

**КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД
И АВТОМАТИКА**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД И АВТОМАТИКА

Учебно-методическое пособие

**Казань
2025**

УДК 62-83(075)
ББК 31.291я73
Э45

Электрический привод и автоматика : учебно-методическое
Э45 пособие / составители: В. М. Бутаков, Л. Н. Киснеева. – Казань : КГЭУ,
2025. – 40 с.

Приведены методические указания по выполнению и оформлению контрольной работы по дисциплине «Электрический привод и автоматика», предполагающей выполнение двух заданий, в рамках которых производятся расчеты электродвигателей постоянного и переменного тока. Описание каждого задания включает в себя непосредственно формулировку, исходные данные по вариантам и краткие теоретические сведения, подкрепленные подробно разобранными решениями типовых задач.

Предназначено для обучающихся заочной формы по образовательным программам направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, направленности (профили) «Электромеханические комплексы и системы», «Электромобильный и беспилотный транспорт», «Проектирование и эксплуатация электрохозяйства потребителей».

УДК 62-83(075)
ББК 31.291я73

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом
Института электроэнергетики и электроники*

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к условиям реализации образовательных программ «Электромеханические комплексы и системы», «Электромобильный и беспилотный транспорт» и «Проектирование и эксплуатация электрохозяйства потребителей», студенты заочной формы обучения должны выполнить контрольную работу по дисциплине «Электрический привод и автоматика».

Контрольная работа является одной из основных форм самостоятельной учебной деятельности студентов и представляет собой решение конкретной задачи.

Учебно-методическое пособие, основу которого составляют типовые расчеты электродвигателей постоянного и переменного тока, разработано с целью оказания помощи обучающимся, приступающим к выполнению контрольной работы, в отношении выбора методов расчета, порядка их выполнения, объема и оформления.

Залогом качественного и правильного выполнения контрольной работы является самостоятельное изучение темы с использованием приведенных теоретических сведений и рекомендуемой литературы [1–3].

В результате выполнения контрольной работы у обучающихся формируется способность разбираться в принципах построения естественных механических и электромеханических характеристик, реостатных и искусственных механических характеристик двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

При выполнении контрольной работы необходимо строго придерживаться приведенных ниже требований. Работы, выполненные без соблюдения этих правил, не зачитываются и возвращаются студенту для переработки.

1. Прежде чем приступить к решению задачи необходимо изучить соответствующий теоретический материал.

2. Выполненную контрольную работу надо загрузить в *LMS Moodle* в ответ на задание «Контрольная работа» в курсе «Электрический привод и автоматика». Контрольные работы размещаются в формате *.doc и *.docx.

3. В названии файла необходимо указать номер группы, фамилию и инициалы студента, а также сокращенное название дисциплины:

ЗЭМКу-1-22, Иванов И.И., ЭПА

4. Титульный лист контрольной работы оформляется, как показано в приложении А.

5. Все задания должны быть выполнены в полном объеме в строгом соответствии со своим вариантом. В противном случае контрольная работа не будет зачтена.

6. Перед решением каждой задачи необходимо полностью переписать ее условие.

7. Решение задач следует излагать подробно, сопровождая все выполняемые действия пояснениями и чертежами.

8. Графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге, отсканированы и вставлены в файл. Оси координат с проставленными числовыми значениями должны проходить по «сантиметровым» линиям бумаги. Масштаб графиков должен составлять целое число сантиметров (например, в одном сантиметре – 10 А).

9. Допускается выполнение контрольной работы рукописным способом с последующим сканированием всех листов и вставкой их в документ *MS Word*.

10. Замечания по выполненной контрольной работе рецензент указывает в комментариях к загруженному в *LMS Moodle* файлу.

11. Работа считается зачтенной, если в *LMS Moodle* выставлена положительная оценка.

ЗАДАНИЕ № 1

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) с заданными величинами номинального напряжения питания якоря U_H , номинального тока якоря I_H , номинальной скорости вращения n_H и сопротивления якоря $R_{\text{я}}$:

а) постройте естественные механическую и электромеханическую характеристики;

б) постройте реостатную механическую характеристику через точку с заданными значениями координат ($M_T = k_1 M_H$ и $\omega_T = k_2 \omega_H$) и графически определите величину дополнительного сопротивления в цепи якоря R_d ;

в) постройте искусственную механическую характеристику регулирования скорости изменением напряжения на обмотке якоря через точку с заданными значениями координат ($M_T = k_1 M_H$ и $\omega_T = k_2 \omega_H$) и аналитически определите напряжение на обмотке якоря при этом. При расчётах активным сопротивлением тиристорного преобразователя пренебречь.

Исходные данные по вариантам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вариант	P_H , кВт	U_H , В	I_H , А	$R_{\text{я}}$, Ом	n_H , об/мин	k_1	k_2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,6	110	78,5	0,14	3150	1,2	0,3
2	8	110	89,2	0,095	2200	1,2	0,4
3	15	110	159,5	0,051	2240	1,1	0,4
4	26	220	134,3	0,063	1500	0,9	0,8
5	37	220	187,9	0,037	800	1,1	0,3
6	8,5	110	95,4	0,076	1000	1,1	0,5
7	13	110	140,7	0,042	750	0,9	0,55
8	22	220	114,3	0,076	900	1,2	0,6
9	36	440	91,4	0,167	750	1,3	0,3
10	60	440	150,7	0,076	1950	0,8	0,5
11	5,6	220	32,2	0,56	1750	1,1	0,5
12	8	220	43,8	0,303	2160	0,7	0,8
13	15	220	79,7	0,14	680	1,1	0,3
14	26	440	66,4	0,242	3150	0,7	0,9
15	37	440	105,8	0,14	2400	1,2	0,5
16	8,5	220	47,1	0,304	610	1,2	0,6

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
17	13	220	69,5	0,167	2000	0,9	0,4
18	22	440	57,1	0,376	1000	0,8	0,5
19	5,6	440	16	2,325	1750	0,9	0,65
20	8	440	22,2	1,442	4000	0,6	0,7
21	15	440	39,6	0,559	2500	0,8	0,7
22	8,5	440	23,6	1,302	2800	1,0	0,5
23	13	440	35	0,788	600	0,5	1,0
24	7,5	220	44,3	0,451	2300	0,3	1,0
25	11	220	62,9	0,271	1800	0,7	0,8
26	15	220	84,7	0,210	2750	0,8	0,7
27	22	220	122	0,129	3700	0,9	0,6
28	37	220	194,4	0,052	3000	1,0	0,4
29	37	440	97,2	0,236	990	1,1	0,4
30	15	220	85,2	0,22	5200	1,2	0,45
31	18	220	101,6	0,164	1600	1,3	0,3
32	18	440	50,8	0,82	1300	1,2	0,3
33	22	220	123,5	0,113	550	1,1	0,5
34	22	440	61,8	0,331	1850	1,0	0,6
35	37	220	197,9	0,054	800	0,9	0,7
36	37	440	99	0,23	660	0,8	0,7
37	50	440	130,6	0,164	900	0,7	0,6
38	55	220	287,4	0,029	900	0,6	0,6
39	55	440	143,7	0,085	700	0,5	1,0
40	22	220	120,5	0,095	1530	0,5	0,8
41	30	220	161,4	0,068	1600	0,6	0,6
42	30	440	80,7	0,267	1600	0,6	0,5
43	45	220	237,8	0,059	1750	0,7	0,85
44	45	440	118,2	0,199	1750	0,7	0,6
45	75	220	385,2	0,024	1800	0,8	0,5
46	75	440	192,6	0,048	2280	0,8	0,75
47	90	440	229,8	0,137	3000	0,9	0,6
48	110	220	558,7	0,011	4000	0,9	0,65
49	110	440	279,4	0,049	5000	1,0	0,5
50	45	220	239,2	0,044	3000	1,0	0,6
51	45	440	119,6	0,178	3000	1,1	0,5

1	2	3	4	5	6	7	8
52	55	440	143,7	0,096	1750	1,1	0,4
53	100	440	258,3	0,064	600	1,2	0,5
54	110	220	561,8	0,013	1900	1,2	0,55
55	160	220	808,1	0,007	2300	0,8	0,4
56	160	440	404	0,019	710	0,9	0,7
57	10	110	117,3	0,11	1650	0,7	0,7
58	10	220	57,5	0,348	2350	0,6	0,85
59	10	440	29,1	1,634	2750	0,9	0,85
60	30	220	160,4	0,069	3260	0,7	0,6

Краткие теоретические сведения

Схема включения ДПТ НВ показана на рис. 1.

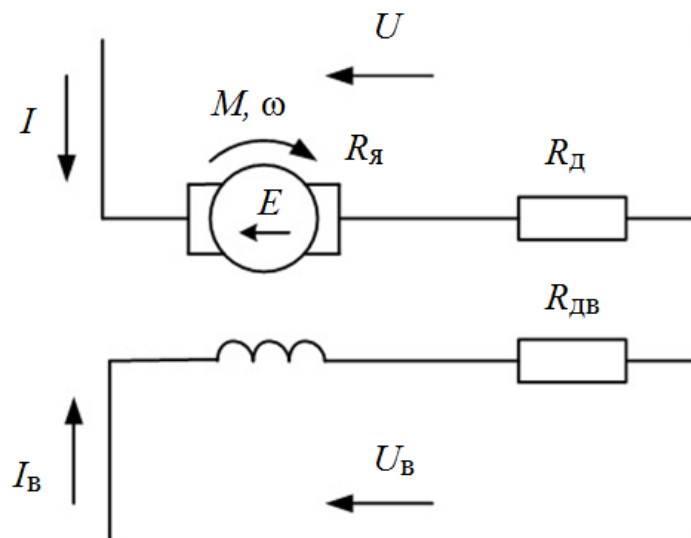


Рис. 1. Схема включения ДПТ НВ

При анализе работы ДПТ НВ используются следующие допущения:

- 1) якорная цепь питается от идеального источника напряжения, т. е. работа исследуемого двигателя не влияет на величину U ;
- 2) параметры двигателя постоянные;
- 3) величина магнитного потока ДПТ НВ зависит только от величины тока обмотки возбуждения I_B и не зависит от тока нагрузки двигателя I , т. е. реакция якоря не проявляется.

