

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Институт энергетики и природопользования**

**Безик В.А.**

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

**Учебно-методическое пособие  
по выполнению практических работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,  
15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств**

**Брянская область 2023**

УДК 681.5 (076)  
ББК 31.291  
Б 39

Безик, В. А. Автоматизированный электропривод: учебно-методическое пособие по выполнению практических работ для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств / В. А. Безик. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2023. – 38 с.

Учебно-методическое пособие содержит краткие теоретические сведения, методические указания по выполнению практических работ и контрольные задания по вариантам. Пособие предназначено для использования при проведении практических занятий со студентами направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Рецензент: д.т.н., профессор кафедры электроэнергетики и электротехнологий ФГБОУ ВО Брянский ГАУ Кисель Ю.Е.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией института энергетики и природопользования, протокол № 4 от 27.01.2023 года.

© Брянский ГАУ, 2023  
© Безик В.А. 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчет экономической эффективности электропривода	4
2. Расчет параметров управляемого выпрямителя в цепи питания электродвигателя	9
3. Расчет вентильно-емкостного преобразователя	17
4. Замкнутые системы управления электроприводом	24
5. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением питающего напряжения	28
6. Реостатное регулирование скорости двигателей постоянного тока	32
Рекомендуемая литература	37

# 1. Расчет экономической эффективности электропривода

## Краткие теоретические сведения

В электрическом двигателе при преобразовании одного вида энергии в другой часть энергии теряется в виде теплоты, рассеиваемой в различных частях двигателя. В электрических двигателях имеются потери энергии трех видов: **потери в обмотках, потери в стали и механические потери**. Кроме того, имеются незначительные **добавочные потери**.

Потери энергии в асинхронном двигателе рассмотрим при помощи его энергетической диаграммы (рисунок 1.1). На диаграмме  $P_1$  - мощность, подводимая к статору двигателя из сети. Основная часть  $P_{эм}$  этой мощности, за вычетом потерь в статоре, передается электромагнитным путем на ротор через зазор.  $P_{эм}$  называется **электромагнитной мощностью**.

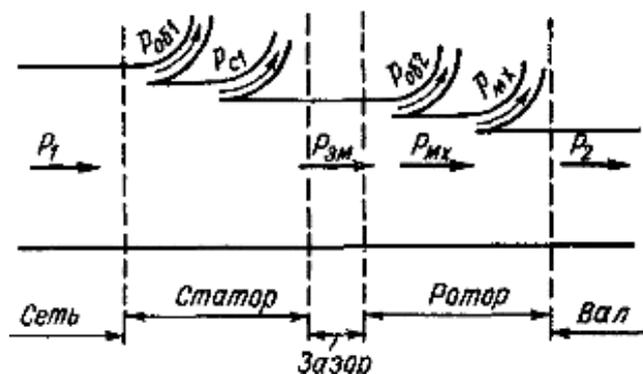


Рисунок 1.1 - Энергетическая диаграмма двигателя

Потери мощности в статоре складываются из потерь мощности в его обмотке  $P_{об1} = m_1 \times r_1 \times I_1^2$  и потерь в стали  $P_{ст}$ . Мощность  $P_{ст}$  является потерями на вихревые токи и на перемагничивание сердечника статора.

Потери в стали имеются и в сердечнике ротора асинхронного двигателя, но они невелики и могут не приниматься во внимание. Это объясняется тем, что скорость вращения магнитного потока относительно статора  $n_0$  во много раз больше скорости вращения магнитного потока относительно ротора  $n_0 - n$ , если скорость вращения ротора асинхронного двигателя  $n$  соответствует устойчивой части естественной механической характеристики.

**Механическая мощность асинхронного двигателя  $P_{мх}$** , развиваемая на валу ротора, меньше электромагнитной мощности  $P_{эм}$  на значение мощности  $P_{об2}$  потерь в обмотке ротора:

$$P_{мх} = P_{эм} - P_{об2}$$

Мощность на валу двигателя:

$$P_2 = P_{мх} - P_{мх}$$

где  $P_{mx}$  - мощность механических потерь, равная сумме потерь на трение в подшипниках, на трение вращающихся частей о воздух (вентиляционные потери) и на трение щеток о кольца (для двигателей с фазным ротором).

Электромагнитная и механическая мощности равны:

$$P_{эм} = \omega_0 M, P_{mx} = \omega M,$$

где  $\omega_0$  и  $\omega$  - синхронная скорость и скорость вращения ротора двигателя;  $M$  - момент, развиваемый двигателем, т. е. момент, с которым вращающееся магнитное поле действует на ротор.

Из этих выражений следует, что мощность потерь в обмотке ротора:

$$P_{об2} - P_{эм} - P_{mx} = P_{эм} (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = P_{эм} (n_0 - n) / n_0$$

или  $P_{об2} = s P_{эм}$

В случаях, когда известно активное сопротивление  $r_2$  фазы обмотки ротора, потери в этой обмотке могут быть найдены также из выражения

$$P_{об2} = m_2 r_2 I_2^2.$$

В асинхронных электродвигателях имеются также добавочные потери, обусловленные зубчатостью ротора и статора, вихревыми токами в различных конструктивных узлах двигателя и другими причинами. При полной нагрузке двигателя потери  $P_\delta$  принимаются равными 0,5% его номинальной мощности.

Коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя:

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - (P_{об} - P_c - P_{mx} - P_\delta)) / P_1,$$

где  $P_{об} = P_{об1} + P_{об2}$  - суммарная мощность потерь в обмотках статора и ротора асинхронного двигателя.

Поскольку общие потери зависят от нагрузки, то и КПД асинхронного двигателя является функцией нагрузки.

На рисунке 1.2 дана кривая  $\eta = f(P/P_{ном})$ , где  $P/P_{ном}$  - коэффициент загрузки.

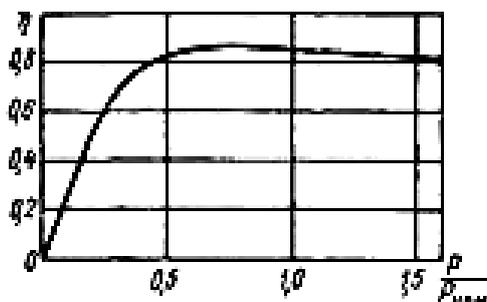


Рисунок 1.2 - Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Асинхронный электродвигатель проектируется так, чтобы максимум его коэффициента полезного действия  $\eta_{max}$  имел место при нагрузке, несколько

меньшей номинальной. Это определяется соотношением постоянных (независящих от нагрузки) и переменных потерь. Для асинхронных электродвигателей общепромышленного исполнения это отношение приблизительно равно 2.

КПД двигателя достаточно высок и в широком диапазоне нагрузок. Для большинства современных асинхронных двигателей КПД имеет значение 80 - 90%, а для мощных двигателей 90-96%.

### Задание

Рассчитать затраты на электроэнергию и двигатель при работе электродвигателя по 6 часов в день в течении 3-х лет при цене 4 руб/кВт ч для двух вариантов:

1. Двигатель согласно задания работает с номинальной нагрузкой на валу.

2. Двигатель с большей на одну ступень мощностью работает с нагрузкой как в первом варианте.

Сравнить полученные значения.

Варианты задания приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Варианты задания

Вариант	Электродвигатель	Мощность, кВт	Мин <sup>-1</sup> .	Ток при 380В, А	КПД, %	Коэф. мощн.	I <sub>п</sub> /I <sub>н</sub>	Масса, кг	Цена двигателя, руб.
1	АИР 56 А2	0,18	3000	0,55	65	0,78	5	3,5	2700
2	АИР 56 В2	0,25	3000	0,73	66	0,79	5	3,8	2700
3	АИР 63 А2	0,37	3000	0,9	72	0,84	5	5,2	3000
4	АИР 63 В2	0,55	3000	1,3	75	0,81	5	6,1	3000
5	АИР 71 А2	0,75	3000	1,3	79	0,8	6	8,7	3900
6	АИР 71 В2	1,1	3000	2,6	79,5	0,8	6	9,5	4200
7	АИР 80 А2	1,5	3000	3,6	82	0,85	6,5	13,3	5000
8	АИР 80 В2	2,2	3000	5,0	83	0,87	6,4	15,0	5500
9	АИР 90 L2	3	3000	6,5	84,5	0,85	7,0	20,0	7000
10	АИР 100 S2	4	3000	8,4	87	0,88	7,5	30,0	9000
11	АИР 100 L2	5,5	3000	11,0	88	0,88	7,5	32,0	10500
12	АИР 112 M2	7,5	3000	14,7	87,5	0,88	7,5	48	13700
13	АИР 132 M2	11	3000	21,1	88	0,9	7,5	78	18600
14	АИР 160 S2	15	3000	30	88	0,86	7,5	116	26500
15	АИР 160 M2	18,5	3000	35	90	0,88	7,5	130	29300
16	АИР 180 S2	22	3000	41,5	90,5	0,89	7	150	40900
17	АИР 180 M2	30	3000	55,4	91,5	0,9	7,5	170	45000

Продолжение таблицы 1.1

Вариант	Электродвигатель	Мощность, кВт	Мин <sup>-1</sup> .	Ток при 380В, А	КПД, %	Коэф. мощн.	I <sub>п</sub> /I <sub>н</sub>	Масса, кг	Цена двигателя, руб.
	АИР 200 М2	37	3000	71	91	0,87	7	230	60600
18	АИР 56 А4	0,12	1500	0,5	57	0,66	5	3,6	2700
19	АИР 56 В4	0,18	1500	0,7	60	0,68	5	4,2	2700
20	АИР 63 А4	0,25	1500	0,9	65	0,67	5	5,1	2900
21	АИР 63 В4	0,37	1500	1,2	68	0,7	5	6	3100
22	АИР 71 А4	0,55	1500	1,7	71	0,71	5	8,1	3 900
23	АИР 71 В4	0,75	1500	1,9	72	0,75	5	9,4	4200
24	АИР 80 А4	1,1	1500	3,1	76,5	0,77	5,0	12,8	4800
25	АИР 80 В4	1,5	1500	3,9	78,5	0,80	5,3	14,7	5700
26	АИР 100 S4	3	1500	7,2	82	0,82	7,0	34,0	9000
27	АИР 100 L4	4	1500	9,3	85	0,84	7,0	29,2	10200
28	АИР 112 М4	5,5	1500	11,3	85,5	0,86	7	45	12500
29	АИР 132 S4	7,5	1500	15,1	87,5	0,86	7,5	70	16100
30	АИР 132 М4	11	1500	22,2	88,5	0,85	7,5	84	19000
31	АИР 160 S4	15	1500	29	89	0,87	7	120	28200
32	АИР 160 М4	18,5	1500	35	90	0,89	7	142	31500
33	АИР 180 S4	22	1500	42,5	90,5	0,87	7	160	41000.
	АИР 180 М4	30	1500	57	92	0,87	7	190	47300

### Пример решения задачи

Рассмотрим решение задачи для двигателя АИР63А4 с параметрами Мощность  $P_n = 0,25$  кВт, КПД  $\eta_n = 62,0\%$ .

