

Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

В. И. Волченков

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА
С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Методические указания и контрольные задания
по курсу «Электротехника и электроника»

Москва, 2007

Настоящие методические указания к домашнему заданию по курсу «Электротехника и электроника» соответствуют программе курса.

В указаниях изложен минимум теоретических сведений, необходимых для успешного освоения материала и проведения цикла расчетов по исследованию различных режимов работы двигателей постоянного тока.

Указания составлены таким образом, что часть ответов на контрольные вопросы должна быть подготовлена студентами самостоятельно в результате изучения конспектов лекций, учебников, учебных пособий, материалов, рассмотренных на семинарских занятиях, а часть - при выполнении данного домашнего задания.

Для студентов машиностроительных специальностей факультетов МТ, СМ, РК, Э, РКТ, АК.

Редактор : д.т.н., проф. Красовский А.Б.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение	4
1. Содержание домашнего контрольного задания	6
Таблица вариантов исходных данных	7
2. Расчет номинальных данных и построение естественной механической характеристики $n(M)$	9
3. Расчет искусственных механических характеристик $n(M)$ при различных способах регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока	12
3.1. Расчет характеристики $n(M)$ при уменьшении напряжения источника питания в цепи якоря	12
3.2. Расчет характеристики $n(M)$ при введении добавочного сопротивления $R_{я\cdot доб}$ в цепь якоря	14
3.3. Расчет характеристики $n(M)$ при изменении потока возбуждения	17
4. Расчет искусственных механических характеристик $n(M)$ при различных способах электрического торможения ДПТ ...	20
4.1. Генераторное торможение	20
4.2. Динамическое торможение	23
4.3. Торможение противовключением	27
4.3.1. Торможение противовключением с использованием $R_{я\cdot доб}$	27
4.3.2. Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря	29
5. Расчет семейства пусковых реостатных характеристик ДПТ	32
6. Расчет рабочих характеристик ДПТ	36
7. Контрольные вопросы	41
8. Литература	42

Введение.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) широко используются в электроприводе . Они обладают рядом особенностей по сравнению с другими электрическими машинами . При выполнении данной домашней контрольной работы студенты знакомятся, практически, со всеми основными вопросами, связанными с анализом работы двигателей постоянного тока. Студенты рассчитывают естественную механическую характеристику, рассматривают пуск, торможение и регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока (ДПТ).

Полный объем домашнего задания (ДЗ) по расчету основных характеристик ДПТ включает следующие вопросы:

1. Расчет естественной механической характеристики $n(M)$ и электромеханической характеристики $n(I_a)$.
2. Расчет искусственных механических характеристик $n(M)$ ДПТ при различных способах регулирования n :
 - при изменении напряжения источника питания U ;
 - при введении в цепь ротора ДПТ добавочного сопротивления $R_{я\,доб}$;
 - при изменении потока возбуждения Φ .
3. Расчет искусственных механических характеристик $n(M)$ ДПТ при различных способах электрического торможения :
 - при генераторном торможении ;
 - при динамическом торможении ;
 - при торможении противовключением .
4. Расчет семейства пусковых механических характеристик $n(M)$, обеспечивающих пуск ДПТ при трехступенчатом разгоне .
5. Расчет рабочих характеристик ДПТ .

Исходные данные вариантов домашнего задания приведены в таблицах 1.1 и 1.2. Методика расчета всех пунктов домашнего задания рассмотрена ниже.

По усмотрению преподавателя для отдельных специальностей могут выполняться не все пункты задания.

Выбор студентом номера варианта исходных данных осуществляется по порядковому номеру, под которым студент числится в журнале у старосты группы.

Требования к оформлению отчета.

Отчет по выполненной расчетно-графической работе должен содержать :

1. Титульный лист (см. стр.31.).
2. Текст домашнего задания с приведением всех исходных данных рассматриваемого варианта.
3. Последовательное выполнение всех пунктов задания с приведением расчетных формул и подставляемых в них числовых значений. (Формула – подставляемые числа – ответ с единицами измерения).
4. При выполнении каждого пункта задания необходимо приводить краткие пояснения о сути выполняемых действий.
5. После выполнения расчетов по каждому пункту задания приводятся расчетные данные и строятся требуемые по заданию графики.
6. Графики должны быть построены аккуратно, в крупном масштабе, с помощью чертежных инструментов или с использованием ПЭВМ.
7. В конце каждого пункта задания необходимо сделать выводы по результатам проведенных расчетов.
8. Домашнее задание должно быть выполнено и представлено на проверку преподавателю в указанные сроки.