Электромеханической характеристикой двигателя называется зависимость тока I , потребляемого двигателем, от угловой частоты вращения его ротора ω . Иногда используется другое название этой характеристики – *скоростная*. Электромеханическая характеристика ДПТ НВ представляет собой взаимосвязь тока якоря I и угловой частоты вращения якоря ω , т. е. $I = f(\omega)$. Тогда уравнение электромеханической характеристики ДПТ НВ будет иметь вид:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения якоря, с^{-1} ; $k = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивный коэффициент двигателя; p – число пар полюсов двигателя; N – число активных проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; Φ – магнитный поток одного полюса, Вб; $R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$ – полное сопротивление якорной цепи, Ом; $R_{\text{я}}$ – внутреннее сопротивление ДПТ НВ; $R_{\text{д}}$ – внешнее сопротивление якорной цепи, Ом.

Внутреннее сопротивление ДПТ НВ – это сопротивление обмотки якоря, щеток и щеточных контактов, а также обмоток дополнительных полюсов и компенсационной обмотки, если они использованы в двигателе. Обмотки дополнительных полюсов устанавливаются в ДПТ средней и большой мощности и служат для улучшения условий коммутации в щеточно-коллекторном узле и для уменьшения влияния реакции якоря, т. е. для того чтобы ток якоря I не влиял на магнитный поток Φ . Эти обмотки включаются последовательно с якорной обмоткой и расположены на дополнительных полюсах, размещенных на статоре между основными полюсами обмотки возбуждения. Компенсационные обмотки применяются в ДПТ средней и большой мощности и также включаются последовательно с якорной обмоткой. Они располагаются на основных полюсах обмотки возбуждения, т. е. на статоре. Действие компенсационной обмотки направлено так же, как и действие обмотки дополнительных полюсов, на уменьшение влияния реакции якоря.

Внешнее сопротивление якорной цепи – это суммарное сопротивление дополнительного резистора (если он установлен) и сопротивление источника напряжения. Если в качестве источника напряжения используется сеть постоянного напряжения, то ее сопротивлением пренебрегают.

Механической характеристикой ДПТ НВ называется взаимосвязь момента двигателя M и угловой скорости ω , т. е. $M = f(\omega)$. При этом в качестве момента M принимается электромагнитный момент ДПТ НВ, а не полезный момент на валу M_2 . Электромагнитный момент M двигателя больше момента на валу M_2 на величину ΔM , обусловленную потерями в стали, механическими и добавочными потерями. Поэтому в расчетах, полагая момент двигателя M_2 равным M , необходимо момент потерь ΔM прибавлять к приведенному моменту статической нагрузки M_c .

В соответствии с законом электромагнитных сил:

$$M = k\Phi I. \quad (2)$$

После подстановки тока I из выражения (2) в (1) получим уравнение механической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{RM}{(k\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (3)$$

Естественными называются электромеханическая и механическая характеристики ДПТ НВ, полученные при следующих условиях:

$$U = U_H; \quad R_d = 0; \quad \Phi = \Phi_H,$$

т. е. напряжение питания обмотки якоря равно номинальному, добавочное сопротивление в цепи якоря R_d отсутствует и поток, создаваемый обмоткой возбуждения, равен номинальному (т. е. ток обмотки возбуждения равен номинальному или, иначе говоря, отсутствует добавочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения $R_{дв}$). Если хотя бы одно из этих условий нарушено, характеристики называются *искусственными* или *регулируемыми*. В соответствии с (1) и (3) все характеристики ДПТ НВ (искусственные и естественные) представляют собой прямые и могут быть построены по двум точкам. Для построения естественных характеристик, как правило, используется точка идеального холостого хода ($\omega = \omega_0$; $I = M = 0$) и точка работы в номинальном режиме ($\omega = \omega_H$; $I = I_H$; $M = M_H$).

Как следует из (3), существует три способа получения искусственных характеристик для управления угловой скоростью ДПТ НВ: путем изменения либо сопротивления R , либо потока Φ , либо напряжения U .

При регулировании ω перечисленными способами изменяются как механическая, так и электромеханическая характеристики.

Изменение ω при изменении M регулированием угловой скорости не является, а считается нежелательным фактором. Двигатель обеспечивает момент M , равный моменту статической нагрузки M_c , и желательно, чтобы угловая скорость ω не зависела от этой нагрузки.

Реостатное регулирование

Регулирование скорости ДПТ НВ изменением сопротивления R путем добавления R_d в якорную цепь – реостатное регулирование. Механические и электромеханические характеристики при таком регулировании представлены на рис. 2.

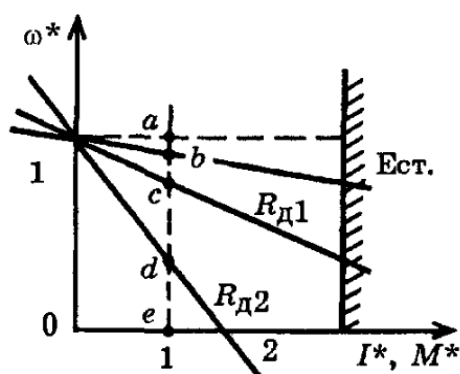


Рис. 2. Характеристики ДПТ НВ при реостатном регулировании

Преимуществом данного способа регулирования является простота и невысокие капитальные затраты на дополнительный резистор и коммутационную аппаратуру.

Недостатки также очевидны:

- 1) невысокий диапазон $(2...2,5):1$ и однозонность регулирования – скорость можно только снизить;
- 2) снижение жесткости механической характеристики и, как следствие, снижение стабильности угловой скорости;
- 3) появление дополнительных электрических потерь мощности в добавочном резисторе $I^2 R_d$.

Вместе с тем, при реостатном регулировании уменьшаются пусковые ток и момент (I_{K3}, M_{K3}) . Уменьшение пускового тока делает реостатный пуск ДПТ НВ более «щадящим» как для самого ДПТ НВ, так и для источника напряжения. Уменьшение пускового момента ДПТ НВ является, с одной

стороны, нежелательным фактором, так как при этом время разгона ДПТ НВ будет больше, чем было бы на естественной характеристике. Но с другой стороны существует целый ряд механизмов, где необходимо снижение пускового момента по условиям технологии. Например, двигатели насосов, качающих жидкость, не должны иметь большой пусковой момент, чтобы не было гидравлического удара в трубопроводе. Другим примером является выбор люфтов и зазоров в механических передачах при пуске механизмов. Поэтому в современных электроприводах на базе ДПТ НВ реостатное регулирование используется только для ограничения пусковых токов и моментов и не находит применения для изменения ω в длительных режимах работы.

Регулирование скорости ДПТ НВ изменением потока

Схема включения двигателя приведена на рис. 3. При этом якорная цепь двигателя без каких-либо добавочных резисторов подключена к источнику с напряжением $U = U_H$, а цепь возбуждения питается от усилителя – возбuditеля B (рис. 3) или в простейшем случае от того же источника через добавочный резистор. Так как номинальный ток возбуждения $I_{B,H}$ соответствует допустимому нагреву обмоток возбуждения, то при регулировании скорости в условиях продолжительной работы ток возбуждения можно только уменьшать.

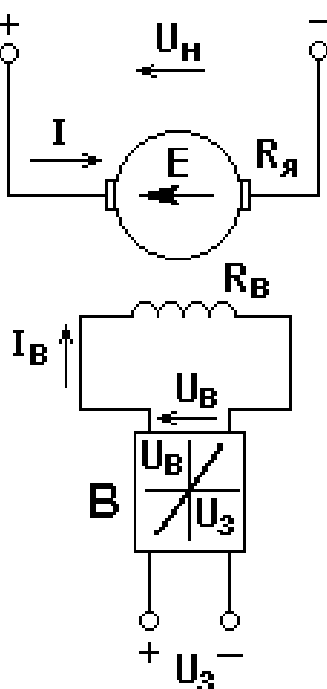


Рис. 3. Схема ДПТ НВ с регулированием скорости изменением магнитного потока

Электромеханические и механические характеристики двигателя при ослаблении поля показаны на рис. 4 (нерабочие участки изображены пунктирными линиями).

Скорость идеального холостого хода $\omega_0 = U_H / k\Phi$ растет с уменьшением потока. Так как ток короткого замыкания не зависит от степени ослабления поля, все электромеханические характеристики пересекаются в одной точке $I_{КЗ} = U_H / R_{\Sigma}$ (следует помнить, что ток короткого замыкания может во много раз превосходить допустимый). Момент короткого замыкания $M_{КЗ} = kI_{КЗ}\Phi$ уменьшается с уменьшением потока (рис. 4, б).

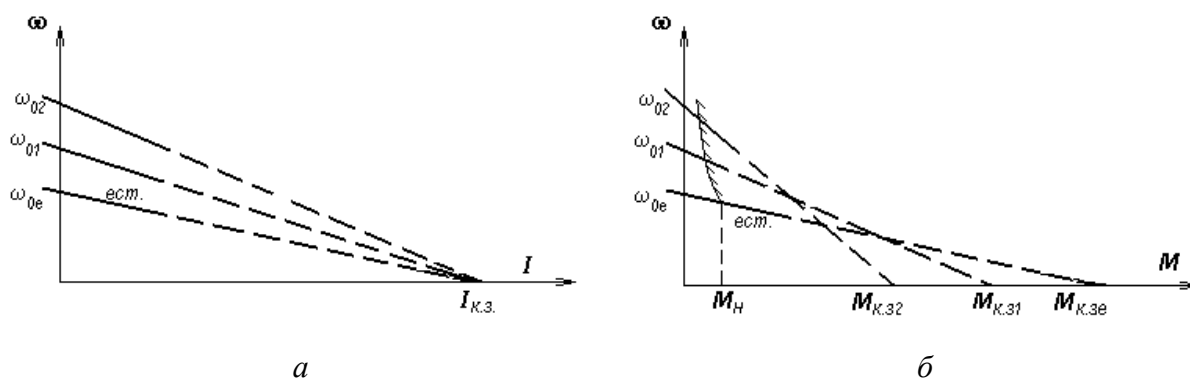


Рис. 4. Электромеханическая (а) и механическая (б) характеристики ДПТ НВ при ослаблении поля

Преимущества данного способа регулирования:

1) диапазон регулирования скорости может быть значительным – до (3...4):1;

2) стабильность скорости относительно высокая – характеристики жесткие (следует помнить, что $I_{КЗ} = (20...50)I_H$);

3) простота реализации рассматриваемого способа регулирования и отсутствие дополнительных элементов в силовой цепи, в которых рассеивается энергия, делают способ весьма эффективным с экономической точки зрения: регулирование не сопровождается дополнительными потерями энергии. Капитальные затраты на регулирование также весьма низкие, что связано с малой мощностью цепи возбуждения, которая на 1,5...2 порядка меньше, чем мощность двигателя

Главный недостаток способа, существенно ограничивающий область его применения, это то, что как видно из приведенных характеристик, данный способ регулирования позволяет только увеличить скорость. Поэтому он обычно применяется в сочетании с другими, позволяющими регулировать скорость в направлении «вниз» от основной.