При номинальной нагрузке из сети двигатель потребляет мощность

$$P_i = P_n / \eta_n = 0,25 / 0,62 = 0,403 \text{ кВт.}$$

Потребляемая энергия при работе по 6 часов в день в течении 3-х лет

$$W = P_i t_{\text{раб}} = 0,403 \cdot 3 \cdot 365 \cdot 6 = 2647 \text{ кВт ч,}$$

где  $t_{\text{раб}}$  - суммарное время работы.

Стоимость потребленной электроэнергии

$$Ц = W \cdot \psi = 2647 \cdot 4 = 10591 \text{ руб.,}$$

где  $\psi$  - цена за 1 кВт ч.

Для второго варианта двигатель большей на одну ступень мощности АИР63В4 с параметрами Мощность  $P_{n2} = 0,37$  кВт, КПД  $\eta_n = 68,0\%$  работает с нагрузкой  $P = 0,25$  кВт.

Исходя из того, что отношение постоянных потерь  $\Delta P_C$  к переменным  $\Delta P_v$  для асинхронных двигателей закрытого исполнения

$$\alpha = \Delta P_C / \Delta P_v = 0,5.$$

Рассчитаем их. Номинальные потери

$$\Delta P_n = P_{H2} (1 - \eta_n) = 0,37 (1 - 0,68) = 0,1184 \text{ кВт ч.}$$

Постоянные и переменные потери

$$\Delta P_C = \Delta P_{H2} / 3 = 0,1184 / 3 = 0,039 \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_v = 2 \Delta P_{H2} / 3 = 0,1184 \cdot 2 / 3 = 0,079 \text{ кВт.}$$

Потребляемая мощность

$$P_{nom} = P + \Delta P_C + \Delta P_v (P / P_{H2})^2,$$

$$P_{nom} = 0,25 + 0,039 + 0,079 (0,25 / 0,37)^2 = 0,325 \text{ кВт,}$$

где отношение  $P / P_{H2}$  - коэффициент загрузки двигателя.

Рассчитаем стоимость потребленной электроэнергии

$$W = P_{nom} t_{раб} = 0,325 \cdot 3 \cdot 365 \cdot 6 = 2136 \text{ кВт ч,}$$

$$Ц = W \cdot c, = 2136 \cdot 4 = 8543 \text{ руб.,}$$

Учтем цену самого двигателя.

Общие затраты в первом варианте

$$Ц_1 = Ц + Ц_{де} = 10591 + 2900 = 13491 \text{ руб.}$$

Во втором варианте

$$Ц_1 = 8543 + 3100 = 11643 \text{ руб.}$$

Т.о. несмотря на то, что во втором варианте используется двигатель большей мощности и он работает недогруженным, из-за большего КПД и работы в точке с более оптимальным КПД оказывается более эффективным.

## 2. Расчет параметров управляемого выпрямителя в цепи питания электродвигателя

### Краткие теоретические сведения

Основой управляемого выпрямителя являются тиристоры, трансформатор и система управления тиристорами. Схемы управляемых выпрямителей повторяют схемы обычных выпрямителей, но с помощью тиристоров при этом решаются задачи плавного регулирования среднего значения выпрямленного напряжения в результате изменения угла управления (регулирования)  $\alpha$ , задающего момент включения тиристоров относительно точки естественной коммутации.

Управляемые выпрямители выполняют также функцию бесконтактного коммутационного аппарата, обеспечивающего отключение цепи нагрузки от сети в случае аварийного нарастания тока снятием импульсов управления с тиристоров.

Если в выпрямителе применяются только управляемые тиристоры, такой выпрямитель называется *полностью управляемым* или *симметричным*. Тиристорно-диодные выпрямители выполняются по управляемым несимметричным схемам.

Управляемые выпрямители подразделяются на:

- — однофазные однополупериодные;
- — однофазные мостовые: с полным числом тиристоров и с неполным числом, т.е. 2 тиристора, 2 диода;
- — трехфазные с выводом от средней точки трансформатора и мостовые.

Рассмотрим работу простейшей схемы однополупериодного управляемого выпрямителя (рисунок 2.1а) работающего на активную нагрузку.

Положительная полуволна по отношению к тиристорам VS имеет прямую полярность, но в отличие от обычного диода тиристор может включиться только при подаче на его управляющий электрод сигнала управления от управляющего устройства – блока управления (БУ). До поступления сигнала тиристор будет находиться в закрытом состоянии и тока пропускать не будет, несмотря на то, что к его аноду приложен положительный потенциал относительно катода.

Управляющий ток в положительный полупериод  $e(t)$  включает тиристор; в отрицательный полупериод включение тиристора не происходит.

Среднее и действующее значение выпрямленного тока (напряжения) могут регулироваться в широких пределах за счет изменения фазы подачи управляющего тока (угла регулирования  $\alpha$ ).

Представленная схема имеет в своем составе схему управления, которая в значительной степени усложняет ее, так как требуется достаточно точная синхронизация по частоте управляющего тока с частотой выпрямляемого напряжения.

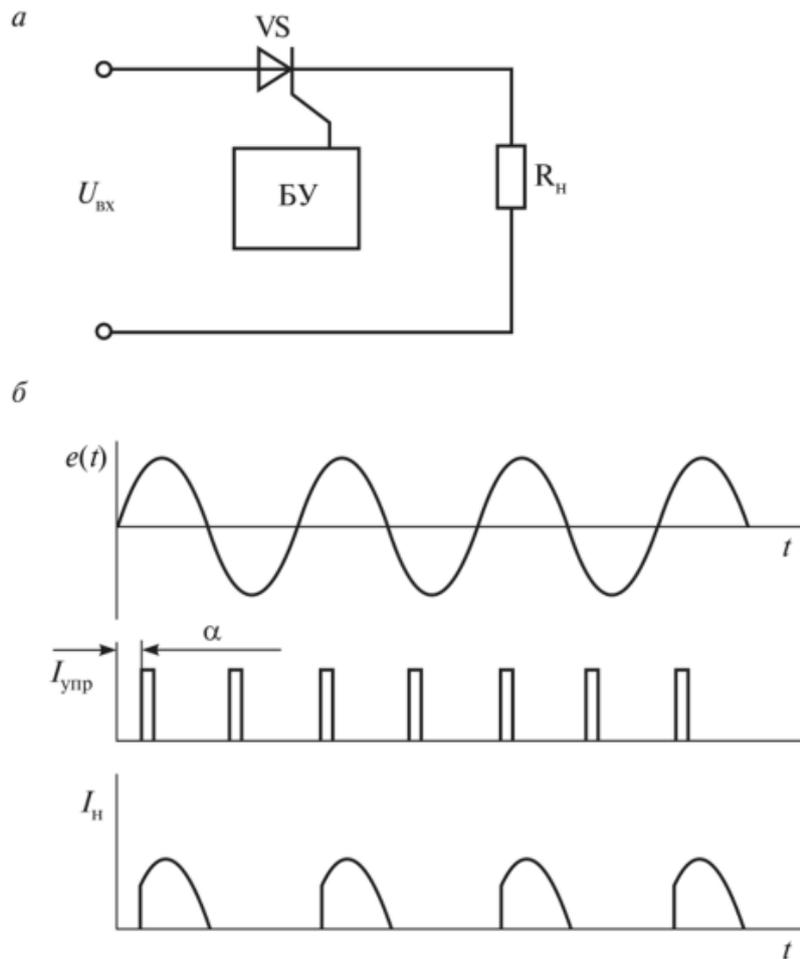


Рисунок 2.1 - Схема однополупериодного управляемого выпрямителя (а) и его временные диаграммы (б)

Временные диаграммы представлены на рисунке 2.1б.

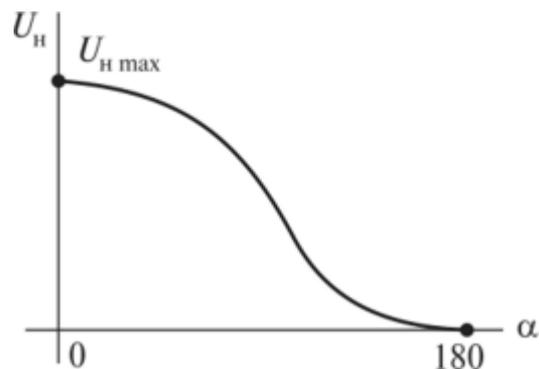


Рисунок 2.2 - Регулировочная характеристика однополупериодного управляемого выпрямителя

Регулирование среднего напряжения на выходе выпрямителя для однополупериодного выпрямителя определяется формулой

$$U_{\text{нсп}} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{вх}}}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

Напряжение можно регулировать в пределах  $0 \pm U$  при изменении угла регулирования  $\alpha = 180^\circ - 0^\circ$ .

Регулировочная характеристика однополупериодного управляемого выпрямителя показана на рисунке 2.2.