1. Содержание домашнего контрольного задания.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ ПО ТЕМЕ «Двигатели постоянного тока с параллельным возбуждением »

- Для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением (см. табл. 1.1, 1.2.) выполнить следующие расчеты и построения :
1. Нарисовать электрическую схему включения двигателя постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением.
 2. Рассчитать и построить на одном графике естественные механическую $n(M)$ и электромеханическую $n(I_a)$ характеристики. Определить частоту вращения n_D при заданном моменте сопротивления $M_D = M_H \cdot t$ на валу двигателя.
 3. Рассчитать и построить на одном графике естественную и искусственные характеристики $n(M)$ при различных способах регулирования частоты вращения n двигателя постоянного тока. Определить для каждого случая частоту вращения n_D при заданном моменте сопротивления $M_D = M_H \cdot t$ на валу двигателя :
 - а) при регулировании изменением напряжения сети ($U' = U \cdot q_1$);
 - б) при реостатном регулировании ($R_{я\,добр} = R_{я} \cdot q_2$);
 - в) при изменении потока возбуждения ($\Phi' = \Phi \cdot q_1$).
 4. Рассчитать и построить на одном графике естественную и искусственные характеристики $n(M)$ при различных способах торможения ДПТ :
 - а) при генераторном торможении, начиная с режима
 $n_T = n_H \cdot h_1$ и $M_T = M_H \cdot t$.
 - б) при динамическом торможении, начиная с режима
 $n_T = n_D$ и $M_T = M_H \cdot t$;
 - в) при торможении противовключением, начиная с режима :
 $n_T = n_H \cdot h_2$ и $M_T = M_H \cdot t$ при реостатном торможении ;
 $n_T = n_D$ и $M_T = M_H \cdot t$ при торможении с изменением полярности напряжения на обмотке якоря.
 5. Рассчитать и построить на одном графике естественную и семейство реостатных пусковых характеристик $n(M)$, обеспечивающих трехступенчатый пуск двигателя постоянного тока до выхода его в рабочий режим (при $M_D = M_H \cdot t$).
 6. Рассчитать и построить на одном графике рабочие характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением $n, I_a, M, P_1, \text{кпд} = f(P_2)$ при работе двигателя на естественной характеристике $n(M)$.

Таблица вариантов исходных данных.

Таблица 1.1.

Вар.	P_Н Вт	U_Н В	n_Н об/мин	КПД %	R_я Ом	R_{доп. п.} Ом	R_{возб} Ом	Данные из табл.1.2
1	370	110	1500	0,66	2,10	1,297	192	а
2	370	220	1500	0,675	7,74	5,17	720	б
3	600	110	1500	0,72	1,083	0,659	153	в
4	600	220	1600	0,725	4,38	2,62	595	г
5	750	110	1500	0,70	0,563	0,565	84,3	д
6	750	220	1500	0,71	2,48	2,13	303	е
7	630	110	1000	0,685	0,74	0,74	80	ж
8	630	220	1600	0,685	3,13	3,336	303	з
9	1000	110	1600	0,74	0,378	0,378	80	и
10	1000	220	1500	0,75	1,66	1,45	303	а
11	1600	110	1600	0,71	0,346	0,224	54,5	б
12	1600	220	1000	0,705	1,38	1,00	202	в
13	2400	110	1600	0,765	0,185	0,148	54,5	г
14	2400	220	1600	0,77	0,74	0,486	202	д
15	1900	110	1600	0,76	0,269	0,22	50	е
16	1900	220	1600	0,765	1,08	0,915	216	ж
17	3200	110	1600	0,82	0,12	0,089	50	з
18	3200	220	1600	0,825	0,518	0,323	216	и
19	3500	110	1000	0,805	0,145	0,101	46,4	а
20	2500	220	1000	0,80	0,59	0,43	177	б
21	4200	110	1500	0,835	0,081	0,056	46,4	в
22	4200	220	1500	0,845	0,326	0,208	177	г
23	3200	110	1600	0,82	0,096	0,073	49,4	д
24	3200	220	1600	0,825	0,385	0,364	181	е
25	5300	110	1500	0,855	0,216	0,175	49,4	ж
26	5300	220	1500	0,865	0,833	0,60	181	з
27	4500	110	1000	0,825	0,084	0,056	49,2	и
28	4500	220	1000	0,835	0,338	0,221	177	а
29	7100	110	1500	0,86	0,038	0,025	49,2	б
30	7100	220	1500	0,865	0,15	0,092	177	в
31	5600	110	1000	0,835	0,065	0,04	34,0	г
32	5600	220	1000	0,84	0,26	0,183	131	д
33	8500	110	1600	0,865	0,025	0,018	34,7	е
34	8500	220	1000	0,875	0,125	0,08	137	ж
35	11000	220	1500	0,885	0,083	0,053	42,0	з

