятора. Такое увеличение может составлять до 30% от номинального значения.

С учетом этого электропривод вентилятора должен быть регулируемым по скорости. Регулирование скорости асинхронного двигателя возможно частотным методом, при котором одновременно регулируют напряжение и частоту с помощью преобразователя частоты. Возможно регулирование скорости вращения асинхронного двигателя путем регулирования только величины напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронного

двигателя, при постоянной и равной номинальной частоте. Регулирование напряжения осуществляют с помощью тиристорного регулятора напряжения.

Если сравнивать эти два метода по стоимости полупроводниковых преобразователей, то совершенно очевидно, что стоимость тиристорного регулятора напряжения существенно меньше стоимости преобразователя частоты. С учетом того, что диапазон регулирования скорости вращения вентилятора не велик и не превышает 1,5-2, асинхронный электропривод вентилятора целесообразно строить по схеме электропривода с тиристорным регулятором напряжения.

Мощность двигателя электропривода вентилятора без редуктора (без ременной передачи) рассчитывается по формуле:

$$P_{д} = k_3 QH / \eta_{в}, \quad (1.28)$$

где Q – производительность вентилятора, м³/с;

H – напор (давление) газа, Па;

$k_3 = 1,1-1,5$ – коэффициент запаса;

$\eta_{в} = 0,4-0,85$ – КПД осевого вентилятора;

$\eta_{в} = 0,4-0,7$ – КПД центробежного вентилятора.

Напор газа H состоит из двух составляющих – статической H_c и динамической H_d : $H = H_c + H_d$.

Статическая составляющая напора H_c расходуется на преодоление сопротивления сети воздуховода, динамическая составляющая напора H_d , определяется динамическим давлением на выходе из воздуховода и может быть определено по формуле:

$$H_d = \gamma \cdot v^2 / 2, \text{ Па}, \quad (1.29)$$

где $\gamma = 1,293$, кг/м³ - удельный вес воздуха;

v – скорость потока воздуха в воздуховоде, м/с.

Для справки: 1 Па = 1 Н/м².

Составляющая напора H_c рассчитывается для каждой сети, исходя из конструктивной схемы воздуховода. При отсутствии конструктивной схемы воздуховода величина H_c задается в задании практической работы без аналитического расчета.

Мощность двигателя электропривода вентилятора с ременной передачей рассчитывается по формуле:

$$P_{д} = k_3 QH / (\eta_{в} \cdot \eta_{п}), \quad (1.30)$$

где $\eta_{п} = 0,92 \div 0,94$ — КПД клиноременной передачи;

$\eta_{п} = 0,87 \div 0,9$ — КПД плоскоремной передачи.

Производительность вентилятора может быть определена по формуле:

$$Q=S \cdot v, \quad (1.31)$$

где S - площадь сечения трубы вентилятора, м^2 :

$$S= \pi \cdot D_{\text{тр}}^2/4,$$

где $D_{\text{тр}}$ - диаметр трубы вентилятора, м.

Выбор двигателя следует производить по мощности (1.30) и скорости вращения (1.32). Требуемую скорость вращения двигателя можно определить по формуле:

$$n=60 \cdot v/(\pi \cdot D_{\text{тр}}), \quad (1.32)$$

По справочным данным, приведенным в разделе 5, выбираем асинхронный двигатель на рассчитанные значения мощности и скорости.

Пример:

Определить мощность и выбрать серийный асинхронный двигатель для электропривода вентилятора при следующих исходных данных:

Диаметр трубы вентилятора $D_{\text{тр}} = 460 \text{ мм} = 0,46 \text{ м}$;

Скорость потока воздуха в воздуховоде $v = 24 \text{ м/с}$;

Статическая составляющая напора $H_c = 1428 \text{ Па}$.

Решение:

Определим площадь сечения S трубы вентилятора:

$$S= \pi \cdot D_{\text{тр}}^2/4 = 3,14 \cdot 0,46^2/4 = 0,166 \text{ м}^2,$$

Тогда, производительность вентилятора по формуле (1.31):

$$Q=S \cdot v = 0,166 \cdot 24 = 3,98 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Динамическая составляющая напора H_d :

$$H_d= \gamma \cdot v^2 /2 = 1,293 \cdot 24^2/2 = 372,4 \text{ Па}.$$

Статическая составляющая напора: $H_c = 1428 \text{ Па}$.

Напор газа:

$$H= H_c+ H_d= 372,4+1428 = 1800,4 \text{ Па}.$$

Принимаем, коэффициент запаса $k_3 = 1,5$; КПД вентилятора $\eta_v = 0,65$.

Мощность двигателя электропривода вентилятора без редуктора (без ременной передачи) определим по формуле (1.28):

$$P_d= k_3 QH/\eta_v = 1,5 \cdot 3,98 \cdot 1800,4/0,65 = 16,5 \text{ кВт}.$$

Требуемая скорость вращения двигателя:

$$n=60 \cdot v/(\pi \cdot D_{\text{тр}})=60 \cdot 24/(3,14 \cdot 0,46)=996,5 \text{ об/мин.}$$

Выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А180М6У3 с параметрами:

- номинальная мощность двигателя $P_N = 18,5$ кВт;
- номинальная частота вращения $n = 1000$ об/мин;
- номинальный фазный ток $I_{\text{фN}} = 36,6$ А;
- КПД $\eta = 88,0$ %;
- скольжение $s = 2,7$ %;
- коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,87$.

В таблице 1.12 приведены варианты контрольных заданий для самостоятельной работы по теме «Выбор электродвигателя для электропривода вентилятора».

Таблица 1.12

**Контрольные задания для самостоятельной работы по теме
«Выбор электродвигателя для электропривода вентилятора»**

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D_{\text{тр}}$, мм	200	210	220	230	240	250	260	270	280
v , м/с	10	12	14	15	16	17	18	19	20
H_c , Па	1036	1207	1274	1255	1335	1314	1491	1467	1442

№ вар.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$D_{\text{тр}}$, мм	290	300	310	320	330	340	350	360	370
v , м/с	21	22	23	24	25	24	23	22	21
H_c , Па	1415	1488	1459	1428	1447	1428	1459	1488	1415

№ вар.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$D_{\text{тр}}$, мм	380	390	400	410	420	430	440	450	460
v , м/с	20	21	22	23	24	25	26	25	24
H_c , Па	1442	1415	1488	1459	1428	1447	1463	1447	1428

Порядок выполнения задания:

- Изучить устройство, кинематическую схему электропривода вентилятора, принцип работы, вывод основных расчетных соотношений для расчета мощности асинхронного двигателя.

- Для заданного варианта задачи необходимо выполнить расчет:
 - площади трубы $S_{\text{тр}}$;
 - производительности вентилятора Q ;
 - динамическую составляющую напора $H_{\text{д}}$;
 - полный напор H ;
 - требуемую скорость вращения двигателя;
 - мощности двигателя, $P_{\text{дн}}$;
 - выбрать двигатель и записать его паспортные данные.

Все рассчитанные параметры свести в единую таблицу. Рассчитанные параметры электропривода являются неотъемлемой частью исходных данных для расчета параметров полупроводникового преобразователя асинхронного электропривода с параметрическим (фазовым) управлением.

2. Асинхронный электропривод с параметрическим (фазовым) управлением

Рассмотрим особенности применения параметрического управления асинхронного двигателя, суть которого заключается в регулировании величины напряжения, подаваемого на обмотки статора асинхронного двигателя. В настоящее время в качестве регуляторов переменного напряжения находят применение тиристорные регуляторы напряжения ТРН. В асинхронном электроприводе с фазовым управлением тиристорные регуляторы напряжения включаются последовательно с обмоткой статора электродвигателя. Очевидным достоинством этого электропривода являются низкая стоимость, высокая надежность и хорошие масса- габаритные показатели. На рис.2.1 приведены примеры наиболее распространенных силовых схем асинхронного электропривода (АЭП) с фазовым управлением. Схема, представленная на рис. 2.1, *а*, является нереверсивной, а схема рис.2.1, *б* – реверсивной.

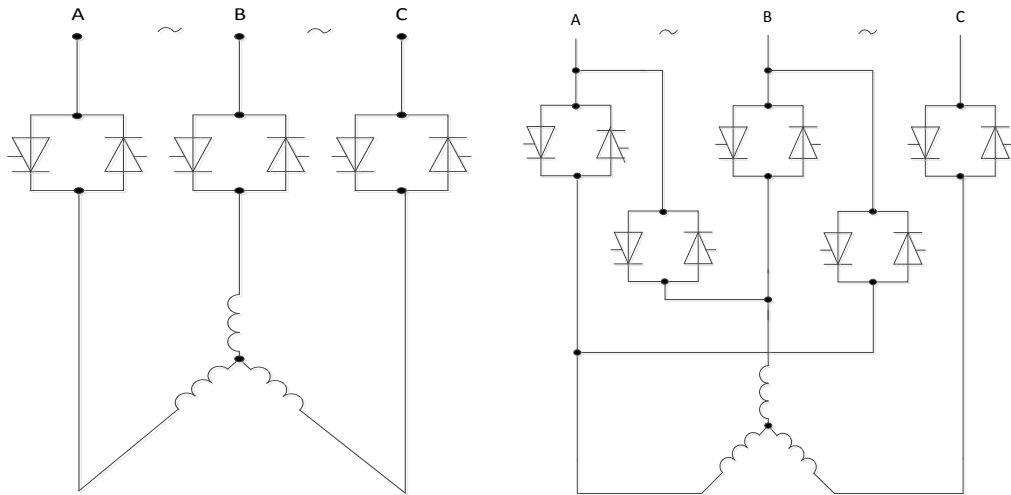


Рис.2.1. Силовые схемы трехфазных тиристорных регуляторов переменного напряжения: а-неревверсивная схема, б- реверсивная схема

Регулирование напряжения, подаваемого на обмотку статора асинхронного двигателя, осуществляется путем изменения фазового положения импульсов управления тиристоров силовой схемы, т.е. путем изменения величины угла регулирования α в пределах $(0^\circ < \alpha < 180^\circ)$.

Форма кривой тока и напряжения фазы зависит как от характера нагрузки, так и от схемы ТРН. На рис.2.2 приведены кривые тока фазы i_ϕ и напряжения u_ϕ при активной нагрузке силовой схемы однофазного регулятора напряжения. На рис.2.3 приведены кривые i_ϕ и u_ϕ при активно-индуктивном характере нагрузки для той же силовой схемы ТРН.

Регулировочная характеристика ТРН представляет собой зависимость действующего напряжения нагрузки $U_{нр}$ от угла α , т.е. $U_{нр} = f(\alpha)$ при постоянном напряжении питающей сети ($U = U_N = \text{const}$) и постоянном токе нагрузки ($I_{нр} = \text{const}$).

При чисто активном характере нагрузки зависимость $U_{нр} = f(\alpha)$ находят из соотношения:

$$U_{нр} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U)^2 \sin^2 \omega t d\omega t}.$$

В относительных единицах:

$$\frac{U_{нр}}{U} = \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + 0,5 \sin 2\alpha)}, \quad (2.1)$$

где U – действующее значение переменного напряжения на входе ТРН.

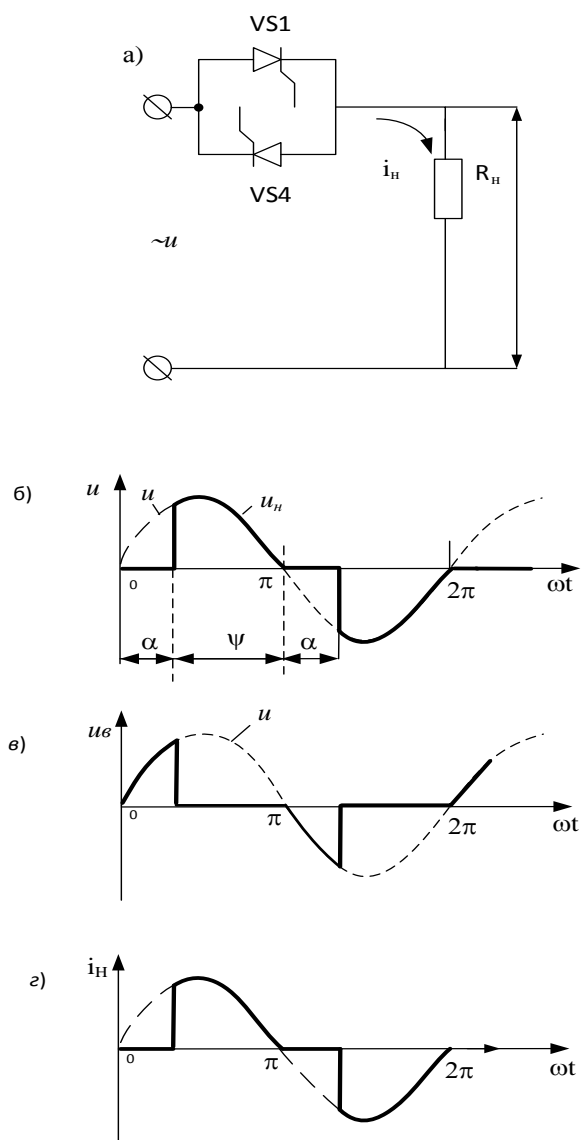


Рис.2.2. Схема (а) и временные диаграммы (б, в, г) однофазного ТРН при работе на активную нагрузку: б - напряжение нагрузки; в - напряжение на вентиле; г - ток нагрузки

Наличие индуктивности в цепи нагрузки вносит отличие в характер изменения тока нагрузки и напряжения.

Действующее значение напряжения нагрузки определяется по формуле:

$$U_{нр} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\delta} (\sqrt{2}U)^2 \sin^2 \omega t d\omega t}.$$

В относительных единицах:

$$\frac{U_{нр}}{U} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - (\alpha - \delta) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\delta \right]}. \quad (2.2)$$

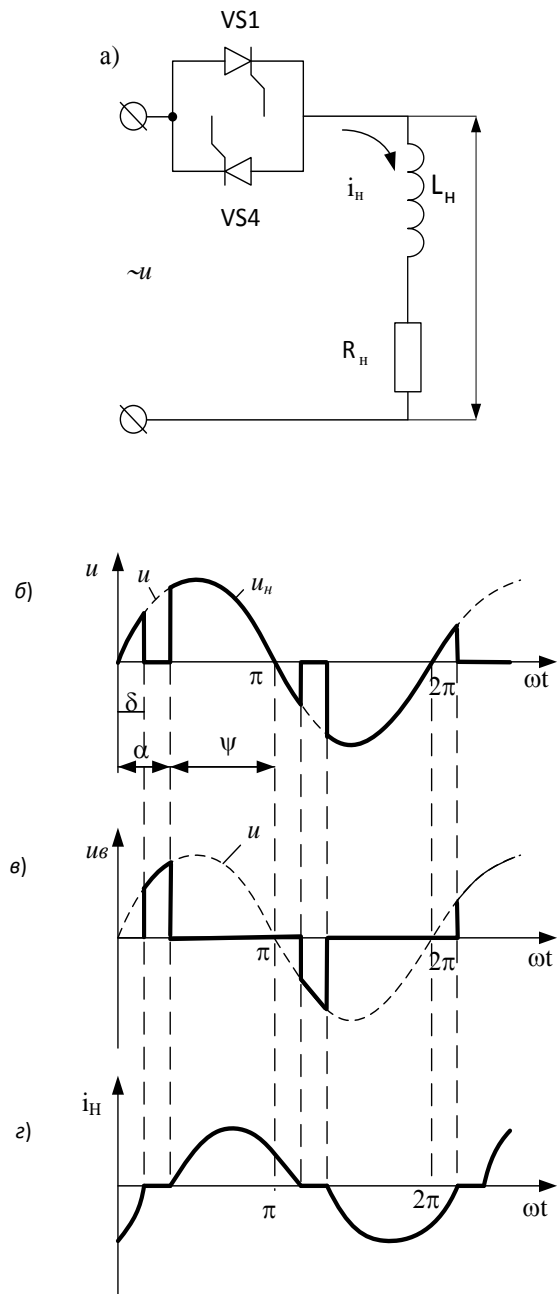


Рис.2.3. Схема (а) и временные диаграммы (б, в, г) однофазного ТРН при работе на активно–индуктивную нагрузку: u – напряжение питающей сети; б - напряжение нагрузки, u_{HT} ; u_B – напряжение на тиристоре силовой схемы (в); i_{HT} – ток нагрузки (г); α – угол управления; Ψ – длительность открытого состояния тиристора; δ – длительность проводящего состояния тиристора после смены знака напряжения питающей сети

Вид регулировочной характеристики приведен на рис. 2.4.