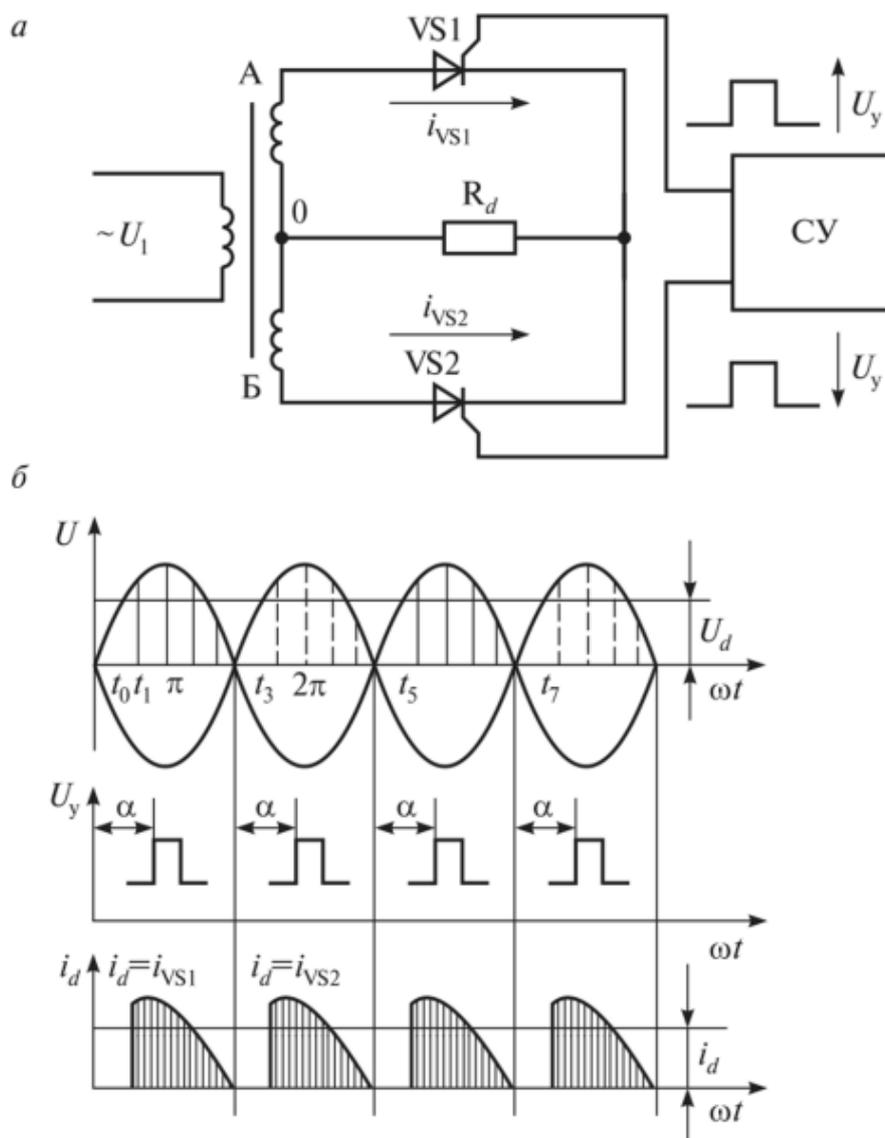


Рисунок 2.3 - Управляемый двухполупериодный выпрямитель с нулевой точкой (а) и его временные диаграммы (б)

На рисунке 2.3. представлены схема и временные диаграммы управляемого двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой.

При подаче напряжения на первичную обмотку трансформатора во вторичной обмотке будет возникать синусоидальное напряжение, которое в первый полупериод прикладывается к тиристорам VS1, а во второй – к тиристорам VS2, но так как тиристоры выключены, ток в нагрузке будет равен нулю.

Если на анод тиристора VS1 подать положительный потенциал первого полупериода, а на управляющий электрод – отпирающий импульс, то тиристор VS1 открывается и через него на нагрузку потечет ток  $I_{VS1}$ . При этом тиристор VS2 закрыт, так как к нему приложено обратное напряжение. При из-

менении направления тока на противоположное тиристор VS1 закрывается обратным напряжением, а тиристор VS2 при подаче на его управляющий электрод импульса открывается. Тогда через тиристор VS2 и нагрузку потечет ток  $I_{VS2}$ .

Для изменения выпрямленного напряжения необходимо изменять угол регулирования  $\alpha$ , т.е. сдвигать по фазе управляющие импульсы  $U$  относительно напряжения на анодах тиристоров. Угол регулирования  $\alpha$  необходимо изменять от  $180^\circ$  до нуля. При максимальном угле открытия на выходе будет минимальное значение выпрямленного напряжения, и наоборот, при минимальном угле регулирования на выходе управляемого выпрямителя будет максимальное значение напряжения.

Процесс перехода тока от одной ветви схемы к другой, в результате чего меняется контур электрического тока, называется коммутацией.

Переключение тиристоров в каждой схеме происходит в строго определенной последовательности. Наличие анодной индуктивности задерживает выключение соответствующего тиристора и обуславливает появление интервала коммутации, который называется *углом коммутации* и обозначается  $\gamma$ .

На интервале коммутации одновременно проводят ток тиристоры, аноды или катоды которых объединены в общую точку, а другие выводы связаны с разными фазами трансформатора. Коммутация сопровождается внутренним междуфазным коротким замыканием. Возникающий ток короткого замыкания  $I_{кз}$  вычитается из тока тиристора, выходящего из работы, и прибавляется к току тиристора, вступающего в работу. Процесс коммутации влияет на форму кривых выпрямленного напряжения и токов в диодах и обмотках трансформатора, а также сказывается на среднем значении и гармоническом составе выпрямленного напряжения.

На рисунке 2.4 представлены схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя и временные диаграммы. Все происходящие процессы симметричны и характеристики выпрямителя благоприятны в широком диапазоне регулирования.

От схемы управления СУ подаются сдвоенные (с интервалом  $T/3-60^\circ$ ) импульсы или пакеты импульсов длительностью более  $n/3$ . Такой алгоритм следования импульсов необходим для одновременного отпирания одного тиристора в катодной и одного тиристора в анодной группах, чтобы образовалась непрерывная цепь нагрузки при включении выпрямителя и в режиме прерывистого тока при глубоком регулировании. Среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{da}$  определяется линией на диаграмме  $u_d = f(\omega t)$ .

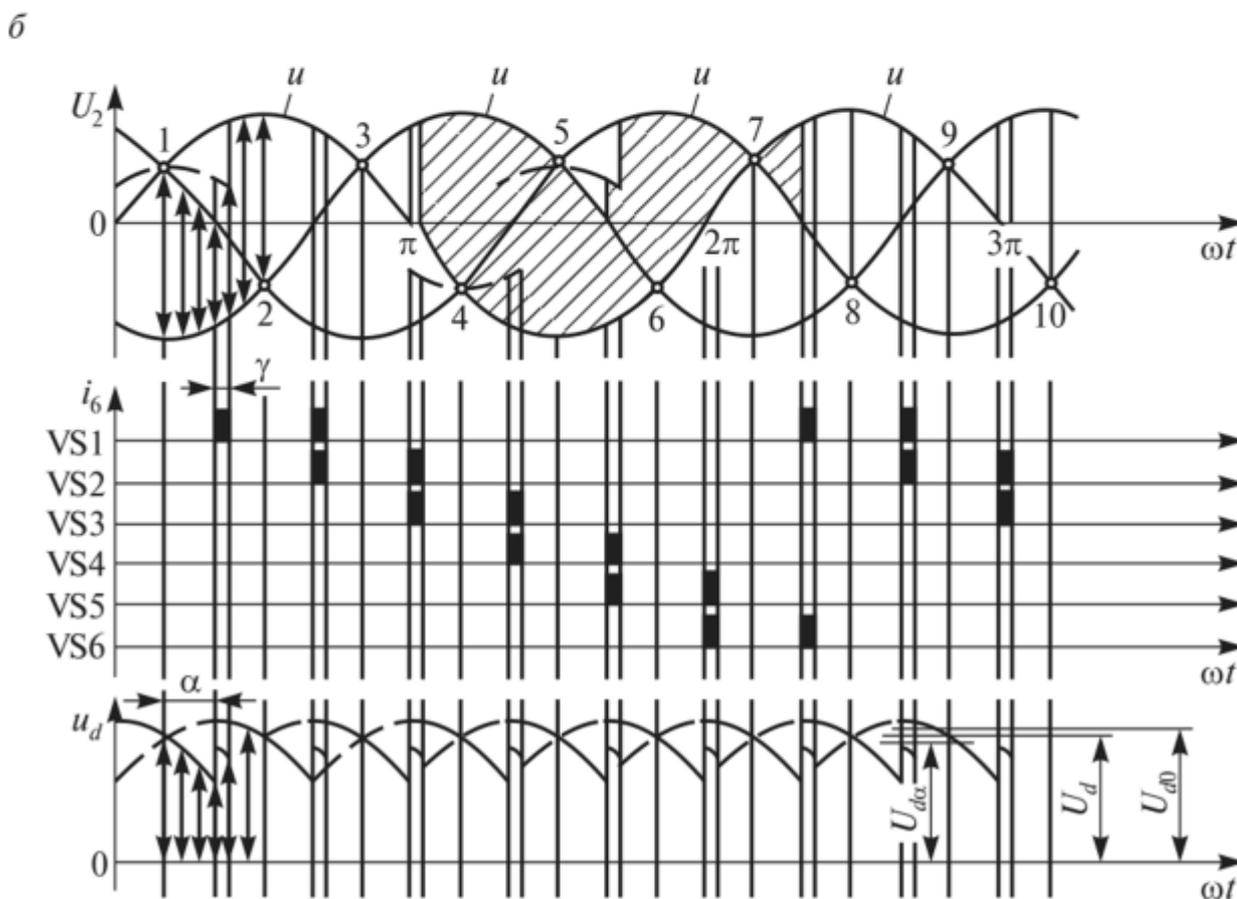
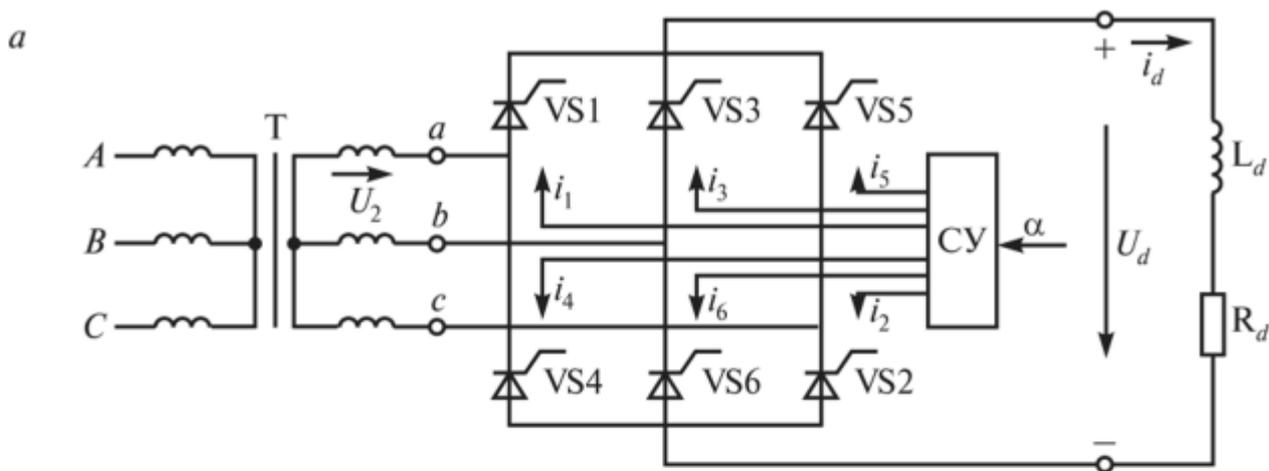


Рисунок 2.4 - Мостовой шестиимпульсный управляемый выпрямитель (а) и его временные диаграммы (б)

На рисунке 2.4б приведены кривые выпрямленного напряжения при работе мостового шестиимпульсного выпрямителя при углах управления, соответствующих I ( $\alpha < \pi/3$ ), II ( $\pi/3 < \alpha < 2\pi/3$ ) и граничному ( $\alpha_2 = \pi/3$ ) режимам.