Регулирование скорости ДПТ НВ изменением напряжения на обмотке якоря

Данный вид регулирования получил наибольшее распространение в современных системах регулируемого электропривода на базе ДПТ НВ. Изменения напряжения на якоре ДПТ НВ может быть осуществлено при помощи различных средств, к которым относятся:

1) регулируемый источник переменного напряжения (чаще всего лабораторный трансформатор ЛАТР) с последующим выпрямлением на неуправляемом выпрямителе. Данная схема, как правило, используется в лабораторных установках;

2) система «генератор – двигатель», когда якорь ДПТ НВ запитывается от генератора постоянного напряжения, выходное напряжение которого регулируется током возбуждения генератора. Подобные системы до сих пор используются в мощных приводах карьерных экскаваторов;

3) магнитные усилители (в настоящее время практически не используются);

4) управляемый выпрямитель на тиристорах (тиристорный преобразователь ТП) наиболее широко применяется в современных системах регулируемых приводов постоянного тока;

5) широтно-импульсный преобразователь (ШИП) используется для высокоточных (прецизионных) приводов постоянного тока ограниченной мощности (до 50 кВт) с широким диапазоном регулирования скорости (до 1:1000).

Наибольшее распространение в современных регулируемых электроприводах на базе ДПТ НВ получила система «ТП – ДПТ НВ».

Характеристики ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на обмотке якоря показаны на рис. 5. Предполагается, что ТП имеет двустороннюю проводимость. Так как поток Φ при изменении U якоря неизменен, электрохимическая и механическая характеристики совпадают. Как следует из (1) и (3), при таком регулировании при изменении U пропорционально изменяется лишь ω_0 , а $\Delta\omega$ не зависит от U . Таким образом, семейство искусственных характеристик при $k\Phi = k\Phi_H$ – параллельные прямые с наклоном несколько большим, чем у естественной характеристики двигателя, поскольку $R = R_{\text{я}} + R_{\text{т}}$. Если пренебречь активным сопротивлением ТП $R_{\text{т}}$, то $\Delta\omega$ остается неизменным по сравнению с естественной характеристикой, т. е. регулировочные характеристики в этом случае проходят параллельно естественной.

Естественные характеристики ДПТ НВ построены при $U = U_H$ и во время регулирования скорости ДПТ НВ увеличивать U выше U_H нельзя, так как может наступить пробой изоляции обмотки якоря. Поэтому при таком регулировании U только уменьшают ($U \leq U_H$). Поэтому характеристика при подобном способе регулирования проходит ниже естественной и параллельно ей, как показано на рис. 5.

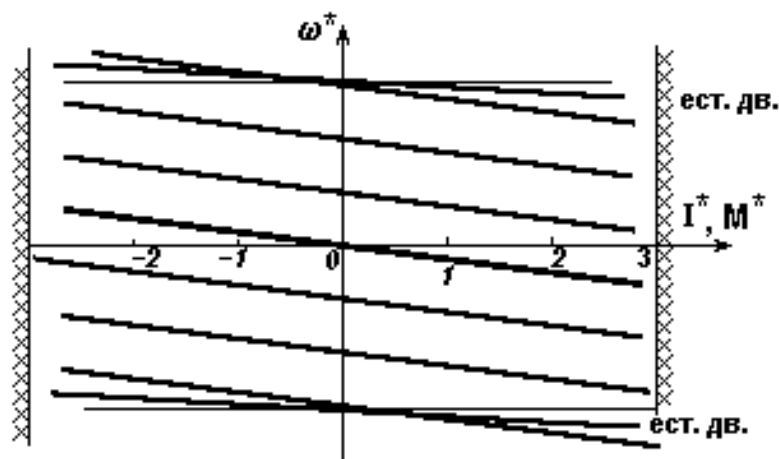


Рис. 5. Характеристики ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на обмотке якоря

Двигательный режим работы ДПТ НВ при регулировании U лежит в I квадранте. Если изменить полярность U характеристики будут лежать в III квадранте.

Достоинства данного способа регулирования:

- 1) широкий диапазон регулирования (10:1 – в разомкнутых системах, 1000:1 – в замкнутых системах), регулирование плавное;
- 2) жесткость характеристик высокая, поэтому стабильность ω высокая;
- 3) допустимый момент нагрузки не изменяется по сравнению с естественной характеристикой $M_{доп} = M_H$, так как $\Phi = \Phi_H$;

4) коэффициент полезного действия (КПД) электропривода практически не изменяется, поскольку не используются дополнительные резисторы в цепи якоря, а КПД самого тиристорного преобразователя ТП высок и составляет 0,97...0,98.

Недостатки данного способа регулирования – более высокая стоимость ТП, чем стоимость резисторов, и возможность регулирования только ниже естественной характеристики (т. е. скорость можно только снижать).

Несмотря на это, в подавляющем большинстве современных регулируемых электроприводов на базе ДПТ НВ используется способ регулирования ω с помощью ТП в цепи якоря. При необходимости получения ω выше

номинальной ω_H схема дополняется узлом регулирования тока возбуждения I_B (т. е. дополняется способом регулирования ω уменьшением потока Φ , что позволяет увеличить скорость выше номинальной).

Пример 1. Решить задание № 1 при следующих исходных данных: $U_H = 220$ В, $I_H = 26$ А, $n_H = 1100$ об/мин, $R_{\text{я}} = 0,94$ Ом; $k_1 = 1,5$; $k_2 = 0,5$. Координаты точки: $M_T = k_1 M_H = 1,5 M_H$; $\omega_T = k_2 \omega_H = 0,5 \omega_H$.

Решение. 1. Строим естественные механическую и электромеханическую характеристики.

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,142 \cdot 1100}{30} = 115,2 \text{ рад/с.}$$

Коэффициент $c = k\Phi$:

$$c = k\Phi = \frac{U_H - I_H R_{\text{я}}}{\omega_H} = \frac{220 - 26 \cdot 0,94}{115,2} = 1,698.$$

Угловая скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{c} = \frac{220}{1,698} = 129,6 \text{ рад/с.}$$

Ток короткого замыкания:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_H}{R_{\text{я}}} = \frac{220}{0,94} = 234 \text{ А.}$$

Номинальный электромагнитный момент:

$$M_H = c I_H = 1,698 \cdot 26 = 44,15 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Электромагнитный момент короткого замыкания:

$$M_{\text{КЗ}} = c I_{\text{КЗ}} = 1,698 \cdot 234 = 397,3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Переходим к построению естественной электромеханической характеристики в координатах «ток якоря I – угловая скорость ω ». Через две точки проводим прямую линию (рис. 6):

– точка 1 – $I = 0$, $\omega = \omega_0 = 129,6$ рад/с;

– точка 2 – $I = I_{K3} = 234$ А, $\omega = 0$.

Затем из точки на оси абсцисс $I = I_H = 26$ А и точки на оси ординат $\omega = \omega_H = 115,2$ рад/с проводим перпендикуляры до их взаимного пересечения и получаем точку номинального режима, которая при правильных расчетах и построении будет принадлежать графику естественной электромеханической характеристики (рис. 6).

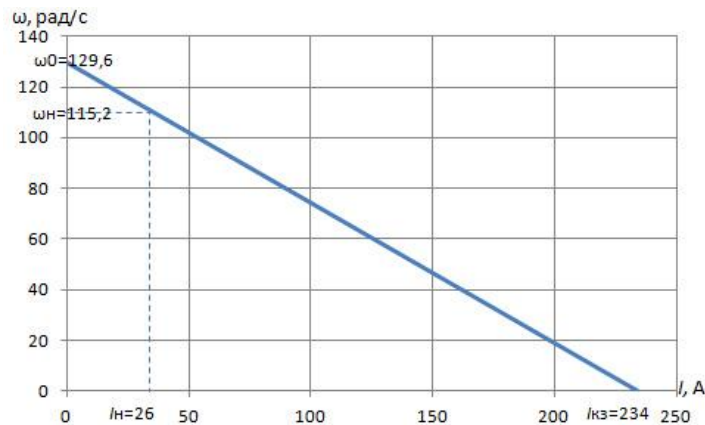


Рис. 6. Естественная электромеханическая характеристика ДПТ НВ

Естественную механическую характеристику строим в координатах «электромагнитный момент M – угловая скорость ω » по двум точкам (прямая А, рис. 7):

– точка 1 – $M = 0$, $\omega = \omega_0 = 129,6$ рад/с;

– точка 2 – $\omega = 0$, $M = M_{K3} = 397,3$ Н · м.

Далее находим точку номинального режима ($M = M_H = 44,15$ Н · м; $\omega = \omega_H = 115,2$ рад/с), принадлежащую естественной механической характеристике (прямой А), как показано на рис. 7.