Расчет загрузки тиристорov по току и напряжению и их выбор

Выбор тиристорov ТРН производится по двум параметрам: среднему значению тока на интервале полупериода питающей сети, $I_{B,CP}$, и

максимальному обратному напряжению на вентиле, $U_{в.обр.мах}$, с учетом коэффициента запаса по току $k_{з.т}=2$ и коэффициента запаса по напряжению $k_{з.н}=2$.

Среднее значение тока на интервале полупериода $I_{в.ср}=(2/\pi)I_{\phi N}$.

Максимальное обратное напряжение на вентиле $U_{в.обр.мах}=\sqrt{2}\cdot U_{лN}$.

$I_{\phi N}$ – действующее значение тока фазы асинхронного двигателя.

$U_{лN}$ – действующее значение линейного напряжения питающей сети переменного тока.

Выбор тиристоров производим по справочным данным, приведенным в разделе 5.

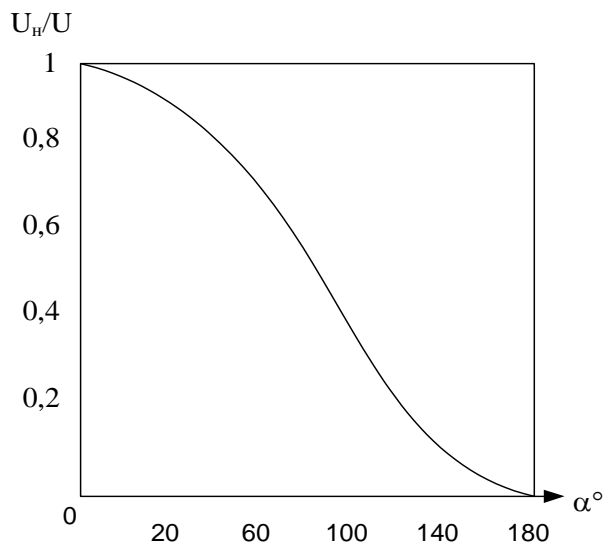


Рис.2.4. Регулировочная характеристика однофазного ТРН при активной нагрузке

2.1. Расчет характеристик асинхронного электропривода при фазовом способе управления

Регулирование скорости вращения асинхронного электропривода Ω при фазовом способе управления осуществляется путем изменения величины скольжения s :

$$\Omega = \omega_1(1-s) = \frac{2\pi f_1}{p_n}(1-s), \quad (2.3)$$

где ω_1 - угловая скорость вращения поля статора;

f_1 - частота напряжения питающей сети;

p_n - число пар полюсов двигателя.

На рис.2.5 приведены естественная и искусственные механические характеристики асинхронного двигателя $M=f(s)$ при различных значениях

напряжения обмотки статора U_1 . При одном и том же значении момента сопротивления нагрузки M_c величина скольжения s тем больше, чем меньше величина напряжения U_1 . Следовательно, скорость вращения асинхронного двигателя уменьшается с уменьшением напряжения U_1 . Величина момента, развиваемого асинхронным двигателем, прямо пропорциональна квадрату напряжения

$$M = \frac{p_n m_1 U_1^2 (R^2 / S_c)}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + R^2 / S_0 \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}, \quad (2.4)$$

где m_1 - число фаз обмотки статора;

$R_1 = \sigma r_1$; $R_2 = \sigma^2 r_2$; $X_1 = \sigma x_1$; $X_2 = \sigma^2 x_2$ – параметры схемы замещения;

$\sigma = 1 + x_1 / x_\mu$ – коэффициент рассеяния.

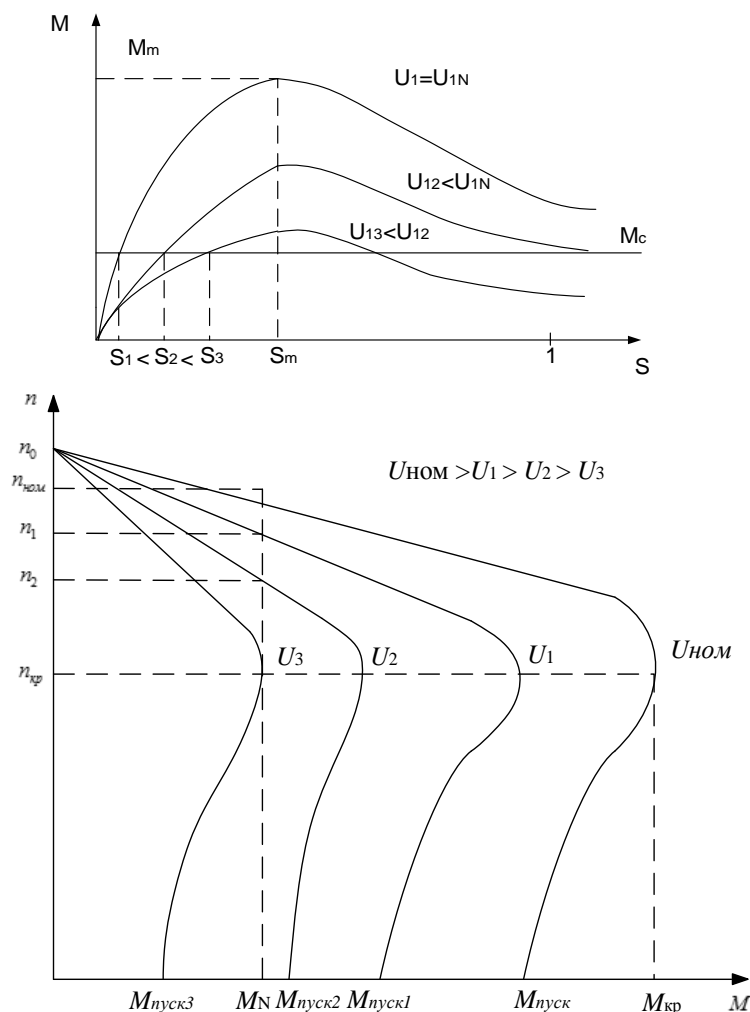


Рис.2.5. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных значениях напряжения, подаваемого на обмотку статора

Из рис. 2.5 также видно, что при уменьшении напряжения, подаваемого на обмотку статора, происходит уменьшение критического момента, в то же время величина критического скольжения остается неизменной. В результате при $U_{1\text{рег}} = \text{var}$ искусственные характеристики при напряжениях, меньших номинального значения оказываются малоприспособными для регулирования скорости из-за уменьшения перегрузочной способности АД. Диапазон регулирования скорости разомкнутого электропривода очень мал. Разомкнутые схемы асинхронного ЭП с регулятором напряжения обмотки статора используются лишь для воздействия в переходных процессах на момент АД, что может требоваться, например, для обеспечения заданного ускорения движения ЭП или регулирования натяжения на исполнительном органе рабочей машины. Заметим, что регулирование напряжения на статоре не приводит к изменению скорости идеального холостого хода $\Omega_0 = 2\pi f_1 / p_{\text{п}}$.

2.2. Расчет естественной и искусственных механических характеристик разомкнутого электропривода

В качестве исходных данных для выполнения расчета механических характеристик следует использовать паспортные данные асинхронного двигателя, выбор которого осуществляется в ходе выполнения контрольного задания по теме «Выбор электродвигателя для электропривода вентилятора». Механические характеристики асинхронного электропривода с фазовым управлением удобно строить по формуле Клосса, используя известные значения максимального момента $M_{\text{к}}$ и значение скольжения $s_{\text{к}}$, рассчитанное по формуле (2.5).

Значение скольжения $s_{\text{к}}$:

$$s_{\text{к}} = s_{\text{N}} \left(m_{\text{к}} + \sqrt{m_{\text{к}}^2 - 1} \right). \quad (2.5)$$

Формула Клосса для расчета максимального момента:

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}}. \quad (2.6)$$

Значение относительного критического момента $m_{\text{к}}$ приведено в паспортных данных асинхронных двигателей (см. таблицу 1.14).

Значение максимального (критического) момента механической характеристики $M_{\text{к}}$ можно определить с учетом значения $m_{\text{к}}$ по формуле:

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} M_{\text{N}}.$$

Значение номинального момента определяются по паспортным данным двигателя:

$$M_N = P_N / \Omega_N.$$

Расчет искусственных механических характеристик АД при пониженном напряжении обмотки статора проводится также по формуле Клосса. Значение критического момента прямо пропорционально квадрату напряжения обмотки статора, поэтому при расчете искусственной механической характеристики следует рассчитать значение критического момента при пониженном напряжении по формуле (2.7):

$$M_{ки} = M_{ке} (U_{1и} / U_{1е})^2, \quad (2.7)$$

где $U_{1и}$ – напряжение фазы, принятое для расчета искусственной механической характеристики АД;

$U_{1е}$ – напряжение фазы, принятое для расчета естественной механической характеристики АД;

$M_{ке}$ – критическое значение момента АД естественной механической характеристики АД.

Относительное значение критического момента искусственной механической характеристики при пониженном напряжении $M_{ми}$:

$$M_{ки} = M_{ке} / M_N.$$

Расчет естественной и двух искусственных механических характеристик АД выполняется для трех заданных значений напряжения, подаваемого на обмотку статора: $U_{1,1} = U_{1\phi N} = 220$ В; $U_{1,2} = 190$ В; $U_{1,3} = 170$ В.

Для заданных значений напряжения обмотки статора:

- задаваясь значениями скольжения $0 < s < (s=1)$ рассчитывается значение момента АД в двигательном режиме и значение скорости вращения для каждого значения скольжения. Результаты расчета сводятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Параметры естественной и искусственных механических характеристик

Напряжение $U_{1\phi}$, В	Скольжение s	Скорость вращения, n , об/мин	Момент, M , Нм
$U_{1,1} = U_{1\phi N} = 220$ В	$s_1 = 0$		
	$s_2 = s_N =$		
	$s_3 =$		
	$s_4 = s_k =$		
	$s_5 =$		
	$s_6 =$		

	$s_7=1$		
$U_{1,2}= 190 \text{ В}$	$s_1=0$		
	$s_2= s_N=$		
	$s_3=$		
	$s_4= s_K=$		
	$s_5=$		
	$s_6=$		
	$s_7=1$		
$U_{1,3}= 170 \text{ В}$	$s_1=0$		
	$s_2= s_N=$		
	$s_3=$		
	$s_4= s_K=$		
	$s_5=$		
	$s_6=$		
	$s_7=1$		

По результатам расчетов строятся естественная и две искусственные механические характеристики $n=f(M)$.

Существенным недостатком фазового способа регулирования скорости вращения является низкий коэффициент полезного действия η , ввиду увеличения потерь в обмотке ротора P_{M2} при увеличении скольжения (уменьшении скорости вращения).

$$P_{M2} = P_{эм} s = M_{эм} \omega_1 s, \quad (2.8)$$

где $P_{эм}$ – электромагнитная мощность двигателя;

$M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя; ω_1 – угловая скорость

ω_1 – угловая скорость вращения магнитного поля двигателя.

Следовательно, для того, чтобы при продолжительной работе с малой скоростью двигатель не нагревался сверх допустимой температуры, необходимо снижать его нагрузку в обратно пропорциональной зависимости от скольжения.

Тиристорные регуляторы напряжения позволяют реализовывать самые разнообразные функции по управлению и оптимизации режимов работы асинхронного электропривода. На их основе строятся устройства, позволяющие формировать нужным образом динамические характеристики ЭП, они позволяют также реализовывать режимы работы АД с наилучшими энергетическими показателями при малых его нагрузках.

Для увеличения диапазона регулирования скорости вращения асинхронного электропривода с фазовым способом управления в систему вводят отрицательную обратную связь по скорости.

Замкнутая по скорости система асинхронного ЭП с ТРН приведена на рис.2.6.

Управляющие электроды тиристоров подсоединены к выходам СИФУ, которая распределяет управляющие импульсы на все тиристоры и осуществляет их сдвиг в зависимости от входного сигнала управления U_y . К валу двигателя для реализации обратной связи по скорости подсоединен тахогенератор ТГ, ЭДС которого $E_{тг}$ сравнивается с задающим напряжением скорости $U_{з.с}$, подаваемого на вход системы управления. Эти напряжения действуют навстречу друг другу, и их разность образует сигнал управления:

$$U_{ур} = U_{з.с} - U_{о.с} = U_{з.с} - k_{о.с} \Omega. \quad (2.9)$$

Сигнал $U_{ур}$ поступает на вход СИФУ. При увеличении этого сигнала угол управления тиристорами уменьшается, а подаваемое на двигатель напряжение увеличивается, и наоборот.

Рассмотрим работу ЭП при изменении момента нагрузки M_c на валу двигателя и постоянном сигнале задания скорости $U_{з.с2}$. Допустим, что в исходном положении АД работал с моментом нагрузки M_{c1} , а затем произошло его увеличение до значения M_{c2} . В этом случае скорость начнет снижаться и соответственно начнет уменьшаться ЭДС тахогенератора $E_{тг}$, что вызовет согласно (2.9) увеличение напряжения управления $U_{ур}$ и уменьшение угла управления тиристорами, а значит, приведет к увеличению подаваемого на АД напряжения.

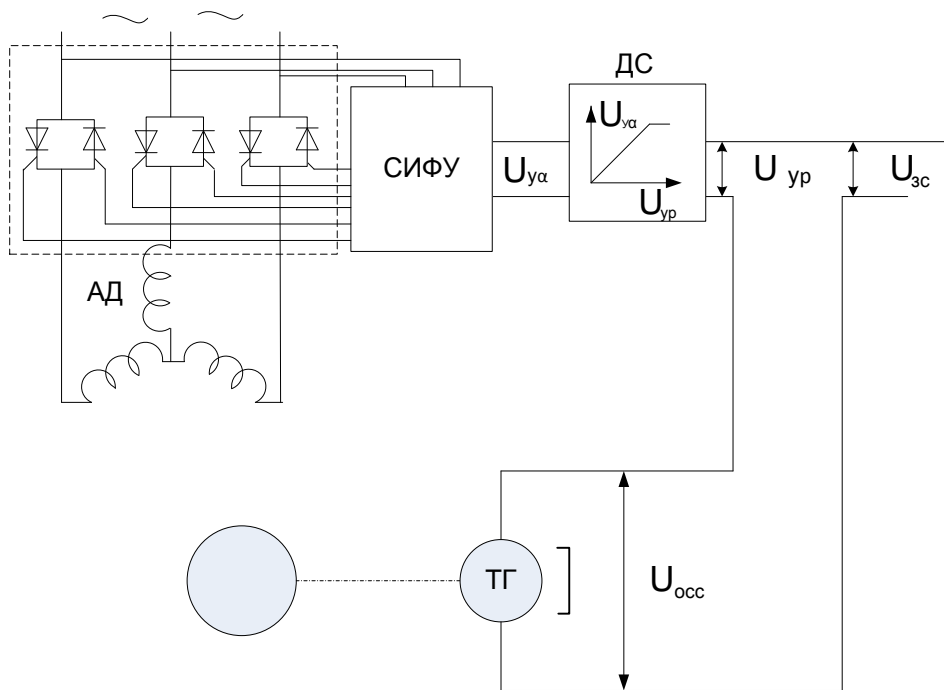


Рис. 2.6. Функциональная схема замкнутого по скорости асинхронного электропривода с фазовым управлением

На рис. 2.7 приведены искусственные механические характеристики замкнутого по скорости асинхронного электропривода с фазовым управлением для нескольких значений сигнала управления $U_{зс}$, задающего значение скорости вращения.