Предельным углом управления, при котором  $U_d = 0$  в случае активной нагрузки является  $\alpha_{max} = 2\pi/3 = 120^\circ$ . Максимальное значение угла  $\alpha$  в режиме идеально сглаженного тока  $\alpha_{max} = \pi/2 = 90^\circ$ .

Регулирование выпрямленного напряжения во всех других схемах выпрямления осуществляется поэтому же принципу, если вместо обычных силовых диодов у них используются управляемые вентили – тиристоры.

## Задание

1. Разработать силовую часть схемы управления двигателем постоянного тока при помощи управляемого выпрямителя. Для схемы использовать трёхфазную мостовую схему выпрямления, от которой питать якорную цепь двигателя постоянного тока.

2. Рассчитать угол управления для обеспечения номинального питающего напряжения якоря.

3. Для электродвигателя согласно варианта задания рассчитать ток, потребляемый из сети в номинальном режиме.

4. Найти необходимый начальный угол управления для реализации форсированного пуска двигателя.

Варианты задания приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Варианты задания

Вариант	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
1	4П080А2УХЛ4	0,25	110	3,5	1000
2			220	1,8	1000
3		0,37	110	5	1500
4			220	2,5	1500
5		0,55	110	7	2200
6			220	3,5	2200
7		0,75	110	9,4	3000
8			220	4,7	3000
9	4П080В1УХЛ4	0,37	110	4,8	1000
10			220	2,4	1000
11		0,55	110	7,4	1500
12			220	3,7	1500
13		0,75	110	9,4	2200
14			220	4,7	2200
15		1,1	110	13	3000
16			220	6,5	3000
17	4ПБ80А2УХЛ4	0,18	110	2,8	1000
18			220	1,4	1000
19		0,25	110	3,4	1500
20			220	1,7	1500
21		0,37	110	4,6	2200

Продолжение таблицы 2.1

Вариант	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	
22		0,55	220	2,3	2200	
23			110	7	3000	
24			220	3,5	3000	
25	4ПБ80В1УХЛ4	0,25	110	3,4	1000	
26			220	1,7	1000	
27		0,37	110	4,8	1500	
28			220	2,4	1500	
29		0,55	110	6,8	2200	
30			220	3,4	2200	
31		0,8	110	9,2	3000	
32		4ПО100S1УХЛ4	0,37	110	5	750
33				220	2,3	750
34	0,55		110	7,3	1000	
35			220	3,5	1000	
36	0,75		110	9,2	1500	
37			220	4,5	1500	
38	1,1		110	12,8	2200	
39			220	6,4	2200	
40	1,6		110	19	3000	
41			220	9,5	3000	

### Пример решения задачи

Рассмотрим решение задачи для электродвигателя 4ПО80А2 с параметрами: номинальная мощность  $P_n = 0,75 \text{ кВт}$ , номинальный ток якоря  $I_n = 4,9 \text{ А}$ , номинальная частота вращения  $n_n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ .

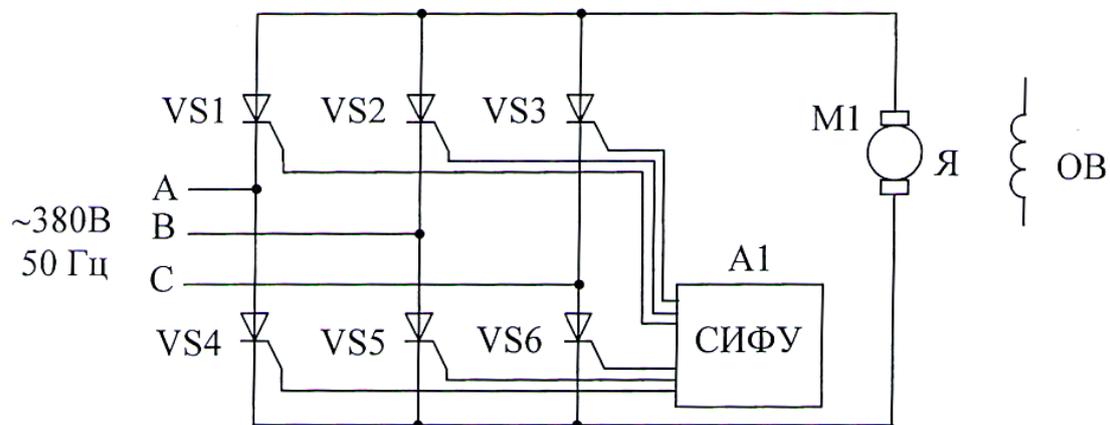


Рисунок 2.5 - Упрощенная силовая часть схемы управления двигателем

1. Упрощенная силовая часть схемы управления двигателем изображена на рисунке 1.

На схеме блок А1 - система импульсно-фазового управления.

Трехфазная мостовая схема выпрямляет линейное напряжение, поэтому при нулевом угле управления выходное напряжение будет  $U_{d0} = 380 \text{ В}$ , а необходимо получить на выходе  $U_d = 220 \text{ В}$ .

Для управляемого выпрямителя

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  - угол управления.

Тогда угол управления для обеспечения номинального питающего напряжения якоря

$$\alpha = \arccos(U_d / U_{d0}),$$

$$\alpha = \arccos(220 / 380) = 54,7^\circ.$$

2. При номинальном питающем напряжении в цепи якоря протекает номинальный ток  $I_n = 4,9 \text{ А}$ . В фазе переменного тока для трехфазного мостового выпрямителя справедливы соотношения

$$U_d = U_{1m} / 0,44,$$

$$I_d = I_1 / 0,76,$$

где  $U_d$  - выпрямленное напряжение,

$U_{1m}$  - амплитуда напряжения в фазе переменного тока,

$I_d$  - выпрямленный ток,

$I_1$  - ток в фазе переменного тока.

Тогда ток, потребляемый из сети в номинальном режиме

$$I_1 = 0,76 I_d = 0,76 \cdot 4,9 = 3,72 \text{ А}.$$

3. Для нахождения пускового тока вначале найдем КПД двигателя и сопротивление якоря

КПД двигателя

$$\eta_n = P_n / (U_n I_n), \quad \eta_n = 750 / (220 \cdot 4,9) = 0,696,$$

Приблизительно сопротивление якоря можно найти по формуле

$$R_{\text{я}} = U_n (1 - \eta_n) / (2 I_n),$$

$$R_{\text{я}} = 220 (1 - 0,696) / (2 \cdot 4,9) = 8 \text{ Ом}.$$

Пусковой ток при номинальном напряжении питания согласно закона Ома

$$I_n = U_H / R_{\Sigma} = 220 / 8 = 27,5 \text{ A.}$$

При форсированном пуске допускается превышение пускового тока в 2,5 раза от номинального, т.е. до значения

$$I_n = 2,5 I_n = 2,5 \cdot 4,9 = 12,25 \text{ A.}$$

Ввиду линейной зависимости между током и напряжением в начальный момент пуска, можно считать - во сколько раз необходимо снизить ток, во столько раз надо и снизить напряжение (пропорция). Т.е.

$$2,5 I_n / I_n = U / U_n,$$

где  $U$  - искомое напряжение для обеспечения форсированного пуска. Найдем его

$$U = U_n (2,5 I_n / I_n),$$

$$U = 220 (2,5 \cdot 4,9 / 27,5) = 98 \text{ B.}$$

Это напряжение достигается при угле управления

$$\alpha = \arccos (98 / 380) = 87^\circ.$$

Таким образом, двигатель необходимо включать в сеть при установленном угле управления  $87^\circ$ , затем снижать его до  $54^\circ$  по мере разгона для обеспечения номинального напряжения.

### **3. Расчет вентильно-емкостного преобразователя**

#### **Краткие теоретические сведения**

Большинство источников электрической энергии, используемых в современной технике и входящих, в частности, в силовой канал электропривода, обладают свойствами источников напряжения, т.е. имеют близкую к горизонтальной внешнюю характеристику (рисунки 3.1).

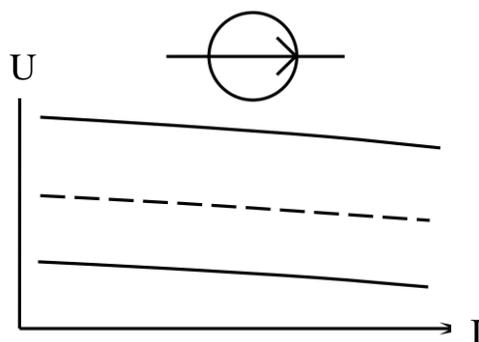


Рисунок 3.1 - Внешние характеристики источников напряжения

К таким источникам относятся промышленная или бытовая электрическая сеть, электрические машины в естественном режиме, аккумуляторные батареи, большинство преобразователей напряжения, частоты в естественном режиме и т.п. Они могут давать переменное или постоянное напряжение, быть управляемыми или неуправляемыми, близкими к идеальным или совсем неидеальными, однако общее их свойство – малое отклонение напряжения от установленного при широком изменении тока нагрузки. Вместе с тем в силовом канале электропривода могут использоваться и элементы со свойствами источников тока. Иногда это свойство формируется искусственно за счёт соответствующего управления напряжением источников напряжения – именно так построены контуры тока в управляемых электроприводах по системе преобразователь-двигатель, а иногда обеспечивается параметрически. В этом случае преобразователи принято называть параметрическими источниками тока (рисунок 3.2).

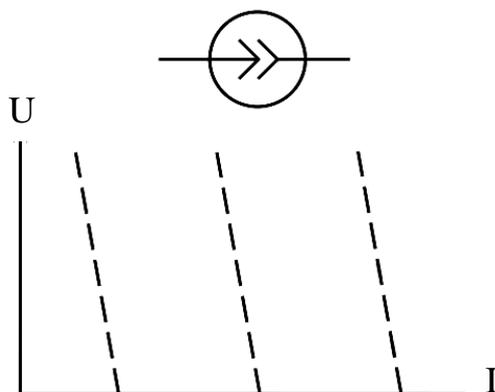


Рисунок 3.2 - Внешние характеристики источников тока

Простейшим, но далеко не лучшим и часто практически непригодным по энергетическим показателям параметрическим источником тока может быть любой источник ЭДС с последовательно включённым резистором, обладающим большим сопротивлением. Существенно лучшими энергетическими показателями обладают параметрические источники тока, основанные на резонансе напряжений в цепи  $LC$  индуктивно – ёмкостные преобразователи.