Таблица 1.2.

Вариант	а	б	в	г	д	е	ж	з	и
t	0,6	0,8	0,5	0,7	0,9	0,8	0,4	0,3	0,7
q1	0,8	0,85	0,7	0,75	0,9	0,85	0,6	0,55	0,8
q2	3,5	2	4	2,5	2	3	5	6	3
h1	1,3	1,25	1,2	1,15	1,1	1,05	1,5	1,4	1,35
h2	0,8	0,5	0,6	0,4	0,3	0,25	0,7	0,35	0,45

2. Расчет номинальных данных и построение естественной механической характеристики $n(M)$.

Рассмотрим основные теоретические положения, необходимые для успешного выполнения данного домашнего задания.

В качестве исходных данных в таблицах 1.1 и 1.2 приводятся взятые из справочника следующие величины :

U_H – номинальное напряжение двигателя, В ;

P_H – номинальная мощность двигателя, кВт ;

n_H – номинальная частота вращения ротора, об/мин ;

η_H – к.п.д., коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке, % ;

R_a – сопротивление обмотки якоря, Ом ;

$R_{dop\ pol}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом ;

$R_{возб}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом .

Полезной мощностью P_2 двигателя постоянного тока является механическая мощность, которая определяется через механические параметры так

$$P_2 = M \cdot \Omega = M \cdot (2\pi / 60) \cdot n = 0.105 \cdot M \cdot n .$$

Используя номинальные данные P_{2H} и n_H , вычисляем номинальный врачающий момент двигателя

$$M_H = 9.55 \cdot P_{2H} / n_H .$$

Здесь P_{2H} – в [Вт], n_H – в [об/мин], M_H – в [Н·м].

Номинальная электрическая мощность, потребляемая из сети двигателем

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H .$$

Номинальный ток двигателя $I_H = P_{1H} / U_H$.

Номинальный ток возбуждения $I_{BH} = U_H / R_{возб}$.

Номинальный ток обмотки якоря $I_{яH} = I_H - I_{BH} = P_{1H} / U_H - U_H / R_{возб}$.

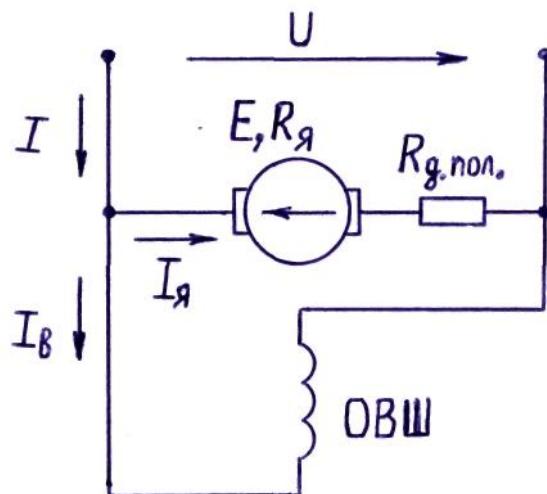


Рис.2.1.

Уравнение электрического состояния силовой цепи двигателя (см. рис.2.1.)

$$U = E + Iя \cdot (Rя + R_{\text{доп пол}}),$$

где $E = C_E \Phi \cdot n$.