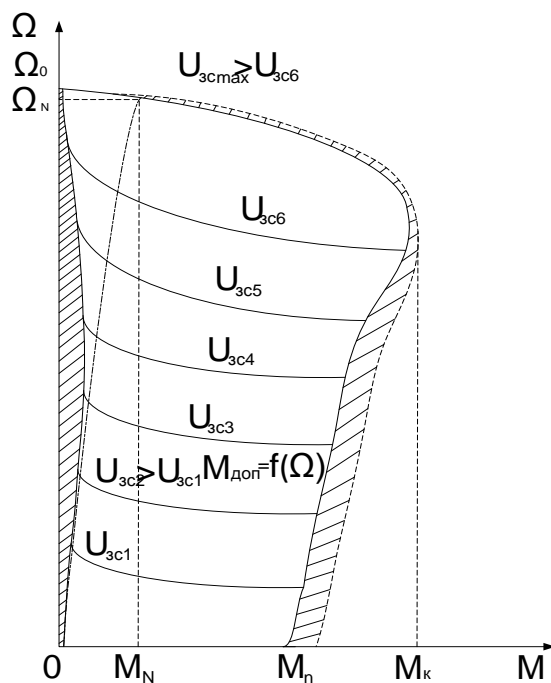


Рис. 2.7. Искусственные механические характеристики замкнутого по скорости асинхронного электропривода с фазовым управлением

Момент АД будет увеличиваться, пока не сравняется с моментом нагрузки $M_{с2}$. Таким образом, увеличение момента нагрузки приводит к небольшому снижению скорости АД, или, другими словами, его характеристики становятся жесткими. При уменьшении момента нагрузки M_c будет автоматически происходить снижение напряжения на АД, т.е. его скорость вращения будет поддерживаться на заданном уровне.

Изменяя значение задающего напряжения скорости $U_{з.с}$, можно получить ряд механических характеристик электропривода с относительно высокой жесткостью и необходимой перегрузочной способностью АД (см. рис.2.7).

2.3. Разработка структурной схемы системы управления асинхронного электропривода с фазовым управлением

Для составления структурной схемы асинхронного ЭП с фазовым управлением принимаем допущение о линейности рабочего участка механической характеристики АД. Передаточная функция электрической подсистемы двигателя в этом случае может быть представлена апериодическим звеном первого порядка. Выходной координатой этого звена является электромагнитный момент АД. Управляющее воздействие, в нашем случае частота, поступает на вход передаточной функции АД через дополнительное звено k_d . Момент инерции целесообразно отнести к механической подсистеме двигателя. Дополнив эту структурную схему передаточной функцией тиристорного регулятора напряжения, получим структурную схему разомкнутой системы АД (см. рис.2.8). Звено с передаточной функцией АД выделено пунктиром.

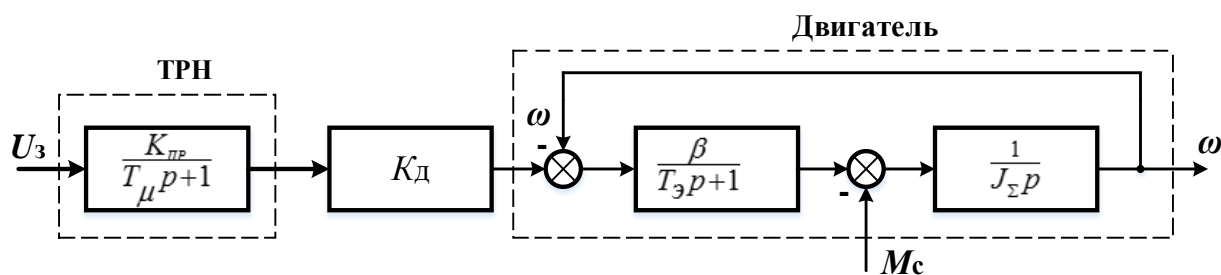


Рис. 2.8. Структурная схема асинхронного электропривода с фазовым управлением

Рассмотрим порядок расчета параметров передаточных функций звеньев структурной схемы электропривода.

Передаточная функция тиристорного регулятора напряжения будет иметь вид:

$$W_{\text{трн}}(p) = \frac{k_{\text{трн}}}{T_{\mu}p + 1}.$$

где $k_{\text{трн}} = U_{1N}/U_{3.cN}$ - коэффициент усиления ТРН;

$U_{3.cN}$ можно принять равным 10 В.

$T_{\mu} = 0,01$ с - постоянная времени ТРН.

Остальные параметры схемы можно определить по следующим соотношениям:

$\omega_{0c} = 2\pi f_{1N}$ - номинальное значение угловой частота напряжения обмотки статора;

$\omega_1 = 2\pi f/p_{\text{п}}$ - угловая частота вращения поля статора;

$\Omega_N = \omega_{1N}(1-s_N)$ - номинальное значение угловой частоты вращения ротора двигателя;

$M_N = P_N / \Omega_N$ - номинальное значение момента двигателя;

$\beta = M_N / (\omega_1 - \Omega_N)$ - коэффициент жесткости механической характеристики;

$k_d = 2\pi/p_{\text{п}}$ - коэффициент двигателя;

$T_M = J_{\Sigma} / \beta$ - электромеханическая постоянная времени двигателя;

$J_{\Sigma} = 2J_d$ - суммарный момент инерции электропривода с учетом приведенного момента инерции воздушной среды;

J_d - момент инерции ротора двигателя;

$T_{\text{э}} = 1 / (s_{\text{крN}} \omega_{1N})$.

Передаточная функция двигателя:

$$W_d(p) = \frac{\frac{\beta k_d}{J_{\Sigma} p (T_{\text{э}} p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_{\Sigma} p (T_{\text{э}} p + 1)}} = \frac{\beta k_d}{J_{\Sigma} T_{\text{э}} p^2 + J_{\Sigma} p + \beta} = \frac{k_d}{T_M T_{\text{э}} p^2 + T_M p + 1}.$$

Передаточная функция разомкнутой системы ЭП:

$$W_{\text{о.р.с.}}(p) = \frac{k_{\text{трн}} k_d}{(T_M p + 1)(T_M T_{\text{э}} p^2 + T_M p + 1)}.$$

Структурная схема замкнутой по скорости системы асинхронного ЭП приведена на рис.2. 9.

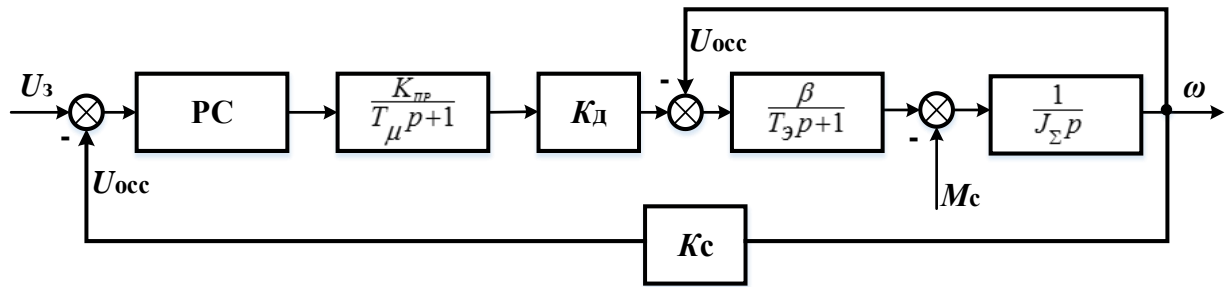


Рис.2.9. Структурная схема замкнутой по скорости системы асинхронного ЭП с фазовым управлением

Передаточная функция желаемой разомкнутой системы ЭП:

$$W_{\text{ж.раз}}(p) = \frac{1/k_c}{a_c T_\mu p (T_\mu p + 1)},$$

где $a_c = 2 \dots 4$.

С увеличением коэффициента a_c снижается перерегулирование, переходный процесс приобретает асимптотический характер, но увеличивается время переходного процесса.

Коэффициент обратной связи по скорости k_c определим при номинальном сигнале управления электроприводом, равном $U_{з.с N}$, и соответствующей ему номинальной скорости вращения АД Ω_N :

$$k_c = U_{з.с N} / \Omega_N = 10 / \Omega_N, \text{ Вc/рад.}$$

Передаточная функция регулятора скорости:

$$\begin{aligned} W_{\text{р.с}}(p) &= \frac{W_{\text{ж.раз}}(p)}{W_{\text{о.р.с}}(p)} = \frac{1/k_c (T_\mu p + 1)(T_M T_\Delta p^2 + T_M p + 1)}{a_c T_\mu p (T_\mu p + 1) k_{\text{трн}} k_d} = \\ &= \frac{T_M T_\Delta p^2 + T_M p + 1}{a_c T_\mu k_c k_{\text{трн}} k_d p} = \frac{T_M T_\Delta p^2 + T_M p + 1}{T_I p}. \end{aligned}$$

Передаточная функция регулятора скорости соответствует передаточной функции пропорционально – интегрально – дифференциального регулятора. Электрическая схема ПИД- регулятора приведена на рис.2.10.

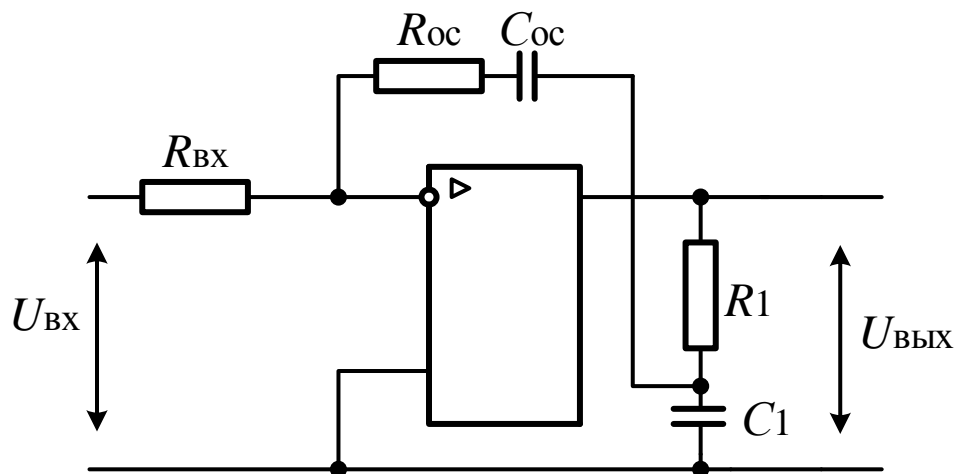


Рис.2. 10. Схема ПИД – регулятора

Необходимые параметры регулятора реализуются путем подбора резисторов и конденсаторов приведенной на рис.2.10 схемы.

$$k_{\pi} = \frac{R_{o.c} + R_1 C_1}{R_{Bx} C_{o.c}}$$

$$T_{\pi} = R_{Bx} C_{o.c}; \quad k_d = \frac{R_{o.c} R_1 C_1}{R_{Bx}}$$

В таблице 2.2 приведены контрольные задания для самостоятельной работы по теме «Асинхронный электропривод вентилятора с фазовым управлением».

Параметры питающей сети едины для всех вариантов задания:

Число фаз $m=3$; напряжение $U_c=220/380$ В; частота $f_c=50$ Гц.

Таблица 2.2.

**Контрольные задания для самостоятельной работы по теме
«Асинхронный электропривод вентилятора с фазовым управлением»**

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметры АД	Вар №1 ПРН№3	Вар №2 ПРН№3	Вар №3 ПРН№3	Вар №4 ПРН№3	Вар №5 ПРН№3	Вар №6 ПРН№3	Вар №7 ПРН№3	Вар №8 ПРН№3	Вар №9 ПРН№3
Допустимый перепад скорости вращения ЗС, $\Delta\Omega_{з.с}, \%$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,4
$\bar{U}_{з.с1}, \text{о.е.}$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
$\bar{U}_{з.с2}, \text{о.е.}$	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3

№ вар.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Параметры АД	Вар №10 ПРН№3	Вар №11 ПРН№3	Вар №12 ПРН№3	Вар №13 ПРН№3	Вар №14 ПРН№3	Вар №15 ПРН№3	Вар №16 ПРН№3	Вар №17 ПРН№3	Вар №18 ПРН№3
Допустимый перепад скорости вращения ЗС, $\Delta\Omega_{з.с.}, \%$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3
$\bar{U}_{з.с.1}, \text{о.е.}$	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
$\bar{U}_{з.с.2}, \text{о.е.}$	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3

№ вар.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Параметры АД	Вар №19 ПРН№3	Вар №20 ПРН№3	Вар №21 ПРН№3	Вар №22 ПРН№3	Вар №23 ПРН№3	Вар №24 ПРН№3	Вар №25 ПРН№3	Вар №26 ПРН№3	Вар №27 ПРН№3
Допустимый перепад скорости вращения ЗС, $\Delta\Omega_{з.с.}, \%$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,4	0,9	0,8
$\bar{U}_{з.с.1}, \text{о.е.}$	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,9
$\bar{U}_{з.с.2}, \text{о.е.}$	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3

Порядок выполнения задания:

- Изучить устройство, кинематическую схему асинхронного электропривода с фазовым управлением, принцип работы, вывод основных расчетных соотношений асинхронного электропривода с фазовым управлением.
- Для заданного варианта задачи необходимо:
 - воспользоваться результатами выполнения своего варианта задания по практической работе «Выбор электродвигателя для электропривода вентилятора» - привести параметры выбранного асинхронного двигателя;
 - рассчитать загрузку тиристоров по току и напряжению и выбрать тиристоры;
 - рассчитать естественную и искусственные механические характеристики разомкнутого асинхронного электропривода; искусственные механические характеристики рассчитать для следующих значений напряжения подаваемого на обмотку статора $U_{11}=U_{1N}$; $U_{12}=0,9 U_{1N}$; $U_{13}=0,8 U_{1N}$;

- построить рассчитанные естественную и искусственные механические характеристики разомкнутого асинхронного электропривода;
- рассчитать параметры регулятора скорости замкнутой системы электропривода;
- рассчитать искусственные механические характеристики для двух значений сигнала задания скорости, приведенных в задании;
- построить рассчитанные механические характеристики замкнутой системы;
- рассчитать параметры передаточной функции электропривода;
- исследовать динамические характеристики разработанного электропривода на модели Simulink.

3. Асинхронный электропривод с частотным управлением

В системе асинхронного электропривода с частотным управлением двигатель получает электрическую энергию от полупроводникового преобразователя частоты.

Преобразователи частоты (ПЧ) преобразуют электрическую энергию переменного тока одной частоты в электрическую энергию переменного тока другой частоты. Рассмотрим преобразователь частоты со звеном постоянного тока.

Эти преобразователи имеют в своем составе выпрямитель и инвертор. Выпрямитель преобразует электрическую энергию переменного тока в электрическую энергию постоянного тока, а инвертор преобразует электрическую энергию постоянного тока в электрическую энергию переменного тока. Очевидным достоинством ПЧ со звеном постоянного тока является независимость частоты выходного напряжения на выходе ПЧ от частоты питающей сети. На рис.3.1 приведена наиболее распространенная в настоящее время структурная схема преобразователя частоты с активным выпрямителем и инвертором напряжения. Основными достоинствами ПЧ с активным выпрямителем и инвертором напряжения являются высокий, близкий к единице, коэффициент мощности и обратимость, т.е. способность передавать электрическую энергию как от сети переменного тока в нагрузку, так и от нагрузки в сеть переменного тока.