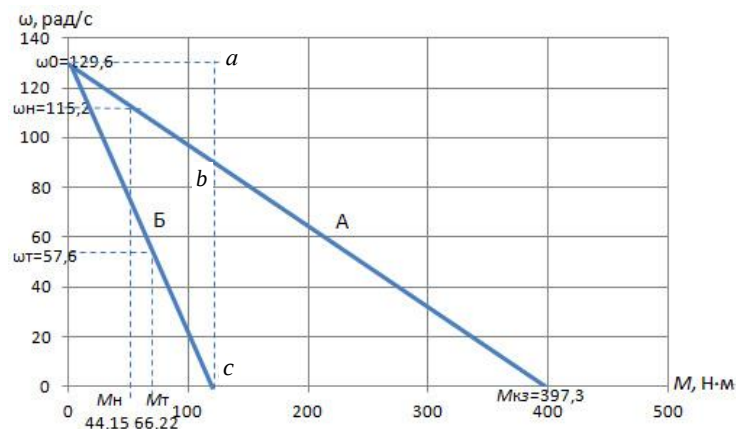


Рис. 7. Естественная (прямая А) и реостатная (прямая Б) механические характеристики ДПТ НВ

2. Строим реостатную механическую характеристику через точку с заданными значениями координат ($M_T = k_1 M_H$ и $\omega_T = k_2 \omega_H$), определяем величину дополнительного сопротивления в цепи якоря R_d . Схема включения ДПТ НВ при реостатном регулировании скорости представлена на рис. 8.

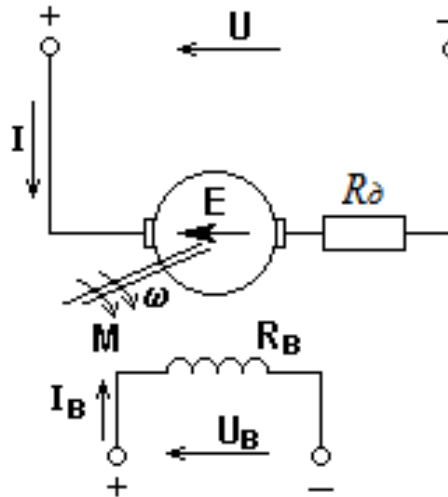


Рис. 8. Схема включения ДПТ НВ при реостатном регулировании скорости

Определяем координаты точки:

$$M_T = k_1 M_H = 1,5 M_H = 1,5 \cdot 44,15 = 66,22 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\omega_T = k_2 \omega_H = 0,5 \omega_H = 0,5 \cdot 115,2 = 57,6 \text{ рад/с}.$$

Через точку с данными координатами проводим реостатную механическую характеристику (прямая Б, рис. 7). Точку пересечения этой характеристики с осью абсцисс обозначаем через c . Затем из точки $\omega = \omega_0 = 129,6 \text{ рад/с}$ и из точки c проводим перпендикуляры, точку пересечения которых обозначаем через a . Точку пересечения перпендикуляра с прямой естественной механической характеристикой – через b (рис. 7).

Длина отрезка ab пропорциональна сопротивлению якоря $R_{\text{я}}$, а длина отрезка bc – величине дополнительного сопротивления R_d . Измеряем отрезки ab и bc : $ab = 39,1 \text{ рад/с}$; $bc = 90,5 \text{ рад/с}$.

Определяем величину дополнительного сопротивления:

$$R_d = R_{\text{я}} \frac{bc}{ab} = 0,94 \cdot \frac{90,5}{39,1} = 2,18 \text{ Ом}.$$

3. Строим искусственную механическую характеристику регулирования скорости изменением напряжения на обмотке якоря через точку с заданными значениями координат ($M_T = k_1 M_H$ и $\omega_T = k_2 \omega_H$) и аналитически определяем напряжение на обмотке якоря при этом. Схема включения ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на обмотке якоря приведена на рис. 9.

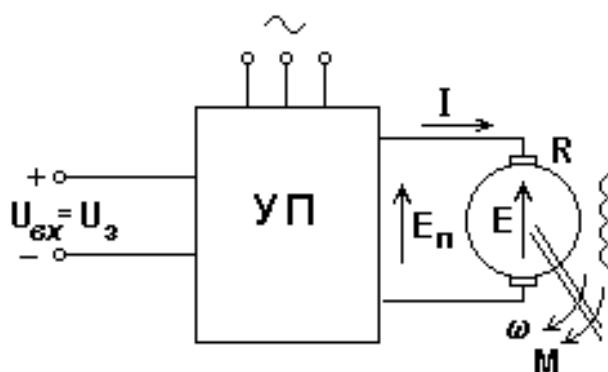


Рис. 9. Схема включения ДПТ НВ при регулировании скорости изменением напряжения на обмотке якоря: УП – управляемый преобразователь

В качестве УП используется ТП, т. е. управляемый выпрямитель, который выпрямляет переменное напряжение питающей сети в регулируемую постоянную ЭДС E_{π} . Если пренебречь активным сопротивлением ТП R_{π} , то ЭДС преобразователя E_{π} будет равна напряжению на якоре двигателя U : $E_{\pi} = U$. Путем изменения напряжения задания преобразователя $U_{вх} = U_з$ регулируют напряжение на якоре двигателя, таким образом изменяя его скорость.

Данная регулировочная механическая характеристика (как и естественная механическая характеристика) представляет собой прямую, поэтому для ее построения необходимо знать две точки: точку, через которую должна пройти регулировочная характеристика, и точку идеального холостого хода на этой характеристике.

Координаты точки, через которую должна пройти регулировочная характеристика, были определены в п. 2: $M_T = 66,22 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $\omega_T = 57,6 \text{ рад/с}$.

Скорость идеального холостого хода на регулировочной механической характеристике – сумма скорости ω_T и падение скорости под нагрузкой $\Delta\omega_T$:

$$\omega_{0и} = \omega_T + \Delta\omega_T.$$

Так как по условию задачи сопротивлением ТП можно пренебречь, то построенная искусственная характеристика должна будет пройти параллельно естественной механической характеристике (прямая А, рис. 10). Поэтому величина падения скорости под нагрузкой $\Delta\omega_T$ будет одна и та же, как на естественной механической характеристике, так на регулировочной механической характеристике.

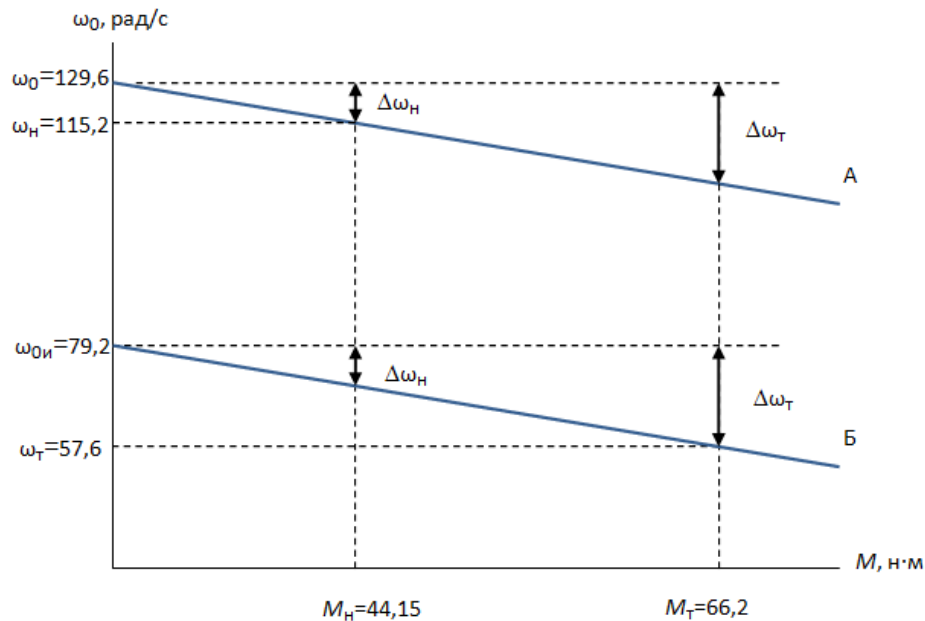


Рис. 10. Естественная (прямая А) и регулировочная (прямая Б) механические характеристики ДПТ НВ

Определяем падение скорости под нагрузкой $\Delta\omega_T$. В связи с тем, что механическая характеристика ДПТ НВ представляет собой прямую линию (рис. 10), запишем:

$$\frac{\Delta\omega_T}{\Delta\omega_H} = \frac{M_T}{M_H}, \quad \Delta\omega_T = \Delta\omega_H \frac{M_T}{M_H} = 14,4 \cdot \frac{66,2}{44,1} = 21,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

где $\Delta\omega_H$ – падение скорости под нагрузкой:

$$\Delta\omega_H = \omega_0 - \omega_H = 129,6 - 115,2 = 14,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Тогда скорость идеального холостого хода на регулировочной механической характеристике составит:

$$\omega_T + \Delta\omega_T = 57,6 + 21,6 = 79,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Далее строим регулировочную характеристику (прямая Б, рис. 10), которая строится в координатах «электромагнитный момент M – угловая скорость ω » через две точки:

– точка 1 – $M = 0$, $\omega = \omega_{0н} = 79,2$ рад/с;

– точка 2 – $\omega_T = 0,5\omega_H = 0,5 \cdot 115,2 = 57,6$ рад/с, $M_T = 1,5M_H = 1,5 \cdot 44,15 = 66,2$ Н·м.

3. Определяем напряжение U , которое должно быть на выходе тиристорного преобразователя и подаваться на обмотку якоря, чтобы регулировочная характеристика проходила через требуемую точку.

В соответствии с формулой (3) скорость идеального холостого хода на механической характеристике прямо пропорциональна напряжению на обмотке якоря, поэтому

$$U = U_H \frac{\omega_{0н}}{\omega_0} = 220 \cdot \frac{79,2}{129,6} = 134,4 \text{ В}.$$

ЗАДАНИЕ № 2

1. Для асинхронного двигателя с фазным ротором с заданными величинами номинальной мощности P_H , номинальной скорости вращения n_H , кратностью критического момента $\lambda = M_K/M_H$ и активного сопротивления ротора R_2 :

а) постройте естественные механическую и электромеханическую характеристики;

б) постройте реостатные механическую и электромеханическую характеристики при дополнительном сопротивлении в цепи ротора $R_d = k_1 R_2$.

2. Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ($U_{1H} = 380$ В, $f_{1H} = 50$ Гц) и с заданными величинами номинальной мощности P_H , номинальной скорости вращения n_H , кратностью критического момента $\lambda = M_K/M_H$:

а) постройте естественную механическую характеристику;

б) постройте искусственную механическую характеристику при частотном регулировании так, чтобы она проходила через точку с заданными значениями координат ($M_T = k_2 M_H$ и $s_{TH} = k_3$);

в) определите частоту f_{1H} и величину питающего напряжения U_{1H} , которое должны быть на статоре при этом.

Исходные данные к заданию (по вариантам) приведены в табл. 2.1.

Таблица 2

Вариант	P_H , кВт	n_H , об/мин	R_2 , Ом	$\lambda = M_K/M_H$	k_1	k_2	k_3
1	2	3	4	5	6	7	8
1	120	579	0,02	2,7	0,9	0,3	0,5
2	40	725	0,07	2,8	1,1	0,4	0,6
3	140	584	0,02	2,5	1,1	0,5	0,7
4	100	584	0,02	2,8	0,9	0,6	0,3
5	120	584	0,02	2,5	1,1	0,7	0,4
6	18	955	0,2	2,7	0,8	0,3	0,5
7	80	735	0,04	2,8	0,8	0,4	0,6
8	170	577	0,02	2,6	0,8	0,5	0,7
9	50	720	0,05	2,9	0,62	0,6	0,3
10	60	725	0,03	2,9	0,6	0,7	0,4
11	110	567	0,03	2,8	1,1	0,3	0,5
12	8	940	0,31	2,5	0,5	0,4	0,6

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
13	40	720	0,04	2,9	0,6	0,5	0,7
14	65	725	0,03	2,9	0,6	0,6	0,3
15	105	567	0,03	2,8	1,1	0,7	0,4
16	12	940	0,3	2,5	0,6	0,3	0,5
17	20	1 400	0,09	2,3	0,9	0,4	0,6
18	7	1 400	0,18	2,8	0,66	0,5	0,7
19	70	725	0,03	2,9	0,8	0,6	0,3
20	160	587	0,02	2,8	0,6	0,7	0,4
21	50	725	0,06	2,9	0,62	0,3	0,5
22	30	720	0,08	2,8	0,65	0,4	0,6
23	135	577	0,02	2,8	0,62	0,5	0,7
24	3,5	910	0,77	2,3	0,8	0,6	0,3
25	185	577	0,02	2,6	0,84	0,7	0,4
26	5	940	0,24	2,5	0,5	0,3	0,5
27	18	955	0,28	2,3	0,7	0,4	0,6
28	125	568	0,03	2,9	1,2	0,5	0,7
29	35	940	0,05	2,5	0,8	0,6	0,3
30	16	955	0,1	2,7	0,62	0,7	0,4
31	20	579	0,09	2,8	0,9	0,3	0,5
32	7	730	0,18	2,5	0,66	0,4	0,6
33	70	584	0,03	2,8	0,8	0,5	0,7
34	160	584	0,02	2,5	0,6	0,6	0,3
35	50	584	0,06	2,7	0,62	0,7	0,4
36	30	955	0,08	2,8	0,65	0,3	0,5
37	135	735	0,02	2,6	0,62	0,4	0,6
38	3,5	577	0,77	2,9	0,8	0,5	0,7
39	185	720	0,02	2,9	0,84	0,6	0,3
40	5	725	0,24	2,8	0,5	0,7	0,4
41	10	567	0,18	2,5	0,7	0,3	0,5
42	125	940	0,03	2,9	1,2	0,4	0,6
43	35	720	0,05	2,9	0,8	0,5	0,7
44	16	725	0,1	2,8	0,62	0,6	0,3

1	2	3	4	5	6	7	8
45	120	567	0,02	2,5	0,9	0,7	0,4
46	40	940	0,07	2,8	1,1	0,3	0,5
47	140	1400	0,02	2,3	1,1	0,4	0,6
48	100	1400	0,02	2,8	0,9	0,5	0,7
49	120	725	0,02	2,9	1,1	0,6	0,3
50	18	587	0,2	2,8	0,8	0,7	0,4
51	80	725	0,04	2,9	0,8	0,3	0,5
52	170	720	0,02	2,8	0,8	0,4	0,6
53	50	577	0,05	2,8	0,62	0,5	0,7
54	60	910	0,03	2,3	0,6	0,6	0,3
55	110	577	0,03	2,6	1,1	0,7	0,4
56	8	940	0,31	2,5	0,5	0,3	0,5
57	40	945	0,04	2,3	0,6	0,4	0,6
58	65	568	0,03	2,9	0,6	0,5	0,7
59	105	940	0,03	2,5	1,1	0,6	0,3
60	12	955	0,3	2,7	0,6	0,7	0,4

Краткие теоретические сведения

Асинхронные электродвигатели (АД) наиболее распространены среди электродвигателей. Причиной этого является простота конструкции, надежность и дешевизна этих электродвигателей относительно других.

Существует два типа АД:

1) АД с короткозамкнутым ротором (АД с КЗР) или, как их еще называют, АД с «беличьим колесом»;

2) АД с фазным ротором (АД с ФР), другое название – АД с контактными кольцами.

АД с КЗР – наиболее простой тип двигателей в сравнении с АД с ФР. Последние, несмотря на высокую стоимость и сложность конструкции (в отличие от АД с КЗР), имеют ряд преимуществ, которые более подробно будут рассмотрены ниже.

Асинхронный двигатель именно так и называется, потому что скорости вращения поля статора ω_0 и ротора ω не равны. Разница этих скоростей характеризуется скольжением s :

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (4)$$

Таким образом, скольжение показывает разницу скорости поля и скорости ротора в долях скорости поля. Например, если номинальное скольжение АД составляет 0,04, то это означает, что при номинальной нагрузке скорость ротора на 4 % меньше скорости поля.

Механическая характеристика АД

Механическая характеристика АД строится в прямоугольной системе координат, где в первом случае по оси абсцисс откладывается скольжение s , а по оси ординат – момент двигателя M (рис. 11, а). При другом варианте построения механической характеристики по оси абсцисс откладывается момент двигателя M , а по оси ординат – угловая скорость двигателя ω (рис. 11, б). Иногда при втором варианте по оси ординат откладывается скольжение s , но в обратном порядке, т. е. возрастание скольжения происходит вниз по оси ординат (рис. 11, б).

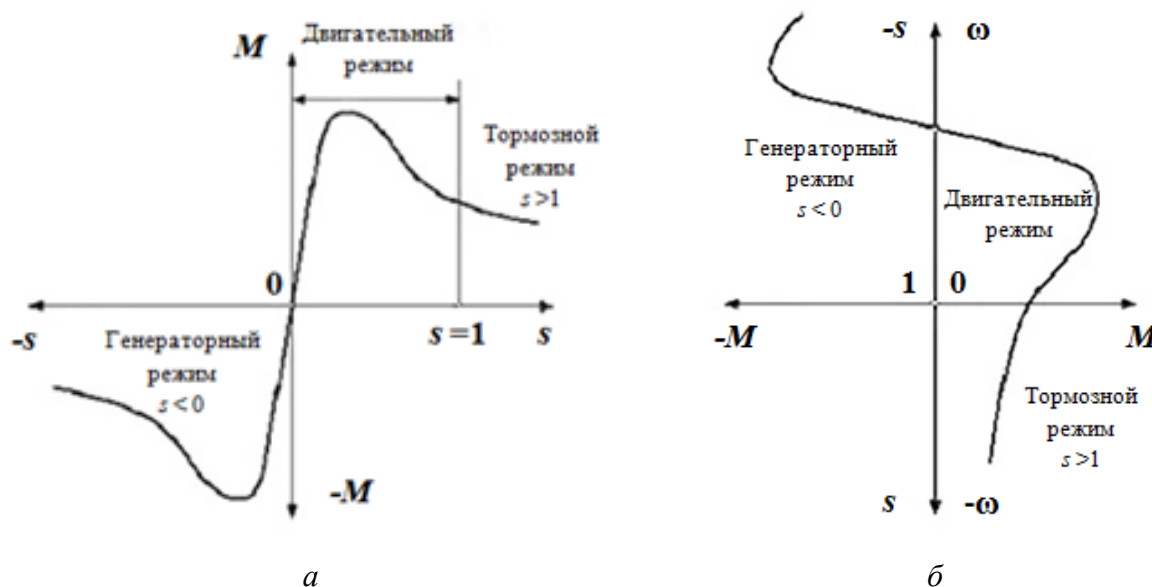


Рис. 11. Механические характеристики АД в координатах « $s - M$ » (а) и « $M - \omega$ » (б)

Характеристики АД (механическая и электромеханическая) называются *естественными*, если выполняются следующие условия:

- 1) $U_1 = U_{1н}$;
- 2) $f_1 = f_{1н}$;
- 3) $R_d = 0$ (только для АД с ФР).

Первые два условия выполняются автоматически, если АД напрямую запитан от электрической сети, на которую рассчитан. Третье условие является обязательным только для АД с ФР, потому что для АД с КЗР

оно выполняется автоматически, так как обмотка ротора такого АД не выводится наружу и подключить к ней внешнее добавочное сопротивление R_d невозможно. При нарушении указанных условий характеристики АД называются искусственными и используются для регулирования скорости АД.

Рассмотрим подробнее *естественную механическую характеристику АД*, выполненную в координатах « $M - \omega$ », с указанными на ней характерными точками (рис. 12, а). Точка 1 – точка идеального холостого хода (ИХХ), когда двигатель развивает нулевой момент, т. е. нагрузка двигателя полностью отсутствует. Реальный холостой ход несколько отличается от ИХХ, так как даже ненагруженный рабочим органом АД должен развивать небольшой момент на преодоление трения в подшипниках и трения ротора о воздух, а также самовентиляцию (если он выполнен с самовентиляцией). Точка 2 соответствует режиму номинальной нагрузки. Длительно АД может работать с нагрузкой от нуля до номинального M_n , т. е. на участке 1-2. При этом токи статора и ротора АД не превышают номинальные величины и двигатель не перегревается. Точка 3 – точка критического момента, т. е. максимального момента M_k , который может развить АД. Если нагрузка превысит величину M_k , то двигатель остановится. На участке 2-3, для которого характерно превышение номинальной величины нагрузки M_n , АД может работать лишь кратковременно, так как при этом токи ротора и статора превышают номинальные величины, и если не снизить нагрузку до номинальной величины M_n , то АД выйдет из строя вследствие перегрева. Точка 4 – точка, при которой скорость ротора равно нулю, т. е. точка, с которой происходит пуск АД. Двигатель при этом развивает пусковой момент M_p .