Простейший пример такого источника тока, иллюстрирующий принцип действия, показан на рисунке 3.3.

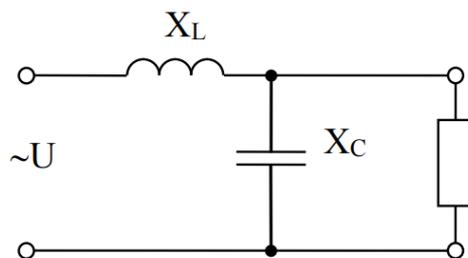


Рисунок 3.3 - Простейший индуктивно – емкостный преобразователь

Ток в цепи определяется напряжением источника  $U$  и значением сопротивлений  $X_L$  и  $R$ . При величине сопротивления  $R = 0$  ток в резисторе определяется напряжением источника  $U$  и сопротивлением  $X_L$ . При увеличении сопротивления этот ток меняется незначительно за счёт роста напряжения на конденсаторе. Схема параметрического источника тока, приведенная на рисунке 3.3 не самая совершенная. Имеются и другие схемные реализации индуктивно-емкостных преобразователей.

В случае, когда используется трёхфазная промышленная сеть, применяется индуктивно – емкостной преобразователь, состоящий из трёх одинаковых реакторов с индуктивным сопротивлением  $X_L$  и трёх одинаковых батарей конденсаторов с емкостным сопротивлением  $X_C$ , включаемый между сетью и нагрузкой, как показано на рисунке 3.4.

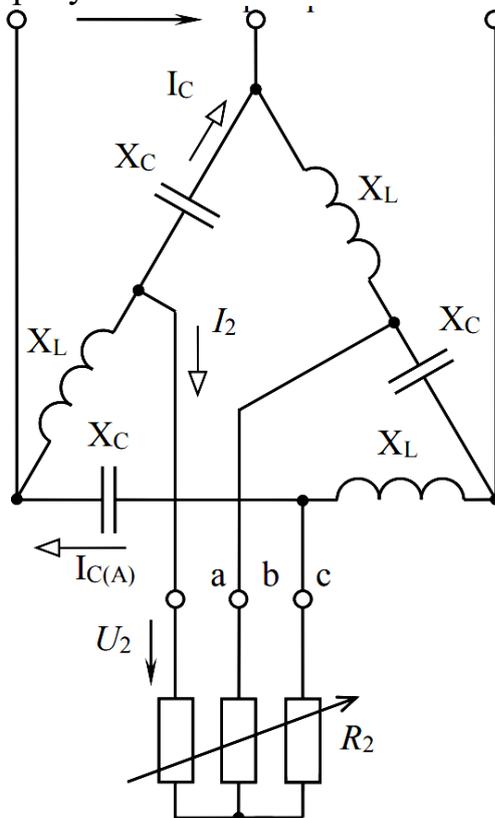


Рисунок 3.4 - Трёхфазный индуктивно-емкостный преобразователь

При такой схеме подключения нагрузки ток в цепи не зависит от сопротивления нагрузки, т.е. схема по отношению к нагрузке обладает свойствами источника тока. Индуктивно – емкостной преобразователь обладает свойствами идеального источника тока в широком диапазоне напряжений (при правильно выбранных реакторах и конденсаторах), отличается простотой, высокой надёжностью, не нуждается в трансформаторе.

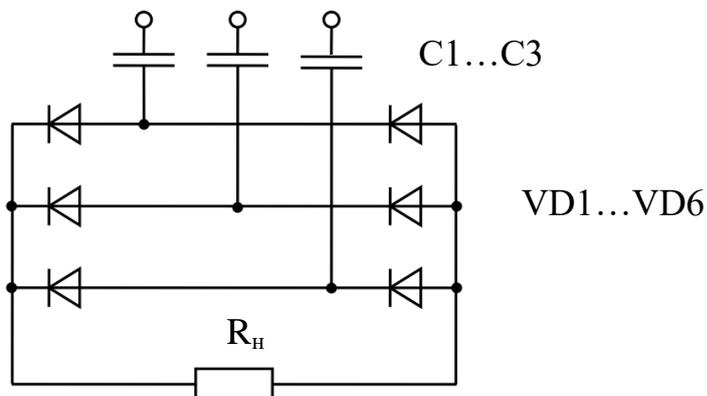


Рисунок 3.5 - Вентильно-емкостный преобразователь

Данный источник тока наряду с перечисленными достоинствами имеет и ряд недостатков. Главный из них – наличие в схеме трёх реакторов – тяжёлых металлоемких устройств, которые к тому же должны иметь одинаковые и стабильные реактивные сопротивления ( $X_L = X_C$ ). Стремление избавиться от этого недостатка привело к разработке другого параметрического источника тока – вентильно–емкостного преобразователя, схема которого показана на рисунке 3.5.

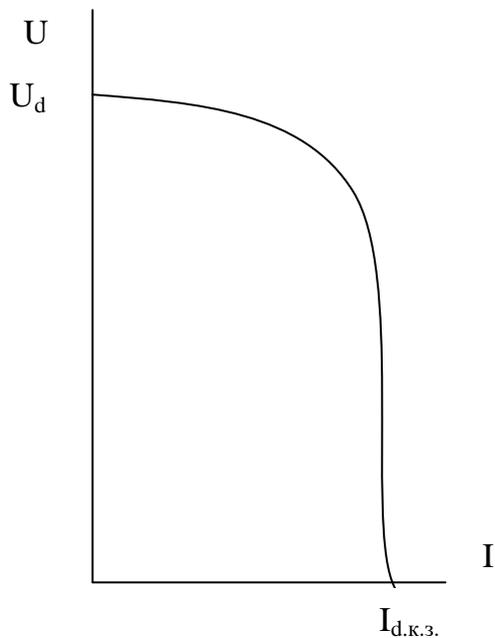


Рисунок 3.6 - Внешняя характеристика вентильно-емкостного преобразователя

Это устройство является предельно простым по составу входящих в него

элементов, но не столь элементарным по физическим процессам. Конденсаторы существенно влияют на процессы коммутации в вентилях выпрямительного моста, вследствие чего схема обладает ярко выраженным свойством неидеального источника тока. Внешняя характеристика преобразователя показана на рисунке 3.6. В диапазоне напряжений от 10 до 90% от  $U_d$  он является близким к идеальному источником тока.

Отметим высокие энергетические свойства вентиляльно – емкостных преобразователей: КПД близок к единице, по отношению к питающей сети преобразователь является компенсатором реактивной мощности, его влияние на питающую сеть невелико.

### Задание

1. Составить силовую часть схемы управления двигателем постоянного тока с использованием вентиляльно-емкостного преобразователя.

2. Найти необходимую емкость конденсаторов для обеспечения номинального тока.

3. Найти потребляемый из сети ток и коэффициент мощности при номинальном напряжении питания двигателя.

Варианты задания приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Варианты задания

Вариант	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
1	4П080А2УХЛ4	0,25	110	3,5	1000
2			220	1,8	1000
3		0,37	110	5	1500
4			220	2,5	1500
5		0,55	110	7	2200
6			220	3,5	2200
7		0,75	110	9,4	3000
8			220	4,7	3000
9	4П080В1УХЛ4	0,37	110	4,8	1000
10			220	2,4	1000
11		0,55	110	7,4	1500
12			220	3,7	1500
13		0,75	110	9,4	2200
14			220	4,7	2200
15		1,1	110	13	3000
16			220	6,5	3000

Продолжение таблицы 3.1

Вариант	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
17	4ПБ80А2УХЛ4	0,18	110	2,8	1000
18			220	1,4	1000
19		0,25	110	3,4	1500
20			220	1,7	1500
21		0,37	110	4,6	2200
22			220	2,3	2200
23		0,55	110	7	3000
24			220	3,5	3000
25	4ПБ80В1УХЛ4	0,25	110	3,4	1000
26			220	1,7	1000
27		0,37	110	4,8	1500
28			220	2,4	1500
29		0,55	110	6,8	2200
30			220	3,4	2200
31		0,8	110	9,2	3000
32		4ПО100S1УХЛ4	0,37	110	5
33	220			2,3	750
34	0,55		110	7,3	1000
35			220	3,5	1000
36	0,75		110	9,2	1500
37			220	4,5	1500
38	1,1		110	12,8	2200
39			220	6,4	2200
40	1,6		110	19	3000
41			220	9,5	3000

### Пример решения задачи

- 1) Силовая часть схемы управления показана на рисунке 3.7.
- 2) Выходной ток короткого замыкания вентильно-емкостного преобразователя может быть рассчитан по формуле

$$I_{dkз} = 8,46 \cdot E_1 \cdot f \cdot C.$$

где  $E_1$  – входное напряжение,  
 $f$  - частота сети,  
 $C$  - емкость конденсаторов.

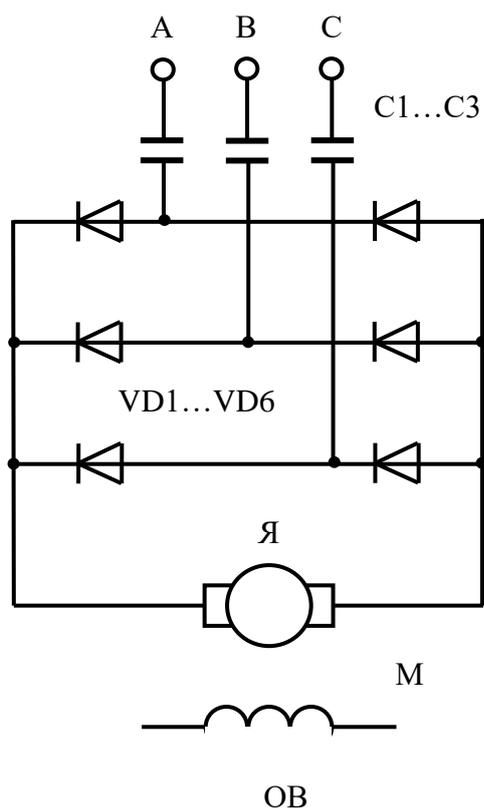


Рисунок 3.7 - Силовая часть схемы управления двигателем

Тогда емкость конденсаторов может быть найдена по формуле, учитывая, что  $I_{dkз}$  равен номинальному току якоря

$$C = I_{dkз} / 8,46 \cdot E_1 f.$$

3) Потребляемый из сети ток можно в первом приближении считать синусоидальным тогда его значение

$$I_{dkз} = 1,342 I_1$$

А коэффициент мощности

$$\cos \varphi = U_d / E_1$$

В номинальном режиме  $U_d$  равен номинальному напряжению двигателя

$$\cos \varphi = 220 / 380 = 0,58$$

## 4. Замкнутые системы управления электроприводом

### Краткие теоретические сведения

Характеристики разомкнутых систем электропривода (ЭП), построенных по схеме «преобразователь – двигатель», имеют относительно невысокую жесткость из-за влияния внутреннего сопротивления преобразователя. Для получения больших диапазонов и высокой точности регулирования скорости требуется иметь более жесткие характеристики, которые можно получить лишь в замкнутой системе с использованием обратных связей. Кроме того, характеристики разомкнутой системы не обеспечивают точного регулирования (ограничения) тока и момента, что также требует применения замкнутой структуры ЭП.