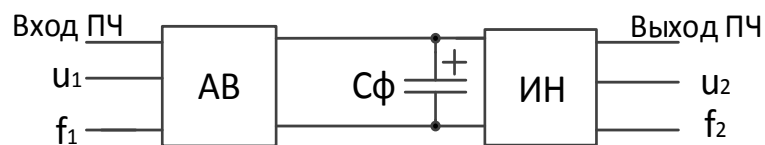


Рис. 3.1. ПЧ с активным выпрямителем и инвертором напряжения

Причем перевод активного выпрямителя из выпрямительного режима в инверторный режим осуществляется изменением направления тока цепи постоянного тока при повышении напряжения цепи постоянного тока по отношению к так называемому «напряжению подпора» на выходе вентильного блока АВ. В схеме ПЧ, приведенной на рис.3.2, применен активный выпрямитель напряжения, на входе которого включен индуктивный фильтр, а в цепи постоянного тока включен емкостной фильтр C . Цепь постоянного тока активного выпрямителя ($F-D$) соединена с цепью постоянного тока инвертора напряжения ($F-D$).

Вентильный блок активного выпрямителя, также как и у инвертора напряжения, выполнен на полностью управляемых вентилях – транзисторах с параллельно включенными диодами. Благодаря этому каждый ключ обладает двусторонней проводимостью. В приведенной на рис.3.2 схеме трехфазный источник питания содержит трехфазную систему ЭДС e_{s1} , e_{s2} и e_{s3} и индуктивности $l_{др}$. Этот источник имеет фазные напряжения u_s и фазные токи i_s . Линейные напряжения источника u_{ab} , u_{bc} и u_{ca} . Между трехфазным источником и транзисторным мостом включен трехфазный дроссель с индуктивностями фаз l_{ϕ} и активными сопротивлениями фаз $r_{др}$. В транзисторном мостовом преобразователе (выпрямителе) $u_{v1} - u_{v3}$ – фазные напряжения; $i_{v1} - i_{v3}$ – токи в плечах моста; u_{rc} – выпрямленное напряжение (напряжение конденсаторного фильтра); i_{dv} – выпрямленный ток; ИУ – импульсы управления; КУ1–КУ6 – управляемые ключи. В цепи выпрямленного напряжения C , r_c , i_c – емкость, активное сопротивление и ток конденсаторного фильтра, r_z и i_z – активное сопротивление и ток цепи защиты от перенапряжений, $r_{нг}$, $l_{нг}$, $e_{нг}$, $i_{нг}$ – активное сопротивление, индуктивность, ЭДС и ток нагрузки. В схеме, приведенной на рис. 3.2, система управления выпрямителя СУ контролирует линейные напряжения и фазные токи трехфазного источника питания, а также выпрямленное напряжение преобразователя и формирует импульсы управления транзисторами.

Как в активном выпрямителе, так и в инверторе напряжения применяется широтно-импульсный метод регулирования напряжения.

Достоинством преобразователя частоты с активным выпрямителем напряжения является способность регулировать напряжение цепи постоянного тока в заданных пределах, сохраняя фазовый сдвиг тока по отношению к напряжению сети переменного тока практически равным нулю (или близким к нулевому значению). Форма кривой тока цепи переменного тока при этом близка к синусоидальной. Совершенно очевидно, что коэффициент мощности этих преобразователей равен единице (точнее, близок к единице).

Принцип работы схемы управления активного выпрямителя можно пояснить с помощью рис. 3.3, на котором изображены пилообразное (опорное) напряжение $u_{оп}$, напряжение управления u_{y1} (модулирующее напряжение) транзисторами одного плеча (или одной фазы трехфазной схемы) моста автономного инвертора напряжения (АИН), а также функции состояния двух полностью управляемых ключей этого плеча моста k_{i1} и $1-k_{i1}$ (например, ключей VT1–VD1 и VT4–VD4, соответственно) одной фазы трехфазного моста.

Если напряжения управления синусоидальны и их амплитуда не превышает амплитуду опорного напряжения, то считается, что преобразователь работает в режиме синусоидальной широтно–импульсной модуляции (ШИМ).

Отношение амплитуды сигнала управления (модулирующего сигнала U_m) к амплитуде опорного сигнала принято называть коэффициентом модуляции μ :

$$\mu = U_m / U_{оп\ m}. \quad (3.1)$$

В реальных установках вследствие дискретности микропроцессорных устройств управления напряжения управления имеют ступенчатую форму с «гладкими» составляющими, близкими по форме к синусоиде. Длительность цикла работы микропроцессорных систем управления Δt_y во многих случаях принимается равной периоду $T_{оп}$ пилообразного напряжения. В пределах этого периода напряжения управления всех фаз неизменны. Временные диаграммы рис. 3.3 построены с учетом этой особенности системы.

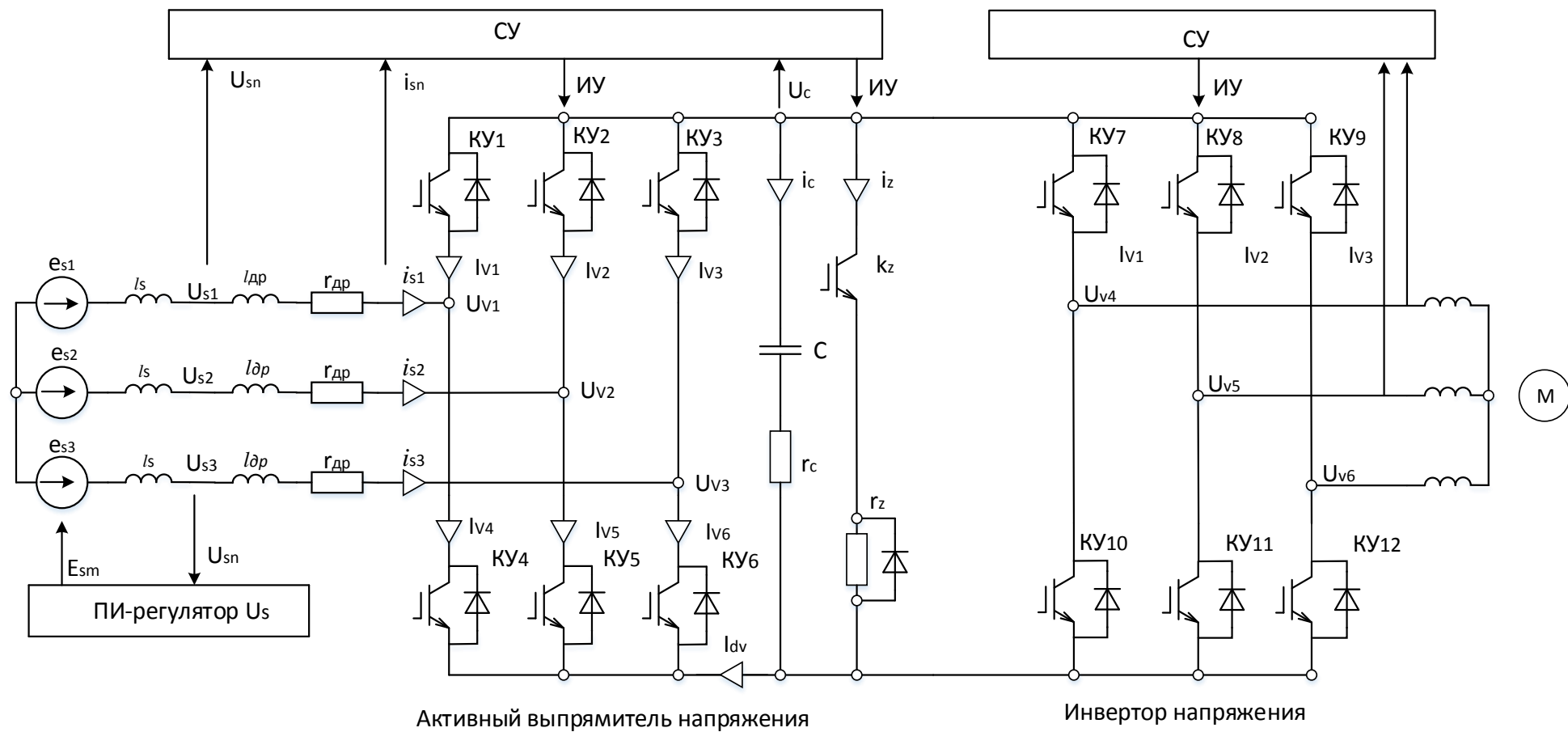


Рис. 3.2. Схема преобразователя частоты

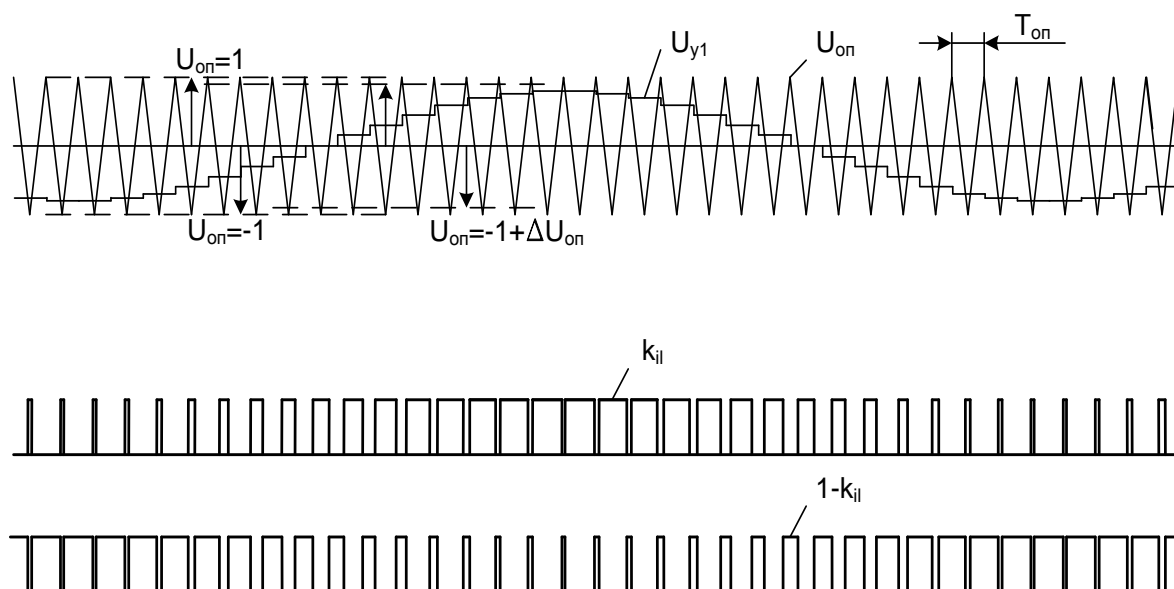


Рис.3.3. Опорное напряжение, напряжение управления и функции состояния транзисторов одного плеча АИН в режиме синусоидальной ШИМ

Обратим внимание на то, что выходное напряжение инвертора напряжения (напряжение цепи переменного тока) прямо пропорционально коэффициенту модуляции μ , а выходное напряжение активного выпрямителя (напряжение цепи постоянного тока) обратно пропорционально коэффициенту модуляции μ . На рис.3.4 *а* и *б* приведены регулировочные характеристики инвертора напряжения и активного выпрямителя напряжения. В моменты равенства опорного напряжения и напряжений управления осуществляются переключения транзисторов. Существует минимально допустимое время переключения транзисторов, которое несколько сужает активную зону опорного напряжения (участвующую в формировании импульсов управления) на величину $\Delta u_{оп}$ сверху и снизу. Если амплитуду опорного напряжения принять равной 1, то в соответствии с рис. 3.3 активная зона напряжений управления находится в пределах от $(-1+\Delta u_{оп})$ до $(1-\Delta u_{оп})$.

Изменение начальной фазы модулирующего сигнала по отношению к напряжению сети переменного тока позволяет обеспечить коэффициент сдвига по основной гармонике равным или меньшим единице. Высшие гармоники кривой входного тока активного выпрямителя фильтруются с помощью индуктивности входного фильтра. При этом эффективность работы фильтра зависит от величины несущей частоты (частоты опорного сигнала), с которой переключаются транзисторы. В настоящее время активные выпрямители большой мощности работают при значении несущей частоты от 2,5 до 5 кГц. Дальнейшее повышение несущей

частоты ограничивается существенным увеличением потерь мощности в транзисторах и их перегревом, что недопустимо.

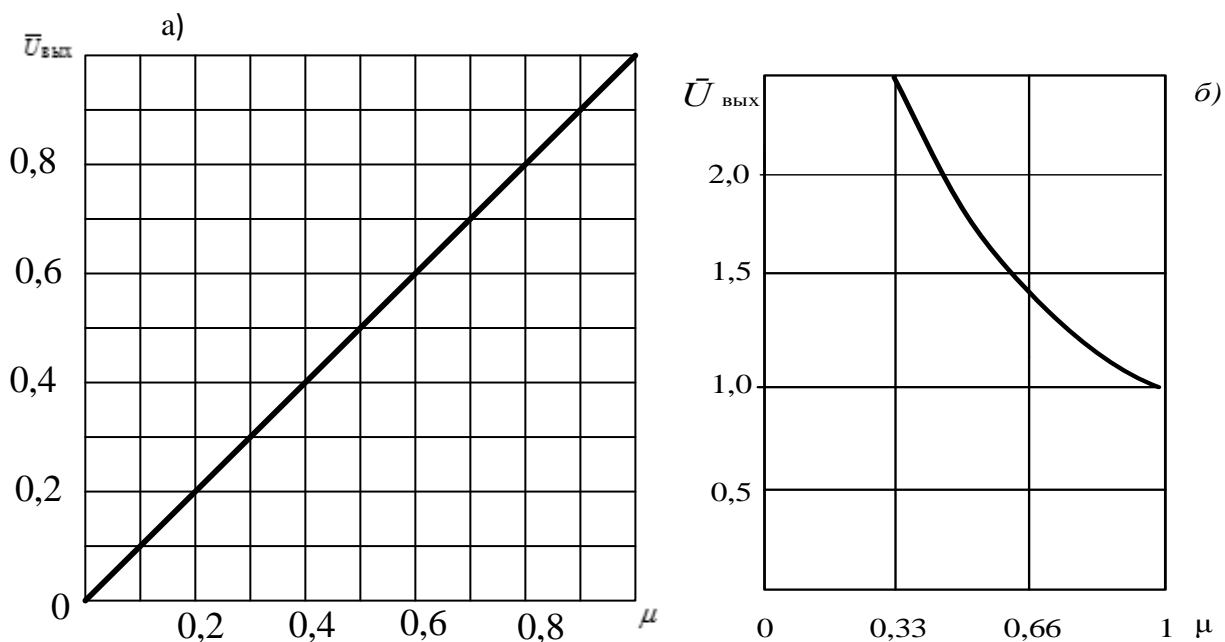


Рис.3.4. Регулировочные характеристики: а - инвертора напряжения; б- активного выпрямителя напряжения

Системы управления активного выпрямителя СУ могут решать следующие задачи:

- стабилизация выпрямленного напряжения на заданном уровне путем воздействия на амплитуду заданных фазных токов сети;
- формирование фазных токов сети, близких по форме к синусоиде путем воздействия на напряжения управления;
- поддержание заданного коэффициента мощности сети (индуктивного, емкостного или равного единице) путем воздействия на напряжения управления;
- передача энергии из сети переменного напряжения в цепь постоянного напряжения и в противоположном направлении.