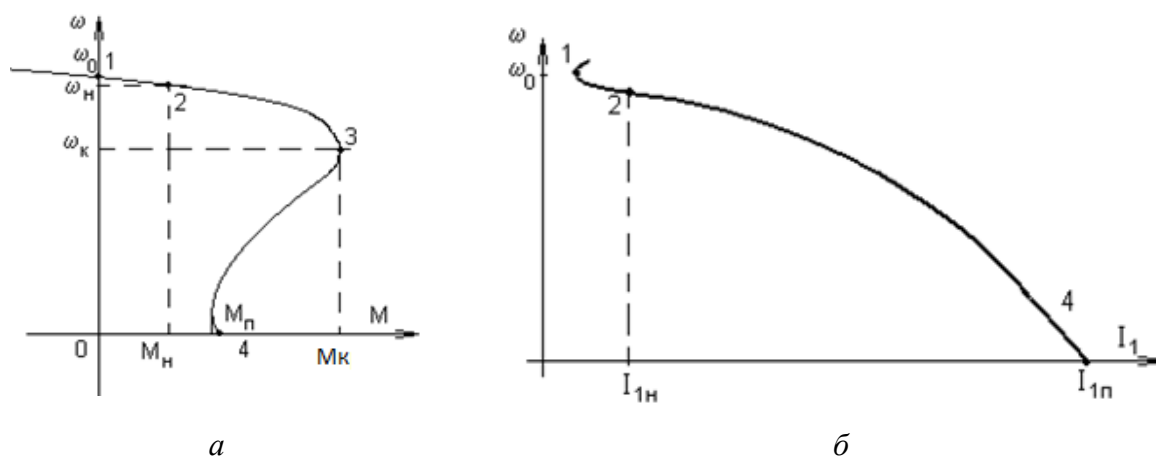


Рис. 12. Механическая (а) и электромеханическая (б) естественные характеристики АД

Естественная электрохимическая характеристика АД (рис. 12, б) представляет собой взаимосвязь между током статора I_1 и угловой скоростью ω . Иногда электрохимическую характеристику АД рассматривают как взаимосвязь между током ротора I_2 и угловой скоростью ω . Из рис. 12, б видно, что пусковой ток статора (равно как и ротора) в 5...8 раз превышает номинальный ток. Поэтому пуск двигателя подключением «напрямую» к питающей электрической сети является достаточно тяжелым режимом для АД, при котором он интенсивно греется.

Разберем возможные способы регулирования скорости АД.

Реостатное регулирование

Регулирование скорости АД с ФР путем добавления R_d в цепь ротора называется реостатным регулированием. Дополнительные возможности управлять скоростью АД появляются, если ротор выполнен фазным, а не короткозамкнутым (т.е. его обмотка состоит из катушек, похожих на статорные, соединенных между собой и выведенных на кольца, по которым скользят щетки, связанные с внешними устройствами). Схематически трехфазная машина с ФР показана на рис. 13, а. Фазный ротор обеспечивает дополнительный канал, по которому можно воздействовать на двигатель, — в этом его очевидное достоинство, но очевидна и плата за него: существенное усложнение конструкции, большая стоимость, наличие скользящих контактов. Именно эти негативные особенности привели к тому, что в общем объеме производства асинхронные двигатели с фазным ротором составляют небольшую долю.

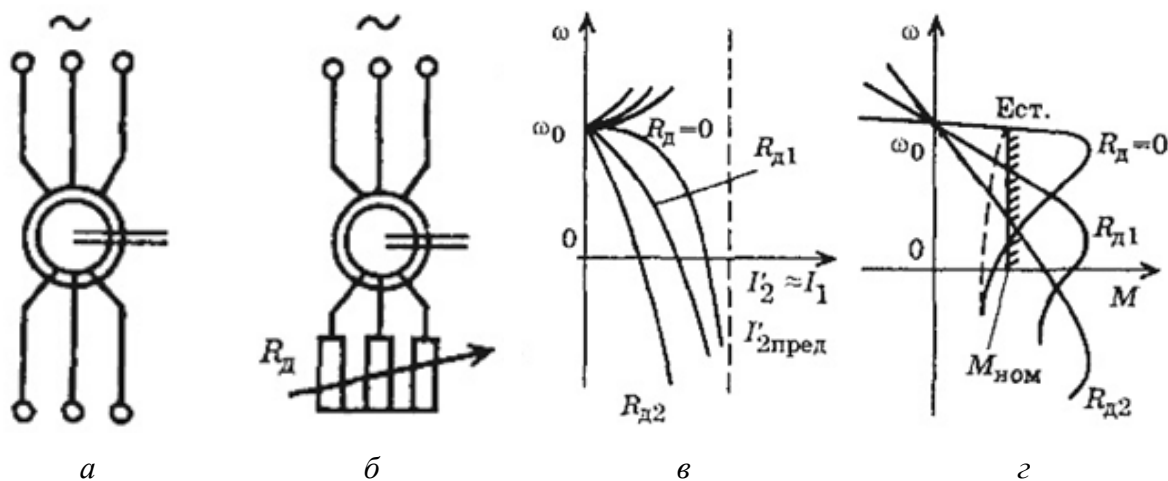


Рис. 13. АД с ФР (а), схема (б) и характеристики (в, г) реостатного регулирования

Как и в электроприводе постоянного тока это простейший способ регулирования: в каждую фазу ротора включают одинаковые резисторы с сопротивлением R_d (рис. 13, б). Преимущества и недостатки реостатного регулирования скорости АД с ФР практически те же, что у электропривода постоянного тока.

Преимуществами данного способа регулирования являются простота и невысокие капитальные затраты на дополнительный резистор и коммутационную аппаратуру.

Недостатки также очевидны:

- 1) невысокий диапазон (2...3):1 и однозонность регулирования – скорость можно только снизить;
- 2) снижение жесткости механической характеристики и, как следствие, снижение стабильности угловой скорости;
- 3) дополнительные электрические потери мощности в добавочном резисторе $I^2 R_d$.

Частотное регулирование скорости АД

АД с КЗР – самые распространенные электрические машины, которые в прошлом использовались лишь в нерегулируемом электроприводе, поскольку практически единственная возможность эффективно регулировать скорость – изменять частоту напряжения, приложенного к статорным обмоткам, была технически трудно реализуема. В настоящее время благодаря техническому прогрессу появились доступные преобразователи частоты (ПЧ) и частотно-регулируемый электропривод (рис. 14, а) – основной тип регулируемого электропривода.

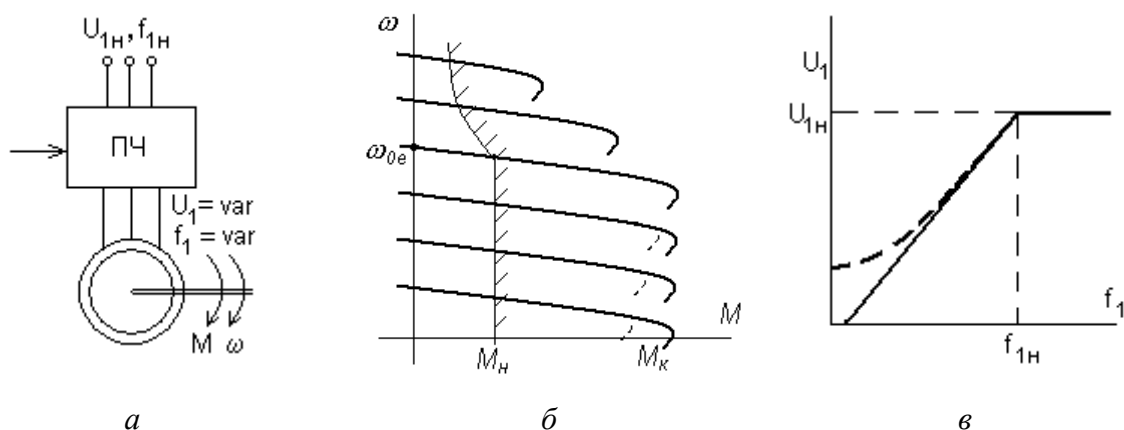


Рис. 14. Схема частотно-регулируемого электропривода (а), его механические характеристики (б), зависимость напряжения от частоты (в)

Скорость ИХХ ω_0 пропорциональна частоте f_1 и не зависит от каких-либо других величин. При уменьшении f_1 следует изменять напряжение на статорной обмотке U_1 так, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = \text{const.} \quad (5)$$

При частотном регулировании скорости с уменьшением частоты f_1 критический момент M_k не изменяется (сплошная линия на рис. 14, б). Уменьшение критического момента M_k (показано на рис. 14, б пунктирной линией) наблюдается при строгом соблюдении выполнения условия (5). Особенно заметно это уменьшение критического момента M_k происходит у машин малой мощности (единицы кВт). Для компенсации этого влияния, как правило, необходимо увеличить напряжение при низких частотах (пунктирная линия на рис. 14, в).

При увеличении частоты f_1 выше номинальной $f_{1н}$ величина напряжения на обмотке статора поддерживается номинальной $U_1 = U_{1н}$. Обусловлено это тем, что при напряжении выше номинального произойдёт пробой изоляции обмотки. При этом критический момент M_k будет уменьшаться, как показано на рис. 2.4, б.

Достоинства данного способа регулирования:

- 1) регулирование двухзонное – вниз ($U_1/f_1 \approx \text{const}$) и вверх ($U_1 = U_{1н}$, $f_1 > f_{1н}$) от основной скорости;
- 2) широкий диапазон регулирования: 10:1 – в разомкнутых системах, 1000:1 – в замкнутых системах;
- 3) регулирование плавное;
- 4) жесткость характеристик высокая, поэтому стабильность ω высокая;
- 5) допустимый момент нагрузки при уменьшении скорости не изменяется по сравнению с естественной характеристикой $M_{доп} = M_n$, а при увеличении скорости остается неизменной мощность $P = P_n$;
- 6) КПД электропривода практически не изменяется (объясняется отсутствием дополнительных резисторов в цепи статора), в то время как КПД самого преобразователя частоты ПЧ высокий (0,97...0,98). Следовательно, способ экономичен в эксплуатации из-за отсутствия дополнительных элементов, рассеивающих энергию;
- 7) гибкость управления скоростью в замкнутых структурах – основное преимущество.