*Замкнутая система «преобразователь – двигатель» с отрицательной обратной связью по скорости двигателя.*

Основу системы составляет разомкнутая схема «преобразователь – двигатель». Для создания замкнутой системы на вал двигателя устанавливается датчик скорости – тахогенератор ТГ (рисунок 4.1), выходное напряжение которого  $U_{oc} = \gamma \omega$ , пропорциональное скорости двигателя, является сигналом обратной связи. Коэффициент пропорциональности носит название коэффициента обратной связи по скорости и может регулироваться за счет изменения тока возбуждения ТГ  $I_{в.тг}$ .

Сигнал обратной связи  $U_{oc}$  сравнивается с задающим сигналом скорости  $U_{зад.с}$  и их разность в виде сигнала рассогласования (ошибки)  $U_{ex} = U_{зад.с} - U_{oc}$  через усилитель  $Y$  поступает на вход пропорционального регулятора (Прегулятора) скорости. Регулятор скорости с коэффициентом  $k_{pc}$  усиливает сигнал рассогласования  $U_{вх}$  и подает его в виде сигнала управления  $U$  на якорь электродвигателя.

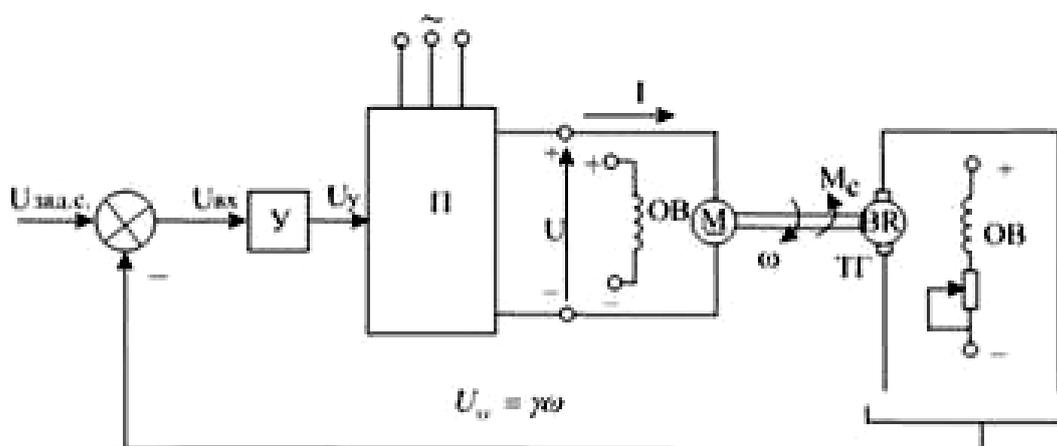


Рисунок 4.1 - Замкнутая система П–Д с отрицательной обратной связью по скорости

Уравнения характеристик ДПТ независимого возбуждения в разомкнутой системе:

$$\omega = \frac{K_n U_y}{K\Phi} - \frac{I(R_a + R_n)}{K\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega;$$

$$\omega = \frac{K_n U_y}{K\Phi} - \frac{M(R_a + R_n)}{(K\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega.$$

Подставив  $U_{ex} = U_{зад.c} - \omega$ ,  $U_y = K_y U_{ex}$  получим уравнения характеристик в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{K_y K_n U_{зад.c}}{C(1+K_c)} - \frac{I(R_a + R_n)}{C(1+K_c)},$$

$$\omega = \frac{K_y K_n U_{зад.c}}{C(1+K_c)} - \frac{M(R_a + R_n)}{C^2(1+K_c)},$$

где  $C = K\Phi$ ,  $K_c = (\gamma K_{pc} K_y)/C$  – коэффициент усиления системы.

На рисунке 4.2 представлены механические характеристики ДПТ в замкнутой системе (линии 2, 4, 5) при различных задающих сигналах  $U_{зад.c1} > U_{зад.c2} > U_{зад.c3}$ . Для сравнения представлена характеристика (линия 3) в разомкнутой системе. Изменение угловой скорости в разомкнутой и замкнутой системах определяется выражениями

$$\Delta\omega_{раз} = I_n (R_a + R_n) / C ,.$$

$$\Delta\omega_{замк} = I_n (R_a + R_n) / C (1 + K_c) = \Delta\omega_{раз} / (1 + K_c).$$

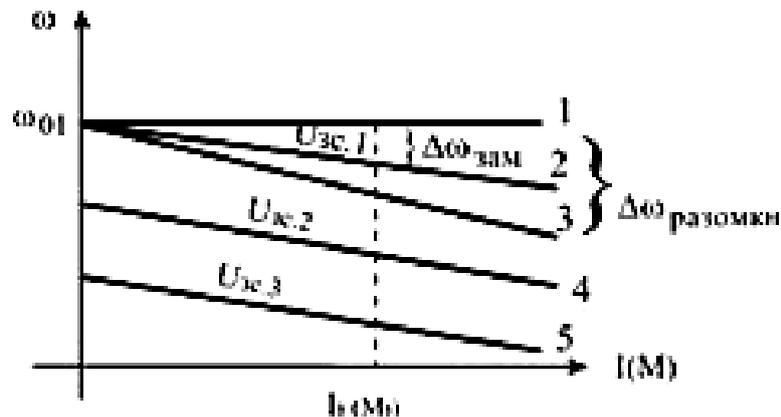


Рисунок 4.2 - Характеристики электропривода системы П-Д

Характеристика ДПТ при  $K_c \rightarrow \infty$ ,  $\Delta\omega \rightarrow 0$  – абсолютно жесткая (линия 1). Однако на практике не применяется из-за ухудшения динамики электропривода.

Следовательно,  $\Delta\omega_p > \Delta\omega_z$ , жесткость характеристики ДПТ в замкнутой системе больше жесткости характеристик в разомкнутой системе. Поясним работу обратной связи по скорости.

Если двигатель работает в установившемся режиме со скоростью  $\omega$  и

увеличится  $M_c$  нагрузки, то скорость уменьшится и уменьшится сигнал обратной связи  $U_{oc}$ . Это вызовет увеличение  $U_y$ , следовательно, увеличится  $U$ , и скорость.

Если момент нагрузки уменьшится, скорость увеличится и уменьшится  $U_{ex}$ ,  $U_y$ ,  $U$ , , после чего уменьшится скорость. Таким образом, осуществляется автоматическое поддержание скорости при изменении момента нагрузки.

### Задание

Для заданного согласно варианта электродвигателя постоянного тока (таблица 4.1) рассчитайте падение скорости под номинальной нагрузкой в разомкнутой системе управления при номинальной нагрузке и падение скорости под номинальной нагрузкой в замкнутой системе. Регулятор пропорциональный, обратная связь по скорости, коэффициент усиления регулятора  $K_{pc} = 10$ , коэффициент усиления усилителя  $K_y = 2$ , коэффициент преобразования скорости тахогенератором  $\gamma = 0,5$ , внутреннее сопротивление преобразователя  $R_n = 1 \text{ Ом}$ .

Таблица 4.1

Варианты задания

Вариант	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
1	4П080А2УХЛ4	0,25	110	3,5	1000
2			220	1,8	1000
3		0,37	110	5	1500
4			220	2,5	1500
5		0,55	110	7	2200
6			220	3,5	2200
7		0,75	110	9,4	3000
8			220	4,7	3000
9	4П080В1УХЛ4	0,37	110	4,8	1000
10			220	2,4	1000
11		0,55	110	7,4	1500
12			220	3,7	1500
13		0,75	110	9,4	2200
14			220	4,7	2200
15		1,1	110	13	3000
16			220	6,5	3000
17	4ПБ80А2УХЛ4	0,18	110	2,8	1000
18			220	1,4	1000
19		0,25	110	3,4	1500
20			220	1,7	1500
21		0,37	110	4,6	2200

Продолжение таблицы 4.1

Вариант	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	
22		0,55	220	2,3	2200	
23			110	7	3000	
24			220	3,5	3000	
25	4ПБ80В1УХЛ4	0,25	110	3,4	1000	
26			220	1,7	1000	
27		0,37	110	4,8	1500	
28			220	2,4	1500	
29		0,55	110	6,8	2200	
30			220	3,4	2200	
31		0,8	110	9,2	3000	
32		4ПО100S1УХЛ4	0,37	110	5	750
33				220	2,3	750
34			0,55	110	7,3	1000
35	220			3,5	1000	
36	0,75		110	9,2	1500	
37			220	4,5	1500	
38	1,1		110	12,8	2200	
39			220	6,4	2200	
40	1,6		110	19	3000	
41			220	9,5	3000	

### Пример решения задачи

Будем проводить расчеты для варианта 41.

Для расчета коэффициента  $C = K \Phi$  будем использовать формулу

$$C = K \Phi = (U_n - I_n R_{я}) / \omega_n,$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение двигателя,

$I_n$  – номинальный ток якоря,

$R_{я}$  – сопротивление якоря,

$\omega_n$  – номинальная скорость вращения.

Предварительно необходимо рассчитать сопротивление якоря и номинальную скорость вращения

КПД двигателя

$$\eta_n = P_n / (U_n I_n), \quad \eta_n = 1600 / (220 \cdot 9,5) = 0,766,$$

Приблизительно сопротивление якоря можно найти по формуле

$$R_{я} = U_H (1 - \eta_n) / (2 I_n),$$

$$R_{я} = 220 (1 - 0,766) / (2 \cdot 9,5) = 2,7 \text{ Ом}.$$

Номинальная скорость вращения

$$\omega_n = n_n / 9,55 = 3000 / 9,55 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Тогда

$$C = K \Phi = (U_n - I_n R_{я}) / \omega_n = (220 - 9,5 \cdot 2,7) / 314 = 0,619 \text{ В} \cdot \text{с}$$

Падение скорости в разомкнутой системе с номинальной нагрузкой

$$\Delta\omega_{раз} = I_n (R_{я} + R_n) / C = 9,5 (2,7 + 1) / 0,619 = 56,8 \text{ с}^{-1}.$$

Коэффициент передачи замкнутой системы

$$K_c = (\gamma K_{pc} K_y) / C = (0,5 \cdot 10 \cdot 2) / 0,619 = 16,16$$

Падение скорости в замкнутой системе с номинальной нагрузкой

$$\Delta\omega_{замк} = I_n (R_{я} + R_n) / C (1 + K_c) = \Delta\omega_{раз} / (1 + K_c) = 56,8 / (1 + 16,16) = 3,31 \text{ с}^{-1}.$$

## **5. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением питающего напряжения**

### **Краткие теоретические сведения**

Изменение напряжения, подводимого к обмотке статора асинхронного двигателя, позволяет регулировать скорость с помощью относительно простых технических средств и схем управления. Для этого между сетью переменного тока со стандартным напряжением  $U_{ном}$  и статором электродвигателя включается регулятор напряжения (рисунок 5.1).