Следует напомнить, что минимальный уровень выпрямленного напряжения в активном выпрямителе напряжения, равен тому напряжению, которое может создать диодный выпрямитель, образуемый диодами, включенными параллельно транзисторным ключам активного выпрямителя. На регулировочной характеристике рис.3.4, б это значение напряжения при $\mu=1$. При управлении транзисторами выпрямленное напряжение нельзя уменьшить, но можно увеличить. Верхняя граница выпрямленного напряжения активного выпрямителя теоретически не ограничена. Однако практически максимальное значение выпрямленного напряжения, которое

может быть достигнуто при его регулировании, зависит от соотношения активного сопротивления элементов схемы R_{cx} и активного сопротивления нагрузки $R_{нг}$. В этой части имеется определенная аналогия с регулированием напряжения преобразователя постоянного тока с параллельным (относительно цепи нагрузки) включением транзистора.

Фазовый угол потребляемого тока зависит от соотношения амплитуд и фазовых углов напряжений, приложенных к реакторам со стороны сети и со стороны активного выпрямителя, а также от параметров (индуктивности и активного сопротивления) сетевого дросселя. Варьируя с помощью системы управления АВН параметрами основной гармоники его переменного напряжения на зажимах U_{v1}, U_{v2}, U_{v3} можно обеспечить потребление из сети необходимого тока с заданным фазовым углом. Иными словами, можно обеспечить работу преобразователя с заданным значением коэффициента мощности, например, равным единице.

Как коммутатор тока активный выпрямитель преобразует ток, потребляемый из сети переменный, близкий к синусоидальному, в пульсирующий выходной ток, содержащий переменную и постоянную составляющие. Переменная составляющая замыкается через конденсатор, который ограничивает пульсации напряжения U_d в звене постоянного тока, вызываемых переменной составляющей выходного тока АВН. Постоянная составляющая выходного тока АВН подпитывает конденсатор, компенсируя расход постоянного тока, отдаваемого в нагрузку.

Расчет ПЧ следует начинать с расчета инвертора напряжения. Результатом этого этапа расчета ПЧ являются исходные данные для расчета активного выпрямителя: номинальное значение напряжения цепи постоянного тока U_{dN} и номинальное значение тока I_{dN} .

3.1. Расчет инвертора напряжения

Инвертор напряжения работает с синусоидальной ШИМ.

Рассмотрим методику расчета инвертора напряжения на примере. Воспользуемся параметрами асинхронного двигателя МТКВ412-6, выбранного ранее в разделе 1.2.

Паспортные данные двигателя:

- номинальная мощность $P_N=11$ кВт;
- номинальное линейное напряжение $U_{лN}=380$ В;
- номинальное значение частоты напряжения $f_N=50$ Гц;
- скорость вращения $n_N=975$ об/мин;
- пусковой момент $M_{п}=1,2$ о.е.;

- минимальный момент $M_{\min}=1,0$ о.е;
- максимальный (критический) момент $M_{\text{кр}}=2,0$ о.е.;
- момент инерции ротора $J=0,637$ кгм²
- КПД $\eta=0,875$
- коэффициент мощности $\cos \varphi=0,87$.

Угловая скорость вращения ротора двигателя $\Omega_{\text{д}}=2 \cdot \pi \cdot 975/60=102$ рад/с.

Номинальный момент двигателя $M_{\text{N}}= P_{\text{N}}/ \Omega_{\text{дN}}=11000/102=107$ Нм.

Номинальное значение тока фазы двигателя:

$$I_{\phi\text{N}} = \frac{P_{\text{дN}}}{3 \cdot U_{\phi} \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,87} = 21,9 \text{ А.}$$

Действующее значение фазного напряжения на выходе инвертора с синусоидальной ШИМ прямо пропорционально коэффициенту модуляции μ :

$$U_{\phi.\text{и}}=U_{\text{д}} \cdot \mu/(2\sqrt{2}). \quad (3.2)$$

При синусоидальной ШИМ без амплитудной перемодуляции $\mu=0; \dots; 1,0$.

Преобразователь частоты должен обеспечить возможность независимого регулирования выходного напряжения, как по величине, так и по частоте. Диапазон регулирования частоты выходного напряжения в пределах от 0 до 1,0 номинального значения, а диапазон регулирования величины выходного напряжения в пределах от 0 до 1,15 номинального значения величины напряжения двигателя.

Значение несущей частоты ШИМ инвертора можно выбирать в пределах от 2500 Гц до 10000 Гц.

Необходимо:

- рассчитать загрузку вентиля выпрямителя и инвертора и выбрать их;
- рассчитать емкостной фильтр;
- оценить гармонический состав выходного напряжения инвертора при синусоидальной ШИМ.

Расчет величины напряжения постоянного тока на входе инвертора, необходимого для обеспечения номинального значения напряжения двигателя, определим по формуле:

$$U_{\text{дN}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_{\text{нг.дN}}}{\mu_{\text{и.Н max}}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 380}{\sqrt{3} \cdot 0,9} = 690 \text{ В,} \quad (3.3)$$

где $\mu_{\text{и.Н max}}$ - максимальное значение коэффициента модуляции инвертора напряжения принято равным 0,9.

С учетом требования задания необходимо увеличить максимальное значение этого напряжения в 1,15 раза, т.е. максимальное значение напряжения на входе инвертора должно быть не менее 793,5 В, U_{dmax} принимаем равным 794 В.

Величина коэффициента модуляции инвертора напряжения изменяется в пределах от 0 до 0,9 (см. рис.3.4, а).

Далее определим загрузку транзисторов и диодов обратного тока инвертора по току и напряжению с учетом значения μ_N .

Максимальное значение коллекторного тока транзистора $I_{k \max}$ равно максимальному (амплитудному) фазному значению выходного тока инвертора. С учетом того, что обмотки статора двигателя соединены в звезду, выходной ток фазы инвертора равен фазному току двигателя, т.е. $I_{\phi.и} = 21,9$ А:

$$I_{k \max} = I_{\phi.и m} = \sqrt{2}I_{\phi N} = 30,88 \text{ А.} \quad (3.4)$$

Среднее значение тока диода обратного тока ($I_{vd \text{ ср}}$) определим для режима работы при $\mu_{и.н \max} = 0,9$ по формуле:

$$I_{vd \text{ ср}} = \frac{I_{\phi m}}{2\pi} \left(1 - \frac{\pi\mu}{4} \cos \varphi_{нр}\right) = \frac{30,8}{2\pi} \left(1 - \frac{\pi \cdot 0,9}{4} 0,87\right) = 1,89 \text{ А.} \quad (3.5)$$

В диапазоне низких значений частоты выходного напряжения инвертора значение коэффициента модуляции может находиться в пределах от 0,05 до 0,1. Принимая значение коэффициента модуляции равным 0,1, определим среднее значение тока диода обратного тока по формуле:

$$I_{vd \text{ ср max}} = I_{\phi m}(1-\mu)/2 = 30,8(1-0,1)/2 = 13,86 \text{ А.} \quad (3.6)$$

Для выбора диода обратного тока примем значение $I_{vd.ср \max} = 14,0$ А.

С учетом рекомендуемого значения коэффициента запаса по току, равного 2, транзистор следует выбирать на ток не менее 62 А, а диод на ток не менее 28 А.

Обратное напряжение на транзисторах и диодах обратного тока инвертора равно максимальному значению напряжения на выходе выпрямителя с учетом колебания напряжения питающей сети, т.е. равно 794 В. С учетом рекомендуемого значения коэффициента запаса по напряжению, равного 2, транзисторы и диоды инвертора следует выбирать на напряжение не менее 1600 В.

Транзисторы и диоды обратного тока можно выбрать по справочным данным, приведенным в разделе 5 учебного пособия, таблица 5.5. Выбираем транзистор типа IGBT модуль SMK100GB176D. В корпусе модуля размещен

транзистор и диод обратного тока. Предназначен для работы на частотах до 5-7 кГц.

Параметры модуля:

- максимальное напряжение коллектор-эмиттер, $U_{к-э}=1700$ В;
- максимальный ток коллектора $I_c=125$ А;
- номинальный ток коллектора $I_c=75$ А;
- падение напряжения на открытом транзисторе $\Delta U_{к-э \text{ нас}}=2$ В;
- потери энергии при включении $E_{ON}=4,4$ мДж;
- потери энергии на выключение $E_{OFF}=28,5$ мДж;
- тепловое сопротивление переход-корпус (IGBT), $R_{thjc}=0,24$, °C/mВт;
- среднее значение тока обратного диода $I_{в.ср}=100$ А;
- падение напряжения на открытом обратном диоде $\Delta U_d=1,6$ В;
- потери энергии при восстановлении обратного диода, $E_{rr}=21,4$ мДж;
- тепловое сопротивление переход-корпус обратного диода, $R_{thjc-D}=0,45$ °C/mВт;
- тепловое сопротивление модуля (IGBT + диод), $R_{thjs}=0,05$ °C/mВт.

Величина емкости конденсатора фильтра на входе инвертора должна быть такой, чтобы запасенной им энергии на интервале квантования выходного напряжения выпрямителя было бы достаточно для питания нагрузки на этом временном интервале при условии провала амплитуды напряжения на величину, равную ΔU_{Π} , т.е.:

$$\frac{C \left[U_{d1m}^2 - (U_{d1m} - \Delta U_{\Pi})^2 \right]}{2} = P_1 \Delta t_{кв}. \quad (3.7)$$

Откуда требуемая величина емкости конденсатора фильтра

$$C_1 = \frac{2P_1 \Delta t_{кв}}{U_{d1m}^2 - (U_{d1m} - \Delta U_{\Pi})^2} = \frac{2 \cdot 11000 \cdot 3,3 \cdot 10^{-4}}{690^2 - 600^2} = 62,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}. \quad (3.8)$$

Окончательно принимаем решение по величине конденсатора на входе инвертора, $C_d=70$ мкФ. Конденсатор выбираем по таблице 4.6 или 4.7.

3.2. Расчет потерь мощности в транзисторах и диодах инвертора. Расчет площади радиатора

Потери в полупроводниковом коммутаторе вычисляются как сумма статических и динамических потерь диодов и транзисторов.

Расчет статических потерь транзисторов и диодов ведется на основе замещения открытого прибора источником напряжения с последовательным

сопротивлением ($\Delta U_{к-э.нас}$ и $R_{VT\text{ откр}}$) для транзистора и ($\Delta U_{в.пр}$ и $R_{VD\text{ откр}}$) для диода.

Тогда статические потери транзистора:

$$P_{ст VT} = I_{VT\text{ ср}} \Delta U_{к-э.нас} + I_{VT}^2 R_{VT\text{ откр}}, \quad (3.9)$$

аналогично, статические потери диода:

$$P_{ст VD} = I_{в.ср} \Delta U_{в.пр} + I_{в}^2 R_{VD\text{ откр}}. \quad (3.10)$$

Действующее и среднее по модулю значения фазного сетевого тока (без учета потерь активной мощности в АВН):

$$I_{\phi.ср} = I_{\phi} \frac{2\sqrt{2}}{\pi}, \quad (3.11)$$

где $I_{\phi} = P_d / (3U_{\phi})$.

Среднее и действующее значения тока транзистора определяются как:

$$I_{VT\text{ ср}} = \frac{I_{\phi.ср}}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi\mu}{8} \cos\phi_{(1)} \right);$$

$$I_{VT} = I_{\phi} \sqrt{\left(\frac{1}{4} + \frac{2\mu}{3\pi} \cos\phi_{(1)} \right)}. \quad (3.12)$$

Среднее и действующее значения тока диода:

$$I_{VD\text{ ср}} = \frac{I_{\phi.ср}}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi\mu}{8} \cos\phi_{(1)} \right);$$

$$I_{VD} = I_{\phi} \sqrt{\left(\frac{1}{4} - \frac{2\mu}{3\pi} \cos\phi_{(1)} \right)}. \quad (3.13)$$

Динамические (коммутационные) потери транзистора определяются частотой коммутации и энергиями отпирания и запираания. Эти энергии, в свою очередь, зависят от коммутируемого тока и напряжения. Достаточная точность может быть получена при линейной аппроксимации данной зависимости. В этом случае мощность коммутационных потерь транзистора может быть рассчитана как

$$P_{к VT} = f_{к VT} E_{VT} \frac{I_{\phi.ср}}{I_{VTN}} \frac{U_d}{U_{VTN}}. \quad (3.14)$$

Динамические (коммутационные) потери диода зависят от частоты коммутации тока диода и энергии его восстановления. Величина этой энергии является функцией тока и прикладываемого напряжения. При использовании линейной аппроксимации данной зависимости коммутационные потери диода составляют

$$P_{к VD} = f_{к VD} E_{VD} \frac{I_{ф.ср}}{I_{VD N}} \frac{U_d}{U_{VD N}}. \quad (3.15)$$

Суммарные мощности потерь транзистора и диода, соответственно:

$$\begin{aligned} P_{VD} &= P_{ст VD} + P_{к VD}; \\ P_{VT} &= P_{ст VT} + P_{к VT}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Мощность потерь одного ключа:

$$P_{кл} = P_{VT} + P_{VD}. \quad (3.17)$$

Мощность, выделяемая на охладителе равна суммарной мощности потерь инвертора напряжения:

$$P_{ох} = P_{ин} = 6P_{кл}. \quad (3.18)$$

Тепловое сопротивление, которым должен обладать ключ вместе с радиатором.

$$R_T = (T_{п.доп} - T_{ср}) / P_{ин}. \quad (3.20)$$

Тепловое сопротивление радиатора – среда:

$$R_{рс} \ll R_T - (R_{thjs} + R_{thjcVT} + R_{thjcVD}). \quad (3.21)$$

Площадь радиатора:

$$S_p > 1000 / (R_{рс} \cdot \sigma_T), \text{ см}^2, \quad (3.22)$$

где σ_T – коэффициент теплоотдачи от радиатора в окружающую среду, $\sigma_T = 1,5 \text{ мВт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град})$.

Основные расчетные соотношения трехфазного активного выпрямителя

Основные исходные данные, необходимые для расчета активного выпрямителя:

- $P_{d N}$ – мощность АВН номинальная, Вт;
- $P_{d \max}$ – мощность АВН максимальная, Вт;
- $U_{ф N}$ – напряжение сети номинальное, В;
- $U_{ф \min}$ – напряжение сети минимальное, В;
- $U_{ф \max}$ – напряжение сети максимальное, В;

f_c – частота напряжения сети, Гц;

$f_{\text{шим}}$ – несущая частота ШИМ, Гц;

U_{dN} – напряжение в звене постоянного тока номинальное, В;

$I_{d \text{ пик}}$ – пиковое значение максимального тока нагрузки, А;

k_r – коэффициент гармоник фазного тока в номинальном режиме, о.е.;

k_n – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, о.е.

Значение индуктивности реакторов рассчитывается, исходя из заданного коэффициента гармоник сетевых токов. Вычислим значения фазного тока активного выпрямителя:

– номинальный фазный ток: $I_{\phi N} = P_{dN} / (3U_{\phi N})$; (3.23)

– максимальный фазный ток: $I_{\phi \text{ max}} = P_{d \text{ max}} / (3U_{\phi \text{ min}})$; (3.24)

– пиковое значение фазного тока: $I_{\phi \text{ пик}} = (I_{d \text{ пик}} U_{dN}) / (3U_{\phi \text{ min}})$. (3.25)

Для расчета требуемой величины индуктивности сетевых реакторов необходимо получить спектральный состав напряжения, прикладываемого к сетевому реактору. Поскольку гармонический состав данного напряжения зависит от множества параметров (вида ШИМ, глубины модуляции и т.д.), изменяющихся в различных режимах, то проведение аналитического анализа является трудоемким и нецелесообразным. Более эффективным представляется использование метода математического моделирования. В первом приближении требуемое значение индуктивности реактора может быть рассчитано по формуле:

$$L = \frac{U_{dN}}{6\pi f_{\text{шим}} \Delta I_{\phi}}, \quad (3.26)$$

где, пренебрегая более высокими гармониками, можно принять, что амплитуда ШИМ-гармоники тока:

$$\Delta I_{\phi} = k_r I_{\phi N} \sqrt{2}. \quad (3.27)$$

Это значение индуктивности следует уточнить по результатам моделирования активного выпрямителя.