Уравнение электромеханической характеристики $n(Iя)$

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) - Iя \cdot (Rя + R_{\text{доп пол}}) / (C_E \cdot \Phi) = n_0 - \Delta n.$$

Учитывая, что $M = C_M \cdot \Phi \cdot Iя$, получаем уравнение механической характеристики $n(M)$

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) - M \cdot (Rя + R_{\text{доп пол}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n.$$

Полученные выражения для характеристик $n(Iя)$ и $n(M)$ имеют линейный характер при допущении, что магнитная цепь двигателя не насыщена.

При проведении расчетов часто требуется знать постоянные коэффициенты $C_E \cdot \Phi$ и $C_M \cdot \Phi$. Определяем их из номинального режима:

$$C_E \cdot \Phi = E_n / n_n \text{ и } C_M \cdot \Phi = M_n / I_{яn}.$$

Для построения естественной механической характеристики $n(M)$ и электромеханической характеристики $n(Iя)$ необходимо знать координаты двух точек :

- $n = n_0$ при $M = 0$ и $Iя = 0$ (режим холостого хода, Х.Х.);
- $n = n_n$ при $M = M_n$ и $Iя = I_{яn}$ (номинальный режим).

Частота вращения в режиме холостого хода равна $n_0 = U / (C_E \cdot \Phi)$.

Далее на одном графике в общей системе координат строим обе зависимости $n(M)$ и $n(Iя)$ (см. рис.2.2.).

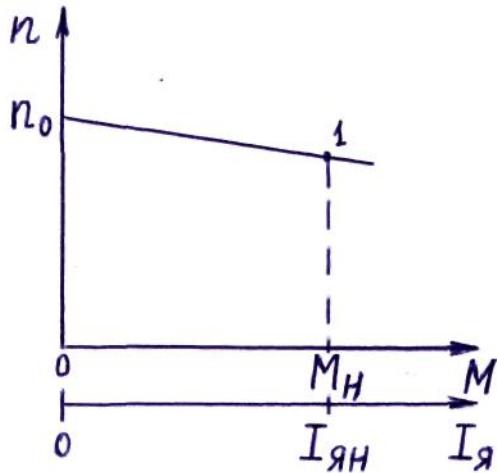


Рис.2.2.

По заданию требуется определить частоту вращения ДПТ, соответствующую заданному моменту нагрузки на валу двигателя $M_D = M_H \cdot t$. Воспользуемся уравнением

$$n_D = U/(C_E \cdot \Phi) - M_D \cdot (R_{я} + R_{доп\,пол})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

3. Расчет искусственных механических характеристик $n(M)$ при различных способах регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока.

3.1. Расчет характеристики $n(M)$ при уменьшении напряжения источника питания в цепи якоря .

Влияние U на вид характеристики $n(M)$.

Выражения для электромеханической характеристики $n(I_я)$ и механической характеристики $n(M)$ имеют вид

$$n = U/(C_E \cdot \Phi) - I_я \cdot (R_{я} + R_{доп\,пол})/(C_E \cdot \Phi) = n_0 - \Delta n,$$

$$n = U/(C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_{я} + R_{доп\,пол})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n.$$

Как следует из приведенных выражений , при уменьшении напряжения на якорной обмотке U и неизменном магнитном потоке ($\Phi=\text{const}$) n_0 уменьшается пропорционально U , а Δn остается неизменным при одинаковых значениях момента M . Значит наклон характеристики $n(M)$ не меняется.

При уменьшении напряжения ($U' = U \cdot q_1$), приложенного к обмотке якоря, получаем искусственную характеристику $n'(M)$, смещенную вниз относительно естественной характеристики $n(M)$ (см. рис.3.1.).

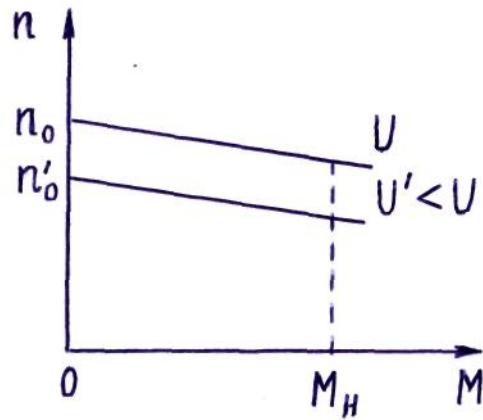


Рис.3.1.