При регулировании частоты вращения асинхронного двигателя изменением напряжения, подводимого к обмотке статора, критический момент  $M_{кр}$  асинхронного двигателя изменяется пропорционально квадрату подводимого к двигателю напряжения  $U$  (рисунок 5.2), а скольжение от  $U$  не зависит.

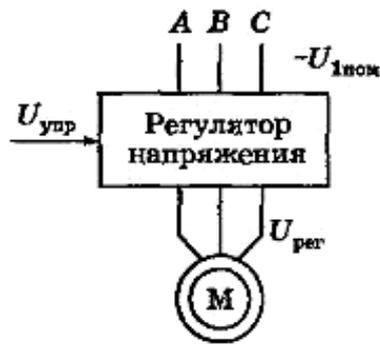


Рисунок 5.1 - Схема регулирования скорости асинхронного двигателя путем изменения напряжения на статоре

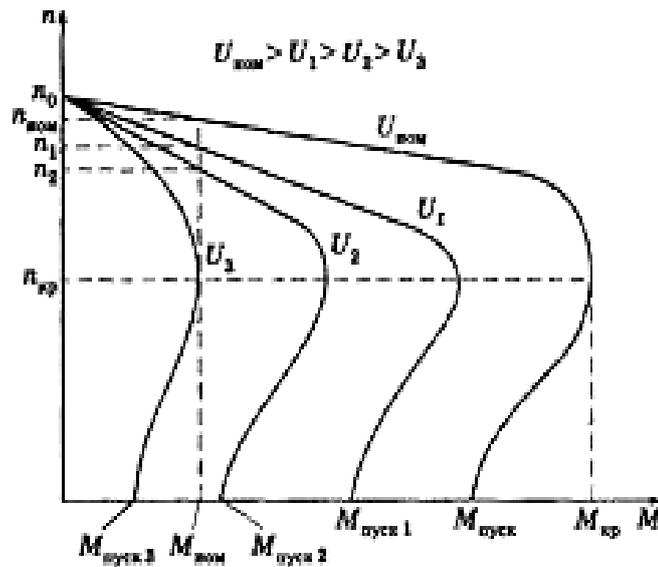


Рисунок 5.2 - Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения подводимого к обмоткам статора

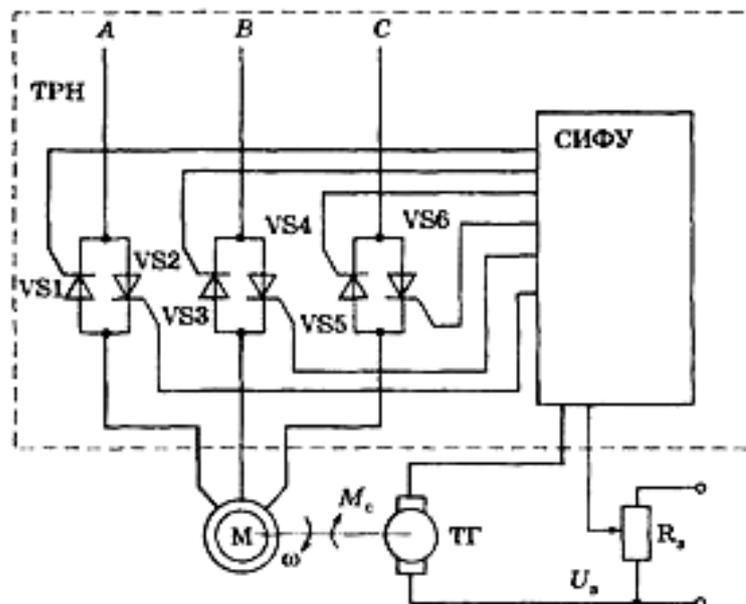


Рисунок 5.3 - Схема замкнутой системы регулирования скорости тиристорный регулятор напряжения - асинхронный двигатель (ТРН - АД)

Если момент сопротивления рабочей машины больше пускового момента электродвигателя ( $M_c > M_n$ ), то двигатель не будет вращаться, поэтому необходимо запустить его при номинальном напряжении  $U_{ном}$  или на холостом ходу.

Регулировать частоту вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей таким способом на практике можно только при вентиляторном характере нагрузки. Кроме того, желательно использовать специальные электродвигатели с повышенным скольжением. При другой нагрузке диапазон регулирования небольшой – от синхронной частоты  $n_0$  до  $n_{кр}$ .

Для изменения напряжения применяют трехфазные автотрансформаторы и тиристорные регуляторы напряжения.

Замкнутая схема управления асинхронным двигателем, выполненным по схеме тиристорный регулятор напряжения - электродвигатель (рисунок 5.3) позволяет регулировать скорость асинхронного двигателя с повышенным скольжением (такие двигатели применяются в вентиляционных установках).

### Задание

Электропривод состоит из асинхронного двигателя с вентилятором. В нем предусмотрена регулировка скорости вращения от 0 до  $\omega_n$  изменением величины питающего напряжения. Момент сопротивления вентилятора описывается выражением  $M_c = 0,2 M_{с.н.} + 0,8 M_{с.н.} (\omega / \omega_n)^2$ . Номинальная частота вращения и номинальный момент вентилятора совпадают с частотой и моментом двигателя.

Определите необходимый диапазон изменения напряжения питания электродвигателя при таких условиях для заданного согласно варианта двигателя.

Таблица 5.1

Варианты задания

Вариант	Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	$\cos\phi_n$	$s_n$ , %	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_{min}}{M_n}$	$I_n/I_n$	Момент инерции, кг*м <sup>2</sup>	Масса, кг
Синхронная частота вращения 3000 мин <sup>-1</sup>											
1	АИР50А2	0,09	60	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000025	2,5
2	АИР50В2	0,12	63	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000028	2,8
3	АИР56А2	0,18	68	0,78	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00042	3,4
4	АИР56В2	0,25	69	0,79	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00047	3,9
5	АИР63А2	0,37	72	0,86	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00076	4,7
6	АИР63В2	0,55	75	0,85	9	2,2	2,2	1,8	5	0,0009	5,45
7	АИР71А2	0,75	78,5	0,83	6	2,1	2,2	1,6	6	0,00097	6,5
8	АИР71В2	1,1	79	0,83	6,5	2,1	2,2	1,6	6	0,0011	8,8
9	АИР80А2	1,5	81	0,85	5	2,1	2,2	1,6	7	0,0018	9,8

Продолжение таблицы 5.1

Вариант	Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi_n$	$s_n$ , %	$M_n / M_n$	$M_{max}/M_n$	$M_{min}/M_n$	$I_n/I_n$	Момент инерции, кг*м <sup>2</sup>	Масса, кг
10	АИР80В2	2,2	83	0,87	5	2	2,2	1,6	7	0,0021	13,2
11	АИР90L2	3	84,5	0,88	5	2	2,2	1,6	7	0,0035	16,7
12	АИР100S2	4	87	0,88	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0059	21,6
13	АИР100L2	5,5	88	0,89	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0075	27,4
14	АИР112М2	7,5	87,5	0,88	3,5	2	2,2	1,6	7,5	0,01	41
15	АИР132М2	11	88	0,9	3	1,6	2,2	1,2	7,5	0,023	64
Синхронная частота вращения 1500 мин <sup>-1</sup>											
16	АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,6
17	АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,9
18	АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00070	3,35
19	АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00079	3,9
20	АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0012	4,7
21	АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0014	5,6
22	АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	0,0013	7,8
23	АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	0,0014	8,8
24	АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
25	АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
26	АИР90L4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17
27	АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	0,0087	21,6
28	АИР100L4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	0,011	27,3
29	АИР112М4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	0,017	41
30	АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	0,028	58

### Пример решения задачи

Рассмотрим решение задачи для варианта 30.

Номинальная частота вращения

$$\omega_n = \omega_n (1 - s_n) = 1500 (1 - 0,04) = 1410 \text{ мин}^{-1}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_n = M_{с.н.} = 9,55 P_n / n_n = 9,55 \cdot 7500 / 1410 = 50,8 \text{ Н м}.$$

Нулевая скорость вращения вентилятора будет, если двигатель развивает момент равный начальному моменту сопротивления вентилятора. Необходимо учесть, что двигатель будет работать в пусковой точке и развивать пусковой момент.

Начальный момент сопротивления вентилятора

$$M_{c.0} = 0,2 M_{c.n.} = 0,2 \cdot 50,8 = 10,2 \text{ Н м.}$$

Пусковой момент двигателя

$$M_n = M_n (M_n / M_n) = 50,8 \cdot 2 = 101,6 \text{ Н м.}$$

Т.к. момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, справедлива пропорция

$$(U_0 / U_n)^2 = M_{c.0} / M_n.$$

Из которой найдем напряжение, при котором двигатель развивает момент  $M_{c.0}$ .

$$U_0 = U_n \sqrt{M_{c.0} / M_n} = 380 \sqrt{10,2 / 101,6} = 120 \text{ В.}$$

Т.о. при изменении напряжения питания от 120 В до 380 В скорость вращения электропривода будет изменяться от 0 до номинальной  $1410 \text{ мин}^{-1}$ .

## 6. Реостатное регулирование скорости двигателей постоянного тока

Реостатное регулирование - самый простой и самый неблагоприятный способ регулирования скорости и (или) момента. В якорную цепь последовательно, если питание осуществляется от источника напряжения (рисунок 6.1а), включаются дополнительные резисторы.