Сетевые реакторы (дрессели) выбираем по справочным данным, приведенным в разделе 5.

Наиболее тяжелый режим работы ПЧ имеет место при снижении напряжения питающей сети на 10%. Для достижения величины напряжения цепи постоянного тока, равной 794 В, значение коэффициента модуляции активного выпрямителя должно быть равно:

$$\mu_{\text{ABmin}} = \frac{2\sqrt{2}U_{\phi.c}}{U_{d \text{ max}}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 220 \cdot 0,9}{794} = 0,703. \quad (3.28)$$

Следует отметить, что при уменьшении коэффициента модуляции активного выпрямителя μ существенно увеличивается коэффициент гармоник напряжения сети переменного тока $k_{г.н1}$.

Зависимость $k_{г.н1}$ от μ представлена формулой (3.29):

$$k_{г.н1} = \sqrt{\frac{1,472}{\mu} - 1}. \quad (3.29)$$

Для подавления высших гармоник сети переменного тока на входе активного выпрямителя необходимо устанавливать L-C фильтр.

$$\omega^2 LC \approx \frac{1}{v^2} \left(1 + \frac{k_{г.н1}}{k_{г.н2}} \right), \quad (3.30)$$

где $v = f_{нec}/f_{мод} = 2500/50 = 50$.

Величину емкости фильтра определим по формуле (3.30) подставив в эту формулу значение индуктивности, рассчитанное по формуле (3.26).

Значение угловой частоты сети $\omega = 2\pi f_c = 314 \text{ c}^{-1}$.

При номинальном значении напряжения цепи постоянного тока, равном 690 В, номинальное значение коэффициента модуляции активного выпрямителя равно:

$$\mu_{A.BN} = \frac{2\sqrt{2}U_{\phi.c}}{U_{d \max}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 220}{690} = 0,899.$$

При номинальном режиме работы активного выпрямителя величина коэффициента гармоник напряжения сети переменного тока существенно меньше.

Рассчитанное значение коэффициент модуляции активного выпрямителя находится в допустимых пределах. Таким образом, проектируемый преобразователь частоты может быть выполнен без сетевого трансформатора.

3.3. Методика выбора конденсатора звена постоянного тока

Расчет параметров и выбор сглаживающего конденсатора производится с учетом следующих параметров:

k_n – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, о.е.;

$I_{\phi N}$ – номинальный фазный сетевой ток, А;

$I_{\phi \max}$ – максимальный фазный сетевой ток, А;

f_c – частота напряжения сети, Гц;

$f_{\text{шим}}$ – несущая частота ШИМ, Гц;

U_{dN} – напряжение в звене постоянного тока номинальное, В.

Расчет величины емкости C_d по заданному уровню пульсаций выпрямленного напряжения проводится при следующих допущениях. Поскольку частота ШИМ много больше частоты первой гармоники сетевых токов, а потребляемые из сети токи близки по форме к синусоиде, то на интервале ШИМ мгновенное значение сетевого тока можно принять постоянным.

Изменение напряжения на конденсаторе в течение интервала ШИМ определяется как:

$$\Delta U_{\text{дШИМ}} = \frac{I_{\text{ср}} T_{\text{и}}}{C_d}, \quad (3.31)$$

где $I_{\text{ср}}$ – средний за интервал ШИМ ток конденсатора;

$T_{\text{и}}$ – период следования импульсов, в режиме симметричной ШИМ $T_{\text{и}} = 0,5 T_{\text{ШИМ}}$.

Среднее значение выходного тока ПК АВН на интервале ШИМ в номинальном режиме $I_{\text{пк.ср}}$ может быть определено следующим образом:

$$I_{\text{пк.ср}} = I_{\text{ф.н}} \mu \frac{3}{2\sqrt{2}} \cos \varphi_{(1)}, \quad (3.32)$$

или

$$I_{\text{пк.ср}} = P_d / U_d. \quad (3.33)$$

Максимальное возможное среднее значение тока конденсатора при модифицированной симметричной синусоидальной или векторной ШИМ составляет:

$$I_{\text{пк.ср}} = I_{\text{пк.ср.макс}} = \frac{I_{\text{ф.н}} \sqrt{3}}{\sqrt{2}}. \quad (3.34)$$

Из уравнений (3.31) и (3.34) определим требуемое значение емкости конденсатора исходя из заданной величины пульсаций:

$$C_d = \frac{I_{\text{ф.н}} T_{\text{ШИМ}} \sqrt{3}}{\Delta U_{\text{дШИМ}} \sqrt{2}}. \quad (3.35)$$

Сравнив величину емкости конденсатора цепи постоянного тока, рассчитанные по формулам (3.8) и (3.35), выбирается наибольшее значение. Конденсатор выбирается по справочным данным, приведенным в разделе 5.

Расчет потерь мощности в транзисторах и диодах активного выпрямителя и расчет площади радиатора выполняется по формулам (3.9) – (3.22).

3.4. Разработка структурной схемы системы частотного управления асинхронного электропривода с обратной связью по скорости

Эта система частотного управления реализуется в расчетах электроприводов грузоподъемных механизмов и тележки мостового крана

Для увеличения диапазона регулирования скорости АД система управления должна быть выполнена с отрицательной обратной связью по скорости. Структурная схема системы частотного управления асинхронного электропривода с обратной связью по скорости приведена на рис. 3.6.

Рассмотрим методику расчета параметров структурной схемы электропривода, приведенной на рис.3.6.

Модуль жёсткости линеаризованной механической характеристики АД, β :

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_{1N}s_k},$$

где M_k – критический момент;

$\omega_{1N}=2\pi f_{1N}/p_{\text{п}}$ – номинальное значение угловой частоты магнитного поля двигателя.

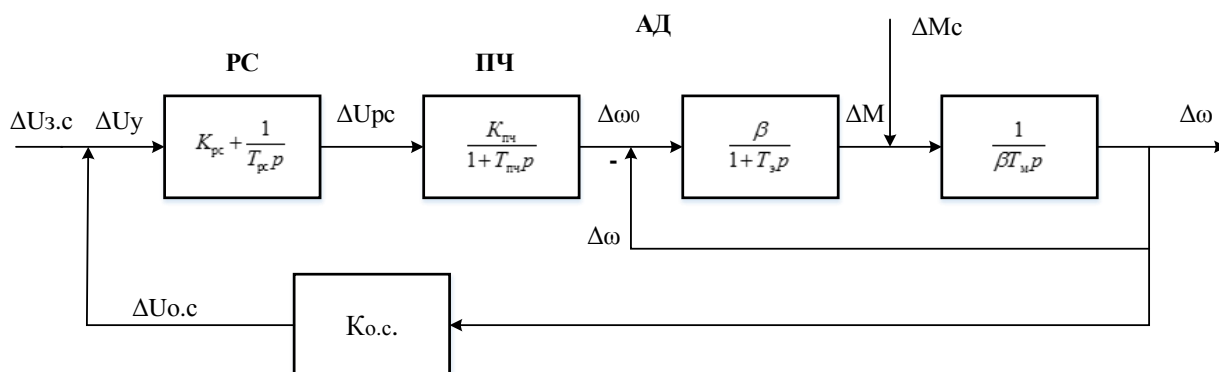


Рис. 3.6. Структурная схема системы частотного управления асинхронного электропривода с обратной связью по скорости

Значения M_k и s_k приведены в паспортных данных двигателя.

T_3 – эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепей статора и ротора АД:

$$T_3 = \frac{1}{\omega_{cN}s_k},$$

где $\omega_{cN}=2\pi f_{1N}$ – номинальное значение угловой частоты напряжения, питающего двигатель;

T_m – эквивалентная электромеханическая постоянная времени электропривода:

$$T_M = J/\beta = J\omega_{1NSK}/2M_K,$$

J - эквивалентный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя. Определяется по результатам расчета разделов 1.1, 1.2 и 1.3.

$K_{ПЧ}$ - коэффициент передачи преобразователя частоты

$$k_{ПЧ} = \Delta\omega_1 / \Delta U_{p.cN} = 2\pi\Delta f_1 / (p_{ПЧ} \Delta U_{p.cN}) = 2\pi f_{1N} / (p_{ПЧ} * U_{y.ПЧN}),$$

где $U_{p.cN}$ - номинальное значение выходного напряжения регулятора скорости, подаваемого на вход преобразователя частоты.

При работе АД в зоне частот $f_1 \leq f_{1ном} = 50 Гц$ и номинальном сигнале управления преобразователем $U_{y.ПЧN}$ соотношение

$$\frac{\Delta f_1}{\Delta U_{p.c}} = \frac{f_{1N}}{U_{y.ПЧN}},$$

$U_{y.ПЧN}$ может быть принято равным 10 В.

$T_{ПЧ}$ - постоянная времени цепи управления ПЧ, которая при высоких частотах модуляции выходного напряжения ПЧ не превышает 0,001с.

Схема пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятор) скорости приведена на рис. 3.7.

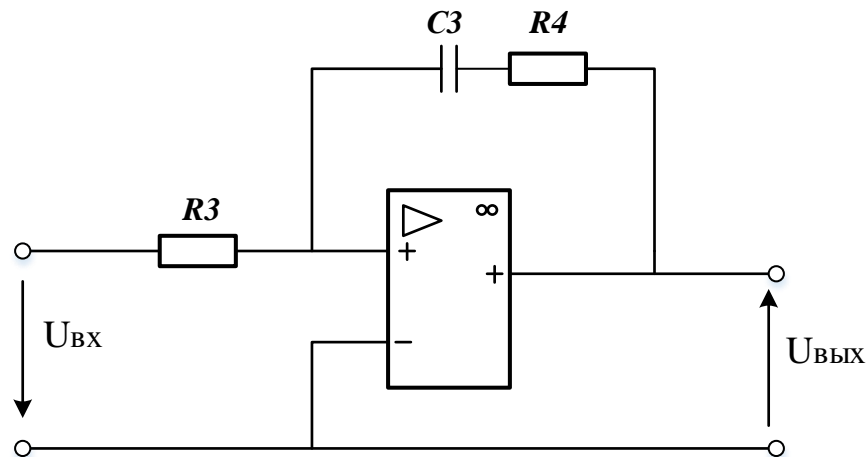


Рис. 3.7. Схема ПИ-регулятора

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости:

$$W_{PC}(p) = \frac{\Delta U_{PC}}{\Delta U_y} = K_{PC} + \frac{1}{T_{PC}p}.$$

Передаточная функция цепи обратной связи по скорости двигателя:

$$W_{oc}(p) = \Delta U_{o.c} / \Delta \Omega = k_{o.c}$$

При номинальном сигнале управления ЭП, равном $U_{3.c.ном}$ и соответствующей ему номинальной скорости АД:

$$k_{o.c} = U_{3.cN} / \Omega_N.$$

Величина напряжения $U_{3.cN}$ может быть принята равной 10 В. Результирующая передаточная функция двигателя по управляющему воздействию – угловой частоте напряжения, подаваемого на обмотку статора:

$$W_d(p) = \frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega_1} = \frac{1}{T_\varepsilon T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

При $T_M \geq 4T_\varepsilon$

$$W_d(p) = \frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega_1} = \frac{1}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)}.$$

где:

$$\frac{1}{T_{01}} = \frac{1}{2T_\varepsilon} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_\varepsilon}{T_M}} \right) \text{ и}$$

$$\frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{2T_\varepsilon} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T_\varepsilon}{T_M}} \right).$$

Если отнести T_{02} и $T_{ПЧ}$ к малым некомпенсированным постоянным и в качестве оценки их влияния принять

$$T_\mu = T_{02} + T_{ПЧ},$$

то при настройке электропривода на модульный оптимум постоянная интегрирования и коэффициент передачи пропорциональной части регулятора РС определяются так:

$$T_{pc} = k_{o.c} \cdot k_{пч} \cdot a_\mu \cdot T_\mu;$$

$$k_{p.c} = \frac{T_{01}}{T_{p.c}},$$

Коэффициент $a_\mu = 2 \dots 4$.

Контрольное задание на расчет системы частотного управления асинхронного электропривода

В таблице 3.1 приведены варианты контрольных заданий по темам «Асинхронный электропривод с частотным управлением грузоподъемного механизма» и «Асинхронный электропривод с частотным управлением тележки мостового крана».

Для закрепления теоретического материала необходимо выполнить расчет одного асинхронного электропривода в соответствии с заданием, используя результаты выполнения контрольных заданий 1.1 или 1.2.

Параметры питающей сети едины для всех вариантов задания:

Число фаз $m=3$; напряжение $U_c=220/380$ В; частота $f_c=50$ Гц.

Таблица 3.1.

Контрольные задания для самостоятельной работы

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметры АД	Вар №1 КЗ№1	Вар №2 КЗ№2	Вар №3 КЗ№1	Вар №4 КЗ№2	Вар №5 КЗ№1	Вар №6 КЗ№2	Вар №7 КЗ№1	Вар №8 КЗ№2	Вар №9 КЗ№1
Коэф-т гармоник сетевого тока, k_T , о.е.	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06
Коэфф пульс напр. цепи пост тока, k_P , о.е	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,005	0,006	0,007
Перерегул. σ не более, %	5	6	7	8	9	8	7	6	5
Время перех процесса. $t_{п.п}$, не более, с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,4	0,3

№ вар.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Параметры АД	Вар №2 КЗ№2	Вар №1 КЗ№1	Вар №2 КЗ№2	Вар №1 КЗ№1	Вар №2 КЗ№2	Вар №1 КЗ№1	Вар №2 КЗ№2	Вар №1 КЗ№1	Вар №2 КЗ№2
Коэф-т гармоник сетевого тока, k_T , о.е.	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06
Коэфф пульс напр. цепи пост тока, k_P , о.е,	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,005	0,006	0,007
Перерегул. σ , не более, %	6	7	8	9	8	7	6	5	6
Время перех. процесса. $t_{п.п}$, не более, с	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,4

№ вар.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Параметры АД	Вар №1 КЗ№3	Вар №2 КЗ№3	Вар №1 КЗ№3	Вар №2 КЗ№3	Вар №1 КЗ№3	Вар №2 КЗ№3	Вар №1 КЗ№3	Вар №2 КЗ№3	Вар №1 КЗ№3
Коэф-т гармоник сетевого тока, k_T , о.е.	7	8	9	8	7	6	5	6	7
Коэфф пульс напр. цепи пост тока, кп, о.е	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06
Перерегул. σ , не более, %	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,005	0,006	0,007
Время перех. проц. $t_{п.п.}$, не более, с	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5

Порядок выполнения задания:

- Изучить устройство, кинематическую схему асинхронного электропривода с частотным управлением, принцип работы, вывод основных расчетных соотношений асинхронного электропривода с частотным управлением.
- Для заданного варианта задачи необходимо:
 - воспользоваться результатами выполнения своего варианта задания по теме «Выбор электродвигателя для электропривода грузоподъемного механизма» или «Выбор электродвигателя для тележки мостового крана»;
 - привести параметры выбранного асинхронного двигателя;
 - рассчитать загрузку транзисторов по току и напряжению и выбрать транзисторы;
 - рассчитать параметры регулятора скорости замкнутой системы электропривода;
 - рассчитать параметры передаточной функции электропривода;
 - исследовать динамические характеристики разработанного электропривода на модели Симулинк.
 - привести осциллограммы переходных процессов и дать им качественную характеристику.