Расчет искусственной характеристики $n'(M)$ (при $U' = U \cdot q_1$).

Для построения искусственной характеристики $n'(M)$ в силу ее линейности достаточно рассчитать координаты двух точек, например:

- для режима холостого хода :

$$M = 0 ; \quad n'_0 = U' / (C_E \cdot \Phi) = U \cdot q_1 / (C_E \cdot \Phi) = n_0 \cdot q_1 ;$$

- при номинальной нагрузке :

$$M = M_H ; \quad n'_H = U' / (C_E \cdot \Phi) - M_H \cdot (R_A + R_{\text{доп пол}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

На общем графике строим естественную $n(M)$ и искусственную $n'(M)$ характеристики (см. рис.3.1.).

Коэффициент регулирования k_D при заданном M_D .

Вычисляем коэффициент регулирования k_D частоты вращения n при изменении напряжения источника питания $U' = U \cdot q_1$ и при моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot t$:

$$k_D = n_D' / n_D .$$

Здесь n_D – частота вращения, соответствующая моменту M_D , при работе ДПТ на естественной характеристике $n(M)$. n_D уже вычислили раньше при рассмотрении естественной характеристики (см. стр. 9.).

n_D' - частота вращения, соответствующая моменту M_D , при работе ДПТ на искусственной характеристике $n'(M)$ при том же моменте нагрузки M_D и при пониженном напряжении $U'_D = U_D \cdot q_1$.

Далее необходимо отметить преимущества и недостатки данного метода регулирования n и сделать выводы о целесообразности его применения .

3.2. Расчет характеристики $n(M)$ при введении добавочного сопротивления R_A доб в цепь якоря.

Влияние R_A доб на вид характеристики $n(M)$.

Электрическая схема, соответствующая реостатному регулированию n ДПТ, приведена на рис.3.2.

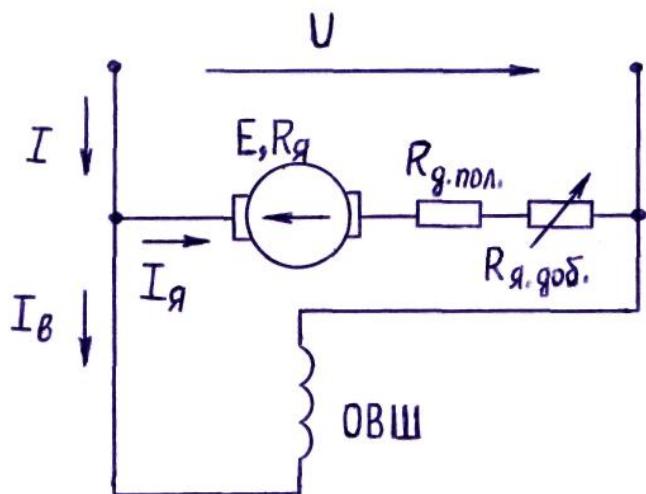


Рис.3.2.

Уравнение механической характеристики $n'(M)$ при использовании реостатного регулирования выглядит следующим образом
 $n' = U/(C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_я + R_{\text{доп пол}} + R_{я \text{ доб}})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n$.

При введении $R_{я \text{ доб}}$ возрастает Δn и увеличивается наклон характеристики $n(M)$. При этом $n_0 = U/(C_E \cdot \Phi)$ не меняется, значит естественная и реостатная характеристики $n(M)$ выходят из одной точки (режим Х.Х., $M = 0$, см. рис.3.3.).

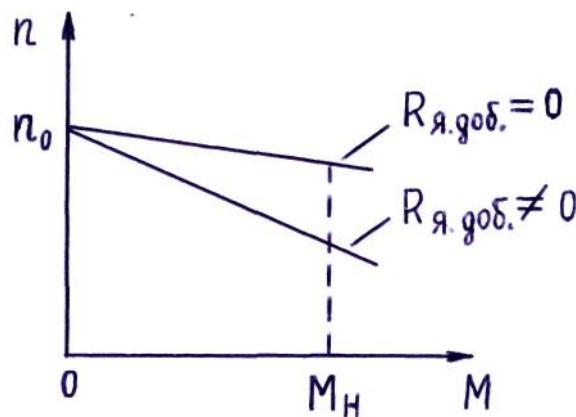


Рис.3.3.