Недостатком данного способа регулирования являются достаточно высокая стоимость ПЧ и необходимость использования специальных типов АД, адаптированных для работы в составе частотно-регулируемого электропривода.

Параметрическое регулирование

Регулирование скорости АД путем изменения величины напряжения на обмотке статора U_1 без изменения частоты f_1 – параметрическое регулирование. Схема включения в замкнутом режиме и механические характеристики АД показаны на рис. 15, где в качестве источника питания выступает регулируемый источник переменного напряжения – преобразователь напряжения ПН.

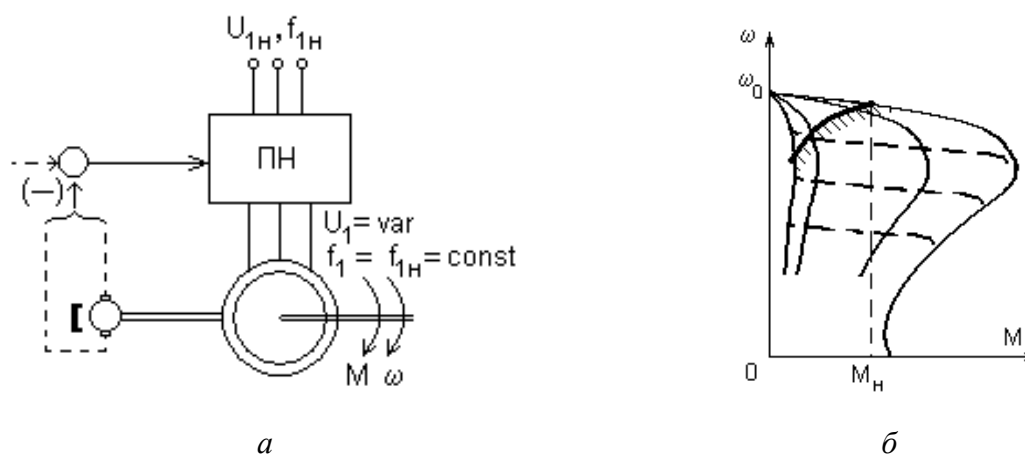


Рис. 15. Схема (а) и механические характеристики (б) АД с параметрическим регулированием

Критический момент при таком регулировании будет снижаться пропорционально U_1^2 , критическое скольжение останется неизменным (сплошные линии на рис. 15, б). В замкнутой по скорости структуре (пунктирная линия на рис. 15, а) можно получить характеристики, показанные на рис. 15, б пунктиром. Иначе говоря, данный способ регулирования внешне выглядит весьма привлекательно.

Достоинства параметрического регулирования:

- 1) диапазон регулирования в замкнутой структуре (3...4):1;
- 2) стабильность скорости удовлетворительная;
- 3) высокая плавность регулирования.

Основным недостатком является то, что допустимая нагрузка резко снижается с уменьшением скорости. Если не уменьшить нагрузку двигателя, то произойдет перегрев ротора, что приведет к исчезновению воздушного зазора между ротором и статором и, как следствие, двигатель «заклинит».

Таким образом, очевидна неэффективность использования данного способа регулирования в продолжительном режиме. Даже для самой благоприятной нагрузки – вентиляторной – необходимо двух-трехкратное завышение установленной мощности двигателя с повышенным скольжением и интенсивный внешний обдув.

Способ регулирования скорости изменением напряжения может в ряде случаев использоваться для кратковременного снижения скорости, а система «ПН – АД» очень полезна и эффективна для снижения пусковых токов. ПН, используемые для снижения пусковых токов АД называются устройствами плавного пуска (УПП) или «софт-стартерами».

Кроме изложенных способов регулирования скорости АД для этой цели иногда используются специальные АД с КЗР с переключением обмоток статора, изменяющим число пар полюсов, т. е. ступенчато регулирующие ω_0 . Такие двигатели называются многоскоростными, но они тяжелы, дороги, а привод требует дополнительной переключающей аппаратуры и в связи с этим они проигрывают современному частотно-регулируемому электроприводу.

Пример 2. Решить задачу № 1 при следующих исходных данных:

$$P_H = 10 \text{ кВт}; n_H = 945 \text{ об./мин}; R_2 = 0,18 \text{ Ом};$$

$$\lambda = M_K / M_H = 2,3; R_d = k_1 R_2 = 0,7 R_2.$$

Схема включения АД с ФР приведена на рис. 16.

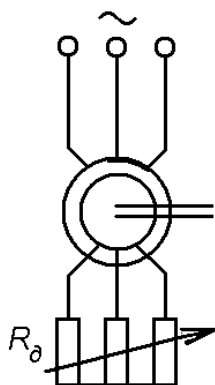


Рис. 16. Схема включения АД с ФР

Решение. 1. Строим естественные характеристики.
Номинальная угловая скорость:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,142 \cdot 945}{30} = 99 \text{ рад/с.}$$

Номинальный электромагнитный момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{10\,000}{99} = 101 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для определения угловой скорости идеального холостого хода ω_0 сначала установим значение скорости вращения n_0 (в об./мин), как большее ближайшее к номинальному n_H из ряда: 3 000, 1 500, 1 000, 750, 600 и т. д.

Так как $n_H = 945$ об./мин, то $n_0 = 1\,000$ об./мин.

Угловая скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,142 \cdot 1\,000}{30} = 104,7 \text{ рад/с}.$$

Номинальное скольжение естественной характеристики:

$$s_{H.e} = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1\,000 - 945}{1\,000} = 0,055.$$

С учетом того, что кратность критического момента

$$\lambda = M_K / M_H = 2,3,$$

получаем

$$M_K = \lambda M_H = 2,3 \cdot 101 = 232,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критическое скольжение естественной характеристики:

$$s_{K.e} = s_{H.e} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,055 \cdot \left(2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,24.$$

Значения электромагнитного момента M при разных скольжениях s (от 0 до 1) находим из упрощенного уравнения механической характеристики (формула Клосса):

$$M = \frac{2M_K}{s/s_{K.e} + s_{K.e}/s} = \frac{2 \cdot 232,3}{s/0,24 + 0,24/s}.$$

Результаты расчетов заносим в табл. 3.

Таблица 3

s	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
M	0	164,9	228,5	226,6	205,0	181,2	160,2	142,5	127,9	115,7	105,4

Переходим к построению естественной механической характеристики, представляющей собой взаимосвязь электромагнитного момента АД M и скольжения s (кривая А, рис. 17). При этом необходимо учесть, что при критическом скольжении $s = s_{к.е} = 0,24$ значение момента максимально и равно $M_{к} = 232,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

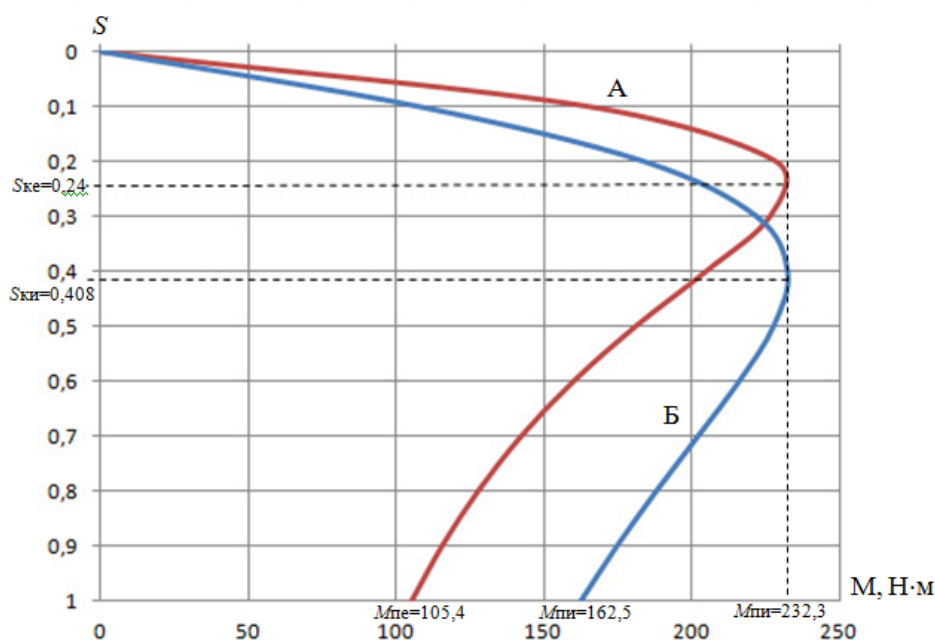


Рис. 17. Естественная (кривая А) и реостатная (кривая Б) механические характеристики АД с ФР

Электромеханическая характеристика АД – это зависимость тока статора от скольжения s . Но иногда для упрощения электромеханическую характеристику строят как зависимость тока ротора I_2 от скольжения s . Поступим таким же образом.

Для построения естественной электромеханической характеристики используем формулу:

$$I_2 = \sqrt{\frac{M\omega_0 s}{3R_2}} = \sqrt{\frac{104,7Ms}{3 \cdot 0,18}} = \sqrt{193,9Ms},$$

где значения s (от 0 до 1) и момента M возьмем из табл. 3.

Полученные результаты представляем в виде табл. 4.

Таблица 4

s	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I ₂	0	56,5	94,1	114,8	126,1	132,5	136,5	139,1	140,9	142,1	143,0

Переходим к построению естественной электромеханической характеристики (кривая А, рис. 18).