4. Темы и задания на курсовую работу для проверки уровня освоения студентами компетенций

Известно, что наиболее достоверные результаты проверки уровня освоения студентами компетенций, предусмотренных программой дисциплины «Электрический привод», могут быть получены при курсовом проектировании. При реализации этого вида занятий студенты решают достаточно сложную инженерную задачу и тем самым подготавливаются к самостоятельной инженерной деятельности. По изученному в учебном пособии разделу дисциплины «Электрический привод» можно предложить следующие темы и задания для курсового проектирования.

Тема 4.1: Асинхронный частотно управляемый электропривод грузоподъемного механизма

Параметры исходных данных:

- масса груза $m =$ кг;
- скорость подъема $v_{п} =$ м/с;
- группа классификации (режима) механизма по ИСО 4301/1 (ГКМ);
- $k_{г.т}$ – коэффициент гармоник сетевого тока, о.е.;
- $k_{н2}$ – коэффициент гармоник сетевого напряжения, о.е.;
- $k_{п}$ – коэффициент пульсаций напряжения цепи постоянного тока, о.е.;
- σ – коэффициент перерегулирования, %;

Параметры питающей сети едины для всех вариантов задания:

Число фаз $m=3$; напряжение $U_c=220/380$ В; частота сети $f_c=50$ Гц.

Таблица 4.1

Исходные данные вариантов заданий курсовой работы №1

№ варианта	m , кг	$v_{п}$, м/с	ГКМ	$k_{г.т}$, о.е.	$k_{н2}$, о.е.	$k_{п}$, о.е.	σ , % не более
1	500	0,33	M3	0,05	0,05	0,10	7
2	600	0,44	M4	0,06	0,06	0,09	8
3	700	0,55	M5	0,07	0,07	0,08	10
4	800	0,66	M2	0,08	0,08	0,07	11
5	900	0,77	M3	0,05	0,05	0,06	12
6	1000	0,70	M4	0,06	0,06	0,11	13
7	1100	0,60	M5	0,07	0,07	0,12	14
8	1200	0,50	M2	0,08	0,08	0,13	15
9	1300	0,40	M3	0,05	0,05	0,14	16

10	1400	0,30	M4	0,06	0,06	0,15	17
11	1500	0,36	M5	0,07	0,07	0,10	7
12	1600	0,46	M2	0,08	0,08	0,09	8
13	1700	0,56	M3	0,05	0,05	0,08	10
14	1800	0,66	M4	0,06	0,06	0,07	11
15	1900	0,76	M5	0,07	0,07	0,06	12
16	2000	0,75	M2	0,08	0,08	0,11	13
17	2100	0,65	M3	0,05	0,05	0,12	14
18	2200	0,55	M4	0,06	0,06	0,13	15
19	2300	0,45	M5	0,07	0,07	0,14	16
20	2400	0,39	M2	0,08	0,08	0,15	17
21	2500	0,34	M3	0,05	0,05	0,10	7
22	2600	0,44	M4	0,06	0,06	0,09	8
23	2700	0,48	M5	0,07	0,07	0,08	10
24	2800	0,38	M2	0,08	0,08	0,07	11
25	3000	0,28	M3	0,05	0,05	0,06	12

Тема 4.2: Асинхронный частотно управляемый электропривод тележки мостового крана

Параметры исходных данных:

- масса полезного груза $m_T =$ кг;
- скорость движения тележки $v_T =$ м/с;
- момент инерции муфты с тормозом на валу двигателя $J_{M.T},$ кгм²;
- момент инерции ходового вала с муфтами и ходовыми колесами $J_{X.K},$ кгм²;
- длина пролета моста $L =$ м.

Параметры питающей сети едины для всех вариантов задания:

Число фаз $m=3$; напряжение $U_c=220/380$ В; частота сети $f_c=50$ Гц.

Таблица 4.2

Исходные данные вариантов заданий курсовой работы №2

№ варианта	$m_T,$ кг	$v_T,$ м/с	$L,$ м	Момент инерции, кг·м ²		$k_{Г.Т},$ о.е.	$k_{H2},$ о.е.	$k_{п},$ о.е.	$\sigma,$ %
				$J_{M.T}$	$J_{X.K}$				
1	500	0,3	20	0,10	0,90	0,05	0,05	0,10	7
2	600	0,4	22	0,11	0,89	0,06	0,06	0,09	8
3	700	0,5	24	0,12	0,88	0,07	0,07	0,08	10

4	800	0,6	26	0,13	0,87	0,08	0,08	0,07	11
5	900	0,7	28	0,14	0,86	0,05	0,05	0,06	12
6	1000	0,8	30	0,15	0,85	0,06	0,06	0,11	13
7	1100	0,9	32	0,16	0,84	0,07	0,07	0,12	14
8	1200	1,0	34	0,17	0,83	0,08	0,08	0,13	15
9	1300	0,9	36	0,10	0,82	0,05	0,05	0,14	16
10	1400	0,8	38	0,11	0,81	0,06	0,06	0,15	17
11	1500	0,7	40	0,12	0,80	0,07	0,07	0,10	7
12	1600	0,6	38	0,13	0,79	0,08	0,08	0,09	8
13	1700	0,5	36	0,14	0,78	0,05	0,05	0,08	10
14	1800	0,4	34	0,15	0,77	0,06	0,06	0,07	11
15	1900	0,3	32	0,16	0,76	0,07	0,07	0,10	12
16	2000	0,4	30	0,17	0,75	0,08	0,08	0,09	13
17	1850	0,5	28	0,10	0,74	0,05	0,05	0,08	14
18	1750	0,6	26	0,11	0,73	0,06	0,06	0,07	15
19	1650	0,7	24	0,12	0,72	0,07	0,07	0,06	16
20	1550	0,8	22	0,13	0,71	0,08	0,08	0,11	17
21	1450	0,9	20	0,14	0,70	0,05	0,05	0,12	7
22	1350	1,0	18	0,15	0,69	0,06	0,06	0,13	8
23	1250	0,9	16	0,16	0,68	0,07	0,07	0,14	10
24	1150	0,8	21	0,17	0,67	0,08	0,08	0,15	11
25	1050	0,7	23	0,10	0,66	0,05	0,05	0,10	12
26	950	0,6	25	0,11	0,65	0,06	0,06	0,09	7

Тема 4.3: Асинхронный электропривод вентилятора с фазовым управлением

Параметры исходных данных:

- диаметр трубы, $D_{тр} =$ мм;
- скорость потока воздуха, $v_{п} =$ м/с;
- напор воздуха статический, $H_c =$ Па;
- допустимый перепад скорости вращения замкнутой системы, $\Delta\Omega_{з.с} =$ %;
- величина сигнала задания скорости вращения, $\bar{U}_{з.с1} =$,о.е.;
- величина сигнала задания скорости вращения, $\bar{U}_{з.с2} =$,о.е.;
- допустимое значение перерегулирования скорости вращения, $\sigma =$ %.

Параметры питающей сети едины для всех вариантов задания:

Число фаз $m=3$; напряжение $U_c=220/380$ В; частота сети $f_c=50$ Гц.

Исходные данные вариантов заданий курсовой работы №3

№ варианта	$D_{тр}$, мм	$v_{п}$, м/с	H_c , Па	$\Delta\Omega_{з.с.}$, %	$\bar{U}_{з.с.1}$, о.е.	$\bar{U}_{з.с.2}$, о.е.	σ , %. Не более
1	200	10	1036	1	0,85	0,05	10,0
2	210	12	1207	2	0,80	0,06	11,0
3	220	14	1274	3	0,75	0,07	12,0
4	230	15	1255	4	0,70	0,08	13,0
5	240	16	1335	5	0,65	0,09	14,0
6	250	17	1314	1	0,6	0,1	15,0
7	260	18	1491	2	0,85	0,09	16,0
8	270	19	1467	3	0,80	0,08	17,0
9	280	20	1442	4	0,75	0,07	18,0
10	290	21	1415	5	0,70	0,06	19,0
11	300	22	1488	1	0,65	0,05	20,0
12	310	23	1459	2	0,6	0,04	21,0
13	320	24	1428	3	0,85	0,05	10,0
14	330	25	1447	4	0,80	0,06	11,0
15	340	24	1428	5	0,75	0,07	12,0
16	350	23	1459	1	0,70	0,08	13,0
17	360	22	1488	2	0,65	0,09	14,0
18	370	21	1415	3	0,6	0,1	15,0
19	380	20	1442	4	0,85	0,09	16,0
20	390	21	1415	5	0,80	0,08	17,0
21	400	22	1488	1	0,75	0,07	18,0
22	410	23	1459	2	0,70	0,06	19,0
23	420	24	1428	3	0,65	0,05	20,0
24	430	25	1447	4	0,6	0,04	21,0
25	440	26	1463	5	0,85	0,05	10,0

Порядок выполнения курсовой работы:

- изучить устройство, принцип работы, основы методики расчета электропривода, вариант которого указан в задании на курсовую работу.

- рассчитать загрузку асинхронного двигателя по мощности (моменту) и скорости. Выбрать двигатель, записать паспортные данные двигателя.

- выполнить расчет силовой схемы полупроводникового преобразователя электропривода.

- выполнить расчет характеристик разомкнутой и замкнутой схемы электропривода.
- рассчитать параметры структурной схемы заданной системы управления асинхронного электропривода с обратной связью по скорости.
- выполнить компьютерное моделирование замкнутой по скорости системы управления асинхронного электропривода.
- привести в пояснительной записке курсовой работы схемы и графики результатов выполненных расчетов и исследований.
- выполнить анализ результатов моделирования электромеханических переходных процессов спроектированного электропривода.

5. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ, ДРОССЕЛЯМ, ТИРИСТОРАМ, ТРАНЗИСТОРАМ И КОНДЕНСАТОРАМ

Таблица 5.1

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии МТК (крановые)

Двигатели серии МТК (крановые) 380 В, 50 Гц, 25% ПВ								
	P_N , кВт	n_N , об/мин	I_{cN} , А	$\cos\varphi_N$	$M_{кр}/$ M_N	$M_{пуск}/$ M_N	$I_{пуск}/$ I_N	J , кг·м ²
МТК011-6	1,4	870	4,8	0,69	2,8	2,8	3,0	0,02
МТК012-6	2,2	875	7,2	0,7	2,8	2,8	3,1	0,0275
МТК111-6	3,5	870	10,1	0,74	2,8	2,8	3,5	0,0462
МТК112-6	5,0	890	13,5	0,75	3,0	3,0	3,9	0,065
МТК211-6	7,5	905	18,4	0,79	2,9	2,8	4,3	0,11
МТКВ311-6	11,0	910	26,0	0,8	3,1	2,8	4,9	0,212
МТКВ311-8	7,5	680	20	0,74	3,1	2,9	4,4	0,262
МТКВ312-6	16	905	37,8	0,79	3,1	2,8	4,9	0,3
МТКВ312-8	11	690	30,4	0,71	3,3	3,1	4,9	0,0375
МТКВ411-6	7,5	935	50	0,78	3,0	2,8	5,2	0,475
МТКВ411-8	16	695	41	0,73	3,3	3,0	4,8	0,512
МТКВ412-6	11	945	62	0,81	3,3	2,8	5,6	0,637

Таблица 5.2

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии МТН (крановые)

Марка двигателя	Мощность $P_{дN}$ при ПВ, кВт			Ток статора I_c , А	$\cos\varphi$	η	$M_{кр}/$ M_N	J_p кг*м ²	n_N , об/мин	Ма сса m , кг
	15%	25%	40%							
МТН 011-6	1,7								845	51
		1,4		8,6		65	2,6	0,021	885	
			1,1						915	
МТН 012-06	2,7								855	58
		2,2		11		70	2,7	0,026	890	
			1,8						920	
МТН 111-6	4,3								870	76
		3,5		18,2/ 10,5		75	2,3	0,06	905	
			2,8						930	

МТН 112-6	6,3							895	88	
		5,0		23,4/ 13,5		77	2,3	0,06		920
			4,2							935
МТН 211-6	9,5							915	120	
		7,5		32/18,5		79	2,5	0,15		935
			6,3							950
МТН 311-6	14							930	170	
		11		44,6/25,8		84	2,8	0,34		950
			9							960
МТН 312-6	20							945	210	
		16		58,5/33,8		84	2,8	0,39		960
			13							970
МТН 411-6	27							955	280	
		22		87/50,4		86	2,8	0,39		965
			17							975
МТН 412-6	37							960	345	
		30		107,2/62	0,79	88	2,8	0,39		970
			24							975
МТН 512-6	50			955	0,81	88	2,9	720	500	
		40						725		
			31					730		

Таблица 5.3

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

Тип ЭД	P_N , кВт	При номинальной нагрузке			$M_{кр}/$ M_{min}	$M_{пуск}/$ M_N	$I_{пуск}/$ I_N	J , кг·м ²
		n , об/мин	η , %	$\cos\varphi_1$				
Синхронная скорость вращения 750 об/мин								
4A71B6Y3	0,25	680	56	0,65	1,7	1,6	3,0	$18,5 \cdot 10^{-4}$
4A80BSY3	0,55	700	64	0,65	1,7	1,6	3,5	$33,8 \cdot 10^{-4}$
4A90LD8Y3	1,1	700	70	0,68	1,9	1,6	3,5	$86,3 \cdot 10^{-4}$
4A112MA8Y3	2,2	700	76,5	0,71	2,2	1,9	5,0	$1,75 \cdot 10^{-2}$
4A132S8Y3	4,0	720	83,0	0,70	2,6	1,9	5,5	$4,25 \cdot 10^{-2}$
4A160S8Y3	7,5	730	86,0	0,75	2,2	1,4	6,0	$13,8 \cdot 10^{-2}$
4A186M8Y3	15,0	730	87,0	0,82	2,2	1,2	6,0	$25 \cdot 10^{-2}$

4A225M8Y3	30,0	735	90,0	0,81	2,1	1,3	6,0	$73,8 \cdot 10^{-2}$
4A25M8Y3	45,0	740	91,0	0,81	2,0	1,2	6,0	1,36
4A315S8Y3	90,0	740	93,0	0,85	2,3	1,2	6,3	4,93
4A355M8Y3	160,0	740	93,5	0,85	2,2	1,2	6,5	10,2
Синхронная скорость вращения 600 об/мин								
4A250S10Y3	30,0	500	88,0	0,81	1,0	1,2	6,0	1,36
4A280M10Y3	45,0	500	91,5	0,78	1,8	1,0	6,0	3,78
4A355M10Y3	110	500	93,0	0,83	1,8	1,0	6,0	10,0
Синхронная скорость вращения 500 об/мин								
4A315S12Y3	45,0	490	90,5	0,75	1,8	1,0	6,0	5,25
4A315M12Y3	55,0	490	91,0	0,75	1,8	1,0	6,0	6,18
4A355S12Y3	75,0	490	91,5	0,76	1,8	1,0	6,0	9,33
4A355M12Y3	90,0	92,0	0,76	0,76	1,8	1,0	6,0	10,0