Расчет реостатной характеристики $n'(M)$.

Для построения реостатной характеристики $n'(M)$ необходимо знать координаты двух точек :

- режим холостого хода - $n_0 = U/(C_E \cdot \Phi)$ при $M = 0$;

- номинальный режим - при $M = M_H$

$$n'_H = U/(C_E \cdot \Phi) - M_H \cdot (R_я + R_{\text{доп пол}} + R_{я \text{ доб}})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

На общем графике строим естественную $n(M)$ и искусственную $n'(M)$ характеристики (см. рис.3.3.).

Коэффициент регулирования k_D при заданном M_D .

Определим изменение частоты вращения ДПТ при регулировании n с помощью $R_{я\text{доб}}$ при моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot t$.

Значение n_D' , соответствующее работе ДПТ на естественной характеристики и моменту нагрузки $M_D = M_H \cdot t$, определено раньше (см. стр. 9.).

Вычислим частоту вращения n_D' при работе ДПТ на искусственной реостатной характеристике с добавочным сопротивлением в цепи якоря $R_{я\text{доб}} = R_{я} \cdot q_2$.

При моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot t$ определяем

$$n_D' = U/(C_E \cdot \Phi) - M_D \cdot (R_{я} + R_{\text{доп пол}} + R_{я\text{доб}})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Коэффициент регулирования частоты вращения k_D составляет

$$k_D = n_D'/n_D.$$

Далее необходимо отметить преимущества и недостатки данного метода регулирования n и сделать выводы о целесообразности его применения.

3.3. Расчет характеристики $n(M)$ при уменьшении потока возбуждения.

Влияния потока возбуждения Φ на вид характеристики $n(M)$.

На рис.3.4 приведена электрическая схема, соответствующая регулированию частоты вращения n двигателя постоянного тока при уменьшении магнитного потока возбуждения ($\Phi' = \Phi \cdot q_1$).

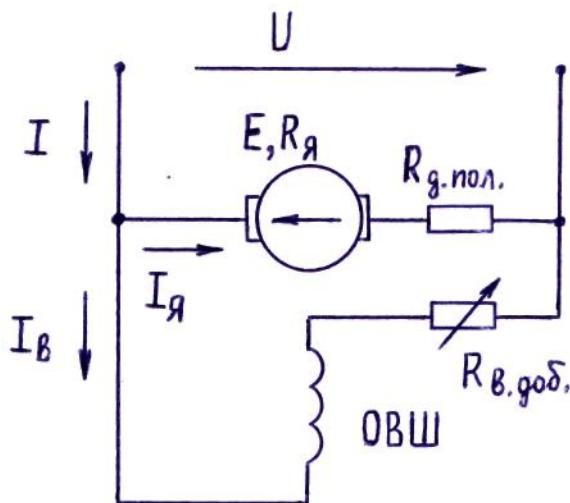


Рис.3.4.

При введении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения $R_{в\text{доб}}$ уменьшается ток возбуждения I_B , уменьшается магнитный поток ($\Phi' < \Phi$), создаваемый обмоткой возбуждения.

В соответствии с уравнением механической характеристики

$$n' = U/(C_E \cdot \Phi') - M \cdot (R_{я} + R_{\text{доп пол}})/(C_E \cdot C_M \cdot (\Phi')^2) = n'_0 - \Delta n'$$

с уменьшением магнитного потока Φ частота вращения n двигателя на рабочем участке характеристики $n(M)$ возрастает (см. рис.3.5.). При этом по сравнению с естественной характеристикой у искусственной меняются и n_0 и Δn .

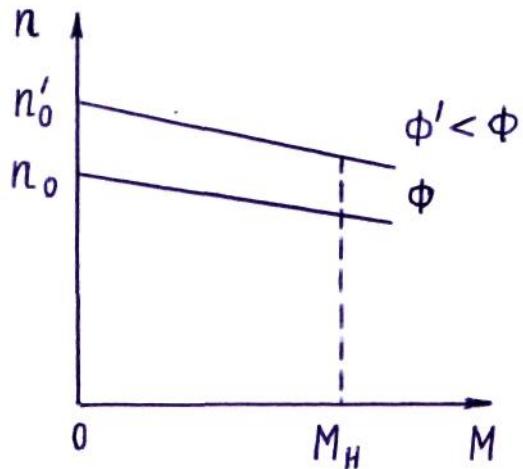


Рис.3.5.