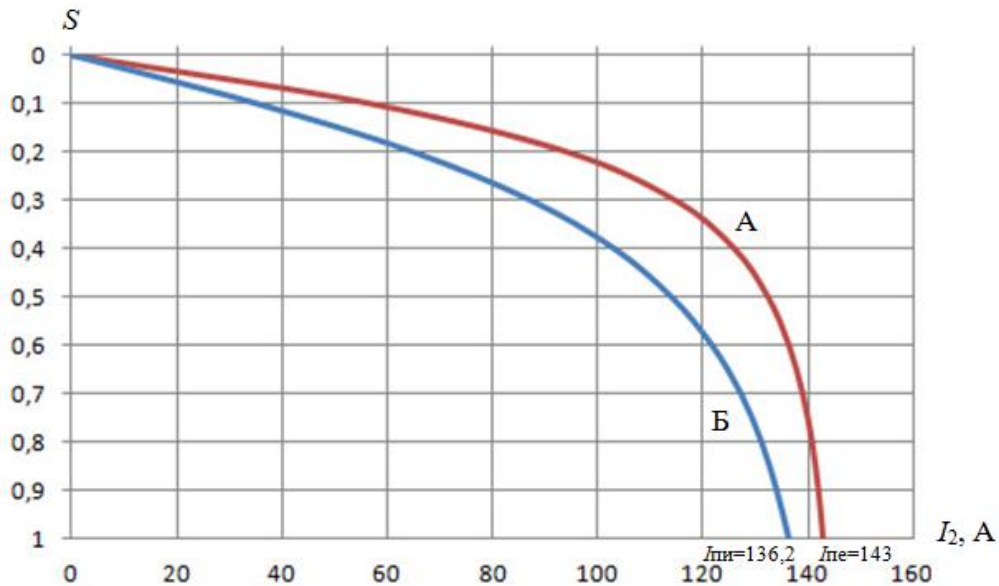


Рис. 18. Естественная (кривая А) и реостатная (кривая Б) электромеханические характеристики АД с ФР

2. Строим реостатные характеристики.

Величина дополнительного сопротивления:

$$R_{\text{д}} = k_1 R_2 = 0,7 \cdot 0,18 = 0,126 \text{ Ом.}$$

Критическое скольжение реостатной механической характеристики:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{к.с}} \frac{R_2 + R_{\text{д}}}{R_2} = 0,24 \cdot \frac{0,18 + 0,126}{0,18} = 0,408.$$

Используем формулу Клосса для нахождения значений электромагнитного момента M при разных скольжениях s :

$$M = \frac{2M_{\text{к}}}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s} = \frac{2 \cdot 232,3}{s/0,408 + 0,408/s}.$$

Ток I_2 для реостатной электромеханической характеристики:

$$I_2 = \sqrt{\frac{M\omega_0 s}{3(R_2 + R_d)}} = \sqrt{\frac{104,7 Ms}{3 \cdot (0,18 + 0,126)}} = \sqrt{114,1 Ms}.$$

Результаты вычислений M и I_2 для значений s от 0 до 1 заносим в табл. 5.

Таблица 5

s	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
M	0	107,4	183,6	221,7	232,3	227,6	216	202,1	188,0	174,7	162,5
I_2	0	35	64,7	87,1	103	113,9	121,6	127,1	131,0	133,9	136,2

По данным табл. 5 строим реостатные механическую (кривая Б, рис. 17) и электромеханическую (кривая В, рис. 18) характеристики.

Пример 3. Решить задачу № 2 при следующих значениях параметров:

$$P_H = 10 \text{ кВт}; n_H = 945 \text{ об./мин}; \lambda = M_K / M_H = 2,3;$$

$$M_T = k_2 M_H = 0,75 M_H; s_{Т.и} = k_3 = 0,5.$$

Схема включения АД с КЗР приведена на рис. 19.

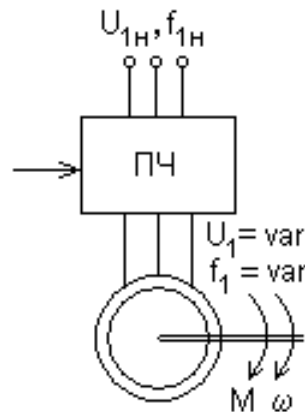


Рис. 19. Схема включения АД с КЗР

Решение. Поскольку значения номинальной мощности, номинальной скорости вращения и кратности критического момента АД с КЗР и АД с ФР идентичны, то их естественные механические характеристики будут одинаковые. Поэтому используем естественную механическую характеристику АД с ФР (см. пример 2) – кривая А, рис. 20.

При частотном регулировании скорости АД ниже естественной регулировочные характеристики проходят параллельно естественной. Определяем скольжение идеального холостого хода $s_{0и}$ и критическое скольжение $s_{к.и}$ этой регулировочной характеристики с учетом того, что она должна пройти через точку $(M_T; s_{т.и})$:

$$M_T = k_2 M_H = 0,75 \cdot 101 = 75,75 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{т.и} = k_3 = 0,5.$$

При определении скольжения идеального холостого хода $s_{0и}$ этой регулировочной характеристики считаем механические характеристики АД (естественную и регулировочную) линейными на участке от точки ИХХ до точки номинальной нагрузки M_H . Тогда на естественной характеристике скольжение $s_{т.е}$ при нагрузке M_T будет равно

$$s_{т.е} = s_{н.е} \frac{M_T}{M_H} = 0,055 \cdot \frac{75,75}{101} = 0,04.$$

Так как механические характеристики параллельны, то

$$s_{0и} = s_{т.и} - s_{т.е} = 0,5 - 0,04 = 0,46.$$

Критическое скольжение $s_{к.и}$ регулировочной характеристики:

$$s_{к.и} = s_{0и} + s_{к.е} = 0,46 + 0,24 = 0,7.$$

По рассчитанным значениям строим регулировочную механическую характеристику (кривая Б, рис. 20).

Находим частоту и величину питающего напряжения, которые должны быть на статоре при данном частотном регулировании, исходя из того, что скорость ИХХ на механической характеристике пропорциональна частоте питающего напряжения.

Скорость ИХХ на естественной характеристике:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,142 \cdot 1\,000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

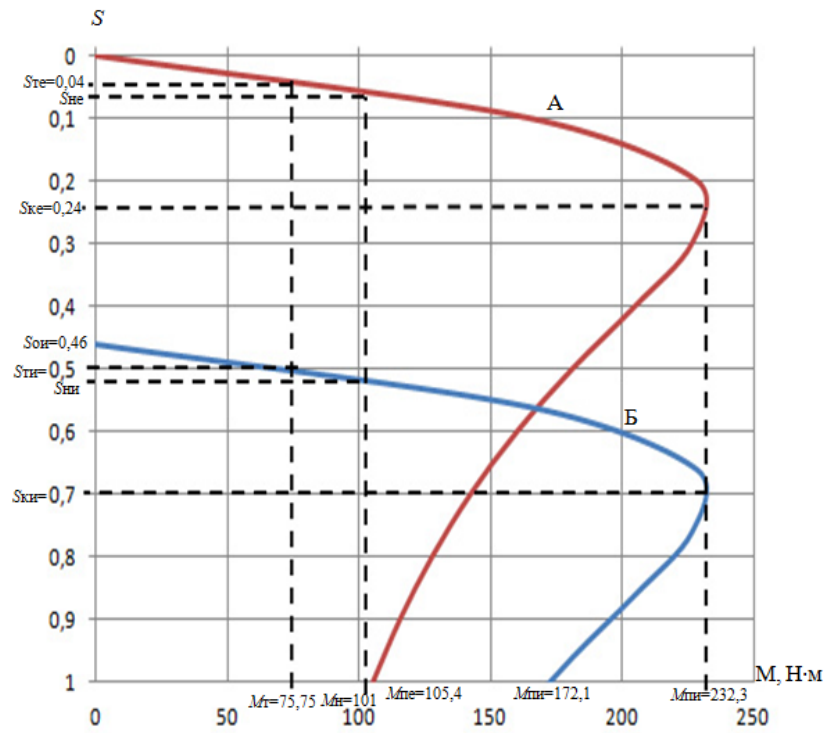


Рис. 20. Естественная (а) и искусственная при регулировании частоты (б) механические характеристики АД с КЗР

Скорость ИХХ $\omega_{0и}$, частота $f_{1и}$ и величина питающего напряжения $U_{1и}$ на регулировочной характеристике:

$$\omega_{0и} = \omega_0 (1 - s_{0и}) = 104,7 \cdot (1 - 0,46) = 56,54 \text{ рад/с};$$

$$f_{1и} = f_{1н} \frac{\omega_{0и}}{\omega_0} = 50 \cdot \frac{56,54}{104,7} = 27 \text{ Гц};$$

$$U_{1и} = U_{1н} \frac{\omega_{0и}}{\omega_0} = 380 \cdot \frac{56,54}{104,7} = 205,2 \text{ В}.$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитенко, Г. В. Электропривод производственных механизмов : учебное пособие / Г. В. Никитенко. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 224 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/211190> (дата обращения: 14.04.2025).
2. Фролов, Ю. М. Регулируемый асинхронный электропривод : учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 464 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/212645> (дата обращения: 14.04.2025).
3. Липай, Б. Р. Электромеханические системы : учебное пособие для вузов / Б. Р. Липай, А. Н. Соломин, П. А. Тыричев ; под редакцией С. И. Маслова. – 2-е изд., стер. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2021. – 351 с. – URL: <https://www.studentlibrary.ru/ru/book/ISBN9785383014455.html> (дата обращения: 14.04.2025). – Текст : электронный.

Образец титульного листа курсовой работы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

по дисциплине

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД И АВТОМАТИКА»

Выполнил _____

Ф.И.О. студента, № группы

Руководитель работы _____

Ф.И.О. руководителя

Казань

2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Правила оформления контрольной работы	4
Задание № 1	5
Задание № 2	21
Список рекомендуемой литературы	37
Приложение А	38

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД И АВТОМАТИКА

Учебно-методическое пособие

Составители: **Бутаков** Валерий Михайлович,
Киснеева Лейля Нургалиевна

Кафедра электротехнических комплексов и систем КГЭУ

Редактор *И. В. Краснова*
Технический редактор *И. В. Краснова*
Компьютерная верстка *И. В. Краснова*

Подписано в печать 21.04.2025.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,12.
Заказ № 581/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ.
420066, Казань, ул. Красносельская, 51