Таблица 5.4

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии 4А

Тип АД	Номинальные показатели					$I_{п}/I_{N}$	$M_{п}/M_{N}$	$M_{кр}/M_{N}$	$J, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
	$P_{N}, \text{ кВт}$	$n, \text{ об/мин}$	$I_{\phi N}, \text{ А}$	$\eta, \%$	$\cos \varphi$				
$n_c=3000 \text{ об/мин}$									
4A71AY3	0,75	2840	1,7	77	0,87	5,5	2,0	2,2	$3,9 \cdot 10^{-3}$
4A71B2Y3	1,1	2810	2,5	77,5	0,87	5,5	2,0	2,2	$4,2 \cdot 10^{-3}$
4A80A2Y3	1,5	2850	3,3	81,0	0,85	6,5	2,1	2,6	$7,3 \cdot 10^{-3}$
4A80B2Y3	2,2	2850	4/7	83,0	0,87	6,5	2,1	2,6	$8,5 \cdot 10^{-3}$
4A902Y3	3	2840	6,1	84,5	0,88	6,5	2,1	2,5	$1,4 \cdot 10^{-2}$
4A1002Y3	4,0	2880	7,8	86,5	0,89	7,5	2,0	2,5	$2,3 \cdot 10^{-2}$
4A1102Y3	5,5	2880	10,5	87,5	0,91	7,5	2,0	2,5	$3,0 \cdot 10^{-2}$
4A112M2Y3	7,5	2900	14,9	87,5	0,88	7,5	2,0	2,8	$4,0 \cdot 10^{-2}$
4A132M2Y3	11,0	2900	21,2	88,0	0,90	7,5	1,7	2,2	$9,0 \cdot 10^{-2}$
4A160S2Y3	15	2940	28,5	88,0	0,91	7,0	1,4	2,2	$1,9 \cdot 10^{-1}$
4A160M2Y3	18,5	2940	34,5	88,5	0,92	7,0	1,4	2,5	$2,1 \cdot 10^{-1}$
4A1802SY3	22	2945	41,6	88,5	0,91	7,5	1,4	2,5	$2,8 \cdot 10^{-1}$
4A180M2Y3	30	2945	56	90,5	0,90	7,5	1,4	2,5	$3,4 \cdot 10^{-1}$
$n_c=1500 \text{ об/мин}$									
4A71A4Y3	0,55	1390	1,7	70,5	0,70	4,5	2,0	2,2	$5,2 \cdot 10^{-3}$
0.75	0,75	1390	2,17	72,0	0,73	4,5	2,0	2,2	$5,7 \cdot 10^{-3}$
4A80A4Y3	1,1	1420	2,76	75,0	0,81	5,0	2,0	2,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$
4A80B4Y3	1,5	1415	3,57	77,0	0,83	5,0	2,0	2,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$
4A90L4Y3	2,2	1425	5,02	80,0	0,83	6,0	2,1	2,4	$2,2 \cdot 10^{-2}$

4A100S4Y3	3,0	1435	6,7	82,0	0,83	6,0	2,0	2,4	$3,5 \cdot 10^{-2}$
4A100L4Y3	4,0	1430	8,6	84,0	0,84	6,0	2,0	2,4	$4,5 \cdot 10^{-2}$
4A112M4Y3	5,5	1445	11,5	85,5	0,85	7,0	2,0	2,2	$7,0 \cdot 10^{-2}$
4A132S4Y3	7,5	1445	11,1	87,5	0,86	7,5	2,0	3,0	$11 \cdot 10^{-2}$
4A132M4Y3	11,0	1460	22,0	87,5	0,87	7,5	2,2	3,0	$16 \cdot 10^{-1}$
4A160S4Y3	15	1465	29,3	88,5	0,88	7,0	2,2	2,3	$41 \cdot 10^{-1}$
4A160M4Y3	18,5	1465	35,7	89,5	0,88	7,0	1,4	2,3	$51 \cdot 10^{-1}$
4A180S4Y3	22	1470	41,3	90,0	0,90	6,5	1,4	2,3	$76 \cdot 10^{-1}$
4A180M4Y3	30	1470	56,0	91,0	0,89	6,5	1,4	2,3	$93 \cdot 10^{-1}$
$n_c=1000$ об/мин									
4A80A6Y3	0,75	915	2,24	69,0	0,74	4,0	2,0	2,2	$18,5 \cdot 10^{-3}$
4A80B6Y3	1,1	920	3,05	74,0	0,74	4,0	2,0	2,2	$18,4 \cdot 10^{-3}$
4A90L6Y3	1,5	935	4,10	75,0	0,74	4,5	2,0	2,2	$29,4 \cdot 10^{-3}$
4A90L6Y3	1,5	935	4,10	75,0	0,74	4,5	2,0	2,2	$29,4 \cdot 10^{-3}$
4A100L6Y3	2,2	950	5,65	81,0	0,73	5,0	2,0	2,2	$52,4 \cdot 10^{-3}$
4A112MA6Y3	3,0	955	7,40	81,0	0,76	6,0	2,0	2,5	$70 \cdot 10^{-3}$
4A112MB6Y3	4,0	950	9,13	82,0	0,81	6,0	2,0	2,5	$8 \cdot 10^{-2}$
4A132S6Y3	5,5	965	12,2	85,0	0,80	6,5	2,0	2,5	$16 \cdot 10^{-2}$
4A132M6Y3	7,5	870	16,5	85,5	0,81	6,5	2,0	2,5	$23 \cdot 10^{-2}$
4A160S6Y3	11,0	975	22,6	86,0	0,86	6,0	1,2	2,0	$55 \cdot 10^{-2}$
4A160M6Y3	15	975	30,0	87,5	0,87	6,0	1,2	2,0	$73 \cdot 10^{-2}$
4A180M6Y3	18,5	975	36,6	88,0	0,87	5,0	1,2	2,0	$88 \cdot 10^{-2}$
4A200M6Y3	22	975	41,3	90,0	0,90	6,5	1,3	2,4	$16 \cdot 10^{-1}$
4A200L6Y3	30	980	56,0	90,5	0,90	6,5	1,3	2,4	$18,1 \cdot 10^{-1}$

Таблица 5.5

Дроссели типа Д

Обозначение дросселя	L , Гн	$I_{об.}$, А	$U_{доп. д. з. пер. сост. напр.}$, В на частоте 5 кГц	$R_{об.}$, Ом
Д274	5,0	0,4		42,4
Д273	0,6	1,1		6,08
Д272	0,3	1,6		2,92
Д271	0,04	4,5		0,324
Д270	0,02	6,3		0,1488
Д269	0,0025	18		0,0208
Д268	0,0012	25		0,0096
Д262	0,01	6,3		0,16
Д261	0,0012	18		0,0172
Д260	0,0006	25		0,0076

Д254	0,01	4,5		0,22
Д253	0,0012	12,5		0,0248
Д252	0,0006	18		0,01168
Д301	0,0004	1,6	2,52	0,1
Д302	0,0008	1,1	3,36	0,18
Д307	0,0004	2,2	3,1	0,19
Д308	0,0004	1,6	4,2	0,33
Д313	0,0004	3,2	3,82	0,13
Д314	0,0008	2,2	5,72	0,24
Д320	0,0004	4,5	6,02	0,082
Д321	0,0008	3,2	8,36	0,162
Д328	0,0004	6,3	7,92	0,056
Д336	0,0004	9	11,52	0,032
Д337	0,0008	6,3	15,84	0,075
Д338	0,006	2,2	48,8	0,83
Д339	0,0125	1,6	66,2	1,2
Д344	0,0004	12,5	20	0,045
Д345	0,0008	9	21,6	0,097
Д346	0,006	3,2	66	0,69
Д352	0,0004	18	21,6	0,014
Д353	0,0008	12,5	30,2	0,03
Д354	0,006	4,5	94	0,31
Д360	0,0004	25	28,8	0,0076
Д362	0,006	6,3	100	0,284
Д363	0,0125	4,5	100	0,45
Д364	0,112	1,6	100	2,52
Д369	0,00125	18	86,4	0,026

Примечание: Дроссели типа Д, рассчитанные на рабочий диапазон частот переменной составляющей от 5 кГц до 50 кГц, с индуктивностью от 0,0001 до 0,2 Гн и постоянной составляющей тока подмагничивания от 0,07 до 50 А предназначены для работы в источниках питания напряжением до 250 В. При параллельном соединении обмоток дросселя сопротивление и индуктивность уменьшаются в 4 раза, а ток увеличивается в 2 раза.

Таблица 5.6

Параметры оптотиристоров

Тип вентил Параметры	$U_{обр. max}, В$	$I_{в. ср.}, А$	$I_{имп max}, А$	$I_{в. ср.}, А$	$\Delta U_{в. пр.}, В$	$R_{в. дин} \cdot 10^{-3}, Ом$	$t_{выкл.}, мкс$	Тип охладителя
ТО125-10	100-1000	10	0,40	8	1,6		100	0325
ТО125-12,5	100-1000	12,5	0,45	8,5	1,4	11,0	100	0325
ТО2-10	100-1000	10	0,40	8	1,75	13,0	50-150	0241-80
ТО2-40	100-1000	40	0,75	19	1,75	4,7	50-150	0241-80
ТО132-25	100-1200	25	0,60	13	1,85	-	50-150	0231
ТО132-40	100-1200	40	0,75	15	1,75	-	50-150	0231
ТО142-50	100-1200	50	0,80	17	1,85	-	50-150	0241
ТО142-63	100-1200	63	1,2	19	1,75	-	50-150	0241
ТО142-80	100-1200	80	1,35	20	1,75	-	50-150	0241
ТЧ-100	100-1200	100	3,1	72	2,2	-	12-63	0171

Примечание: $I_{в. ср.}^0$ - это максимально допустимый средний ток оптодиристора с охладителем при естественном охлаждении и температуре окружающей среды 40 °С.

Таблица 5.7

Параметры тиристоров сильноточных

Тип вентил Параметры	T271-250; T271-320	T133-500 T133-630	T143-1000 T143-1250	T153-1600 T153-2000
Макс. обр. напр., $U_{в. обр. max}, В$	100-800	100-800	100-800	100-800
Доп. средний ток, $I_{в. ср.}, А$	250; 320	500; 630	1000; 1250	1600; 2000
Действующ. прямой ток, А	500	1000	1960	3140
Пороговое напряжение, В	1,5; 1,25	1,5	1,5	1,45
Диффер. сопрот., $R_{в. диф.}, мОм$	0,8	0,33	0,2	0,075
Отпирающий ток управления, А	0,15	0,15	0,20	0,20
Время выключ., не более, мкс	250	250	250	250

Ударный неповт. ток, $I_{уд.мах}$, А	11000 12600	11000 13200	21000 23000	33000 39000
Тип охладителя	0181	0143	0343	0253

Таблица 5.8

Основные характеристики IGBT модулей на 1700 В
(Фирма Semitran Semikron)

Тип IGBT модуль SKM	П а р а м е т р ы										
	I_K , А	I_{KN25} , °C), А	$\Delta U_{KЭ}$ нас, В	E_{on} , мДж	E_{off} , мДж	R_{thic} , °K/Вт	I_{VDN} , А	ΔU_B , пр, В	E_{rr} , мДж	R_{thjcD} , °K/Вт	R_{thjs} , °K/Вт
75GB176D	80	50	2	25	18	0,38	80	1,7	14,5	0,55	0,05
100GB176D	125	75	2	44	28,5	0,24	100	1,6	21,4	0,45	0,05
145GB176D	160	100	2	60	38	0,19	140	1,6	27,5	0,36	0,05
200GB176D	260	150	2	93	58	0,12	210	1,7	31	0,25	0,04
400GB176D	430	300	2	170	118	0,08	440	1,7	78	0,12	0,04
145GAL176D	160	100	2	60	38	0,19	140	1,6	27,5	0,36	0,05
200GAL176D	260	150	2	93	58	0,12	210	1,7	31	0,25	0,04
400GAL176D	430	300	2	170	118	0,08	440	1,7	78	0,12	0,04
600GA176D	660	400	2	255	155	0,04	600	1,6	102	0,09	0,04
800GA176D	830	600	2	335	245	0,04	630	1,6	155	0,09	0,04

Список обозначений:

- $I_{K(25^\circ C)}$ -длительно допустимый ток коллектора при температуре корпуса 25 градусов;
- I_{KN} -длительно допустимый ток коллектора при максимальной температуре корпуса;
- $\Delta U_{KЭ \text{ нас}}$ -напряжение насыщения коллектор-эмиттер;
- E_{ON} -потери энергии при включении;
- E_{OFF} -потери энергии на выключение;
- R_{thjcVT} -тепловое сопротивление переход-корпус (IGBT);
- $I_{VDN(25^\circ C)}$ -прямой ток (обратного диода) при температуре корпуса 25

градусов;

- $\Delta U_{в.пр}$ - (непосредственное) прямое падение напряжения (на обратном диоде);
- E_{rr} -потери энергии при обратном восстановлении (обратного диода);
- R_{thjcVD} -тепловое сопротивление переход-корпус (диод);
- R_{thjs} -тепловое сопротивление модуля (IGBT + диод);

Конденсаторы

Для конденсаторов с номинальным напряжением до 10 кВ номинальные напряжения устанавливаются из ряда (ГОСТ 9665—77): 1; 1,6; 2,5; 3,2; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 350; 400; 450; 500; 630; 800; 1000; 1600; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000; 6300; 8000; 10 000 В.

Таблица 5.9

Конденсаторы фольговые и металлизированные высокочастотные полипропиленовые (для выходных фильтров инверторов)

Наименование	Емкость, мкФ	U_{cN} , В
K78-2	0,001–2,2	250–2000
K78-11	0,01–22	200
K78-12	0,001–15	500–2000
K78-16	0,001–10	100
K78-19	0,01–22	200
K78-20	1–68	200–1000
K78-21	0,1–68	250–1000
K78-29	1–100	250–630
K78-37	0,001–68	250–630

Таблица 5.10

Конденсаторы металлобумажные герметизированные импульсные

Наименование	Емкость, мкФ	U_{cN} , В
МБГП-1,	0,1 - 10,0	1000
МБГП-2,	0,1 - 20,0	1600
МБГП-3	0,3 - 20,0	1600

Библиографический список

1. Мартынов А.А. Электрический привод: учеб. пособие. Санкт-Петербург: ГУАП. 2020. 134 с.
2. Мартынов А.А. Основы проектирования электрического привода: учеб. пособие. Санкт-Петербург: ГУАП. 2015. 524 с.
3. Краузе Г.Н., Кутилин Н.Д., Сыцко С.А. Редукторы. Справочное пособие. Издание 2-е, дополненное и переработанное. Изд-во «Машиностроение». Ленинград. 1972.
4. А.А. Мартынов. Проектирование и эксплуатация полупроводниковых преобразователей для электромехатронных систем: учебно-методическое пособие к проведению практических занятий и курсовой работы. / А.А. Мартынов. СПб.: ГУАП, 2020. 140 с.: ил.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1.1 Расчет мощности и выбор электродвигателя для электропривода грузоподъемного механизма.....	5
1.2. Расчет мощности и выбор электродвигателя для электропривода тележки мостового крана	14
1.3. Расчет мощности и выбор электродвигателя для электропривода вентилятора.....	24
2. Асинхронный электропривод с параметрическим (фазовым) управлением	28
2.1. Расчет характеристик асинхронного электропривода при фазовом способе управления.....	32
2.2. Расчет естественной и искусственных механических характеристик разомкнутого электропривода	34
2.3. Разработка структурной схемы системы управления асинхронного электропривода с фазовым управлением.....	39
3. Асинхронный электропривод с частотным управлением.....	44
3.1. Расчет инвертора напряжения	50
3.2. Расчет потерь мощности в транзисторах и диодах инвертора. Расчет площади радиатора	53
3.3. Методика выбора конденсатора звена постоянного тока.....	57
3.4. Разработка структурной схемы системы частотного управления асинхронного электропривода с обратной связью по скорости.....	59
4. Темы и задания на курсовую работу для проверки уровня освоения студентами компетенций.....	64
Тема 4.1: Асинхронный частотно управляемый электропривод грузоподъемного механизма	64
Тема 4.2: Асинхронный частотно управляемый электропривод тележки мостового крана.....	65
Тема 4.3: Асинхронный электропривод вентилятора с фазовым управлением	66
5. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ, ДРОССЕЛЯМ, ТИРИСТОРАМ, ТРАНЗИСТОРАМ И КОНДЕНСАТОРАМ	69
Библиографический список	77