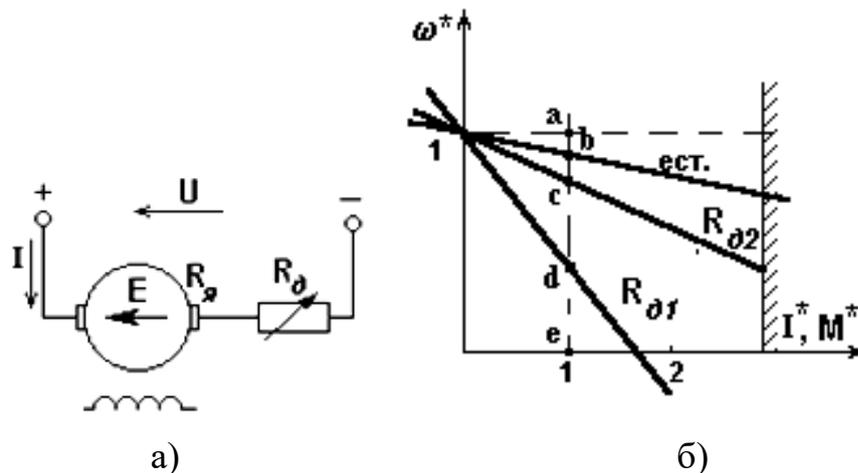


Рисунок 6.1 - Схема (а) и характеристики (б) при реостатном регулировании двигателя независимого возбуждения

Скорость идеального холостого хода при  $U_n$  и  $\Phi_n$  и включении  $R_d$  не изменится:

$$\omega_0 = U_n / k \Phi_n$$

а наклон характеристик  $\Delta\omega = I R / k \Phi_n = M R / (k \Phi_n)^2$  будет увеличиваться пропорционально  $R = R_a + R_d$ .

В электроприводе с двигателем последовательного возбуждения при  $U = U_n$  (рисунок 6.2а) и известной естественной характеристике

$$\omega_a = \frac{U_n - I(R_a + R_s)}{k\Phi}$$

можно использовать уравнение искусственных характеристик при реостатном регулировании

$$\omega_n = \frac{U_n - I(R_a + R_s + R_d)}{k\Phi}$$

и получить соотношение для расчета  $\omega_n$  для любого тока:

$$\omega_n = \omega_a \frac{U_n - I(R_a + R_s + R_d)}{U_n - I(R_a + R_s)}$$

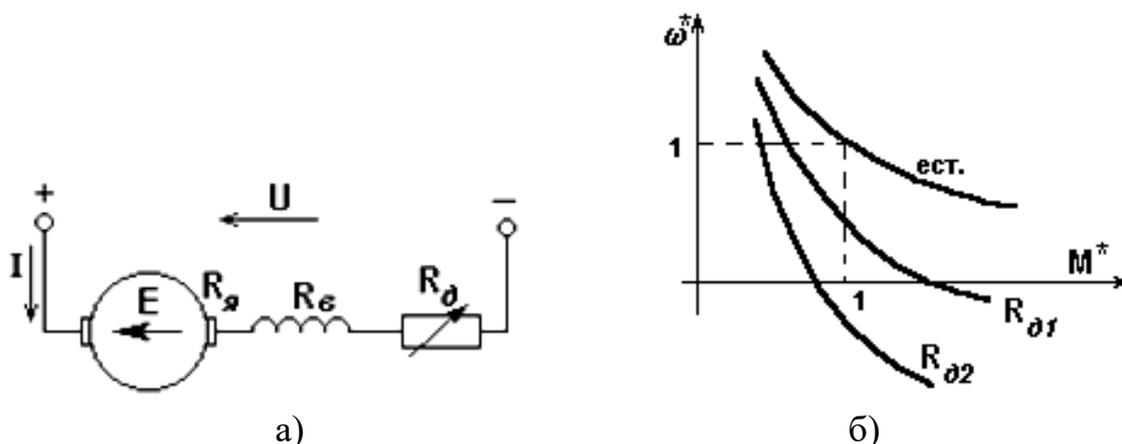


Рисунок 6.2 - Схема (а) и характеристики (б) при реостатном регулировании двигателя последовательного возбуждения

Механическая характеристика может быть построена по известной зависимости  $M(I)$ . Примерный вид механических характеристик при реостатном регулировании показан на рисунке 6.2б.

*Оценка реостатного способа регулирования двигателя постоянного тока.*

1. Регулирование однозонное - вниз от основной скорости, так как вводя  $R_d$ , мы увеличиваем  $\Delta\omega$ , и все искусственные характеристики располагаются в 1 квадранте ниже естественной.

2. Диапазон реостатного регулирования невелик, обычно (2-2,5):1, при изменении  $M_c$  на 40-50%.

Стабильность скорости - низкая, жесткость характеристик падает с ростом  $R$ . Т.к.

$$M = \frac{U_n c - \omega c^2}{R},$$

где  $c = k \Phi_n$ .

Тогда жесткость характеристик

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = -\frac{c^2}{R} \equiv -\frac{1}{R}.$$

Это свойство реостатного регулирования часто существенно осложняет его использование: небольшое случайное изменение  $M_c$  на низких скоростях приводит к значительному изменению  $\omega$ .

3. Реостатное регулирование - ступенчатое, так как величина сопротивления резистора в якорной цепи допускает лишь дискретное изменение. Получение большого числа ступеней затруднено, так как требует большого количества коммутирующих аппаратов (контакторов).

4. При принятых ранее допущениях (внешний обдув) можно считать, что  $M_{дон} = M_n$  на любой реостатной характеристике, так как магнитный поток неизменен.

5. Потери энергии при регулировании значительны и связаны с глубиной регулирования. Это непосредственно вытекает из способа регулирования: скорость изменяется за счет включения резистора - элемента, превращающего поступающую в него электрическую энергию в тепло. Потери мощности пропорциональны относительному перепаду скорости.

6. Капитальные затраты на реостатное регулирование сравнительно невелики: к двигателю добавляется лишь недорогой резистор и коммутационная аппаратура.

Оценивая реостатное регулирование по всем показателям, нетрудно видеть, что это весьма несовершенный способ регулирования.

Разновидностью реостатного регулирования при  $U = U_n$  являются схемы с шунтированием якоря двигателя, несколько расширяющие регулировочные возможности.

### Задание

Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока осуществляется введением добавочного сопротивления величиной до  $5 R_{я}$ .

При моменте сопротивления равном номинальному определите диапазон регулирования скорости и жесткость характеристики при минимальной частоте вращения для заданного согласно варианта двигателя.

Таблица 6.1

## Варианты задания

Вариант	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
1	4П080А2УХЛ4	0,25	110	3,5	1000
2			220	1,8	1000
3		0,37	110	5	1500
4			220	2,5	1500
5		0,55	110	7	2200
6			220	3,5	2200
7		0,75	110	9,4	3000
8			220	4,7	3000
9	4П080В1УХЛ4	0,37	110	4,8	1000
10			220	2,4	1000
11		0,55	110	7,4	1500
12			220	3,7	1500
13		0,75	110	9,4	2200
14			220	4,7	2200
15		1,1	110	13	3000
16			220	6,5	3000
17	4ПБ80А2УХЛ4	0,18	110	2,8	1000
18			220	1,4	1000
19		0,25	110	3,4	1500
20			220	1,7	1500
21		0,37	110	4,6	2200
22			220	2,3	2200
23		0,55	110	7	3000
24			220	3,5	3000
25	4ПБ80В1УХЛ4	0,25	110	3,4	1000
26			220	1,7	1000
27		0,37	110	4,8	1500
28			220	2,4	1500
29		0,55	110	6,8	2200
30			220	3,4	2200
31		0,8	110	9,2	3000
32		4ПО100S1УХЛ4	0,37	110	5
33	220			2,3	750
34	0,55		110	7,3	1000
35			220	3,5	1000
36	0,75		110	9,2	1500
37			220	4,5	1500
38	1,1		110	12,8	2200
39			220	6,4	2200
40	1,6		110	19	3000
41			220	9,5	3000

## Пример решения задачи

Рассмотрим решение задачи для варианта 41.

При отсутствии добавочного сопротивления скорость вращения с номинальным моментом на валу будет номинальной  $3000 \text{ мин}^{-1}$  или

$$\omega_{max} = \omega_n = n_n / 9,55 = 3000 / 9,55 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Это есть максимальная скорость вращения.

Минимальная скорость будет при добавочном сопротивлении  $5R_{я}$ .

Найдем ее.

КПД двигателя

$$\eta_n = P_n / (U_n I_n) = 1600 / (220 \cdot 9,5) = 0,766,$$

Приблизительно сопротивление якоря можно найти по формуле

$$R_{я} = U_n (1 - \eta_n) / (2 I_n),$$

$$R_{я} = 220 (1 - 0,766) / (2 \cdot 9,5) = 2,7 \text{ Ом}.$$

Найдем коэффициент  $C$

$$C = K \Phi = (U_n - I_n R_{я}) / \omega_n = (220 - 9,5 \cdot 2,7) / 314 = 0,619 \text{ В} \cdot \text{с}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_n = 9,55 P_n / n_n = 9,55 \cdot 1600 / 3000 = 5,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из уравнения механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения найдем скорость при добавочном сопротивлении  $5R_{я}$ .

$$\omega_{min} = U_n / C - (R_{я} + R_{\delta}) M / C^2 = 220 / 0,619 - (2,7 + 2,75) \cdot 5,1 / 0,619^2 = 141 \text{ с}^{-1}.$$

Диапазон регулирования

$$D = 1 : \omega_{max} / \omega_{min} = 1 : 314 / 141 = 1 : 2,24$$

Т.к. характеристики двигателя линейные, жесткость при минимальной скорости

$$\beta = (M_n - 0) / (\omega_{max} - \omega_{min}) = (5,1 - 0) / (314 - 141) = 0,029$$

## Рекомендуемая литература

1. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебное пособие / состав. С.В. Петухов, М.В. Кришьянис. Архангельск: САФУ, 2020. 105 с.
2. Алиев М.Т., Буканова Т.С. Микропроцессорные системы управления электроприводами: учеб. пособие. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. 128 с.
3. Бабер А.И. Системы автоматического управления электроприводами: учеб. пособие. Мн.: РИПО, 2020. 147 с.
4. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для вузов. М.: Академия, 2007. 576 с.
5. Епифанов А.П., Малайчук Л.М., Гущинский А.Г. Электропривод: учеб. для вузов / под ред. А.П. Епифанова. СПб.: Лань, 2012. 400 с.
6. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2008. 208 с.
7. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: учеб. для вузов. М.: Инфра-М, 2009. 208 с.
8. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2013. 224 с.
9. Сысенко В.Т. Автоматизированный электропривод: учеб.-метод. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2019. 52 с.
10. Электрооборудование, электропривод и основы проектирования автоматизированных систем управления: учеб. пособие / состав. Л.А. Александрович. Кемерово: Кузбасская ГСХА, 2020. 168 с.

Учебное издание

Безик Валерий Александрович

## **Автоматизированный электропривод**

Учебное-методическое пособие  
по выполнению практических работ  
для студентов очной и заочной форм обучения  
направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,  
15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 17.01.2023 г. Формат 60x84.  $\frac{1}{16}$ .  
Бумага офсетная. Усл. п. 2,20. Тираж 25 экз. Изд. № 7459

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