Для построения искусственной характеристики $n'(M)$ при $\Phi' = \Phi \cdot q_1$ необходимо определить координаты двух точек :

а) режим Х.Х.: $n_0' = U/(C_E \cdot \Phi')$ при $M = 0$;

б) при номинальной нагрузке : $M = M_H$

$$n' = U/(C_E \cdot \Phi') - M_H \cdot (R_a + R_{\text{доп пол}})/(C_E \cdot C_M \cdot (\Phi')^2) = n_0' - \Delta n' .$$

Коэффициент регулирования k_D при заданном M_D .

Определим изменение частоты вращения ДПТ при регулировании n уменьшением потока возбуждения ($\Phi' = \Phi \cdot q_1$).

Значение частоты вращения ротора ДПТ на естественной характеристике n_D при заданном моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot t$ уже определили раньше (см. стр. 9.).

Значение частоты вращения n_D' ДПТ при работе на искусственной характеристике при уменьшении потока возбуждения ($\Phi' = \Phi \cdot q_1$) и моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot t$ определяется как

$$n_D' = U/(C_E \cdot \Phi') - M_D \cdot (R_a + R_{\text{доп пол}})/(C_E \cdot C_M \cdot (\Phi')^2) .$$

Коэффициент регулирования частоты вращения n равен

$$k_D = n_D' / n_D .$$

Далее необходимо указать преимущества и недостатки рассмотренного метода регулирования и сделать выводы о целесообразности его применения .

Затем следует провести сопоставление трех рассмотренных методов регулирования n .

4. Расчет искусственных механических характеристик $n(M)$ при различных способах торможения ДПТ .

Далее рассматриваются три основных способа электрического торможения ДПТ :

- генераторное торможение;
- динамическое торможение;
- торможение противовключением.

4.1. Генераторное торможение .

Условие перехода ДПТ в режим генераторного торможения.

Электрическая схема двигателя постоянного тока приведена на рис.4.1.

Направление тока I_a на схеме соответствует работе машины в режиме двигателя ($E \uparrow \downarrow I_a ; P < 0$) , электрическая энергия потребляется из сети.

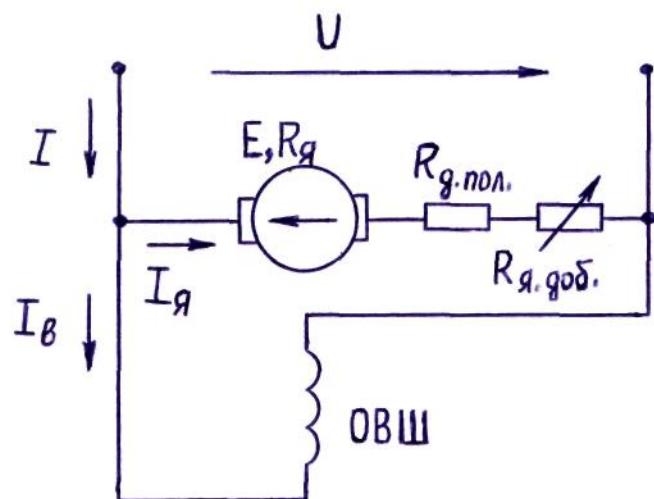


Рис.4.1.

На графике механической характеристики $n(M)$ (см. рис.4.2.) этому соответствует точка 1 , в которой $n < n_0$ и $E < U$. Здесь n_0 – частота вращения ротора ДПТ в режиме холостого хода ($M_C = 0$).

Уравнение механической характеристики $n(M)$

$$n = U/(C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_{я} + R_{доп\,поп})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n .$$

Здесь $M = C_M \Phi \cdot I_a$ – момент, развиваемый двигателем ;

$$I_a = (U - E)/R_{я}$$

$E = C_E \Phi \cdot n$ – э.д.с. в обмотке якоря .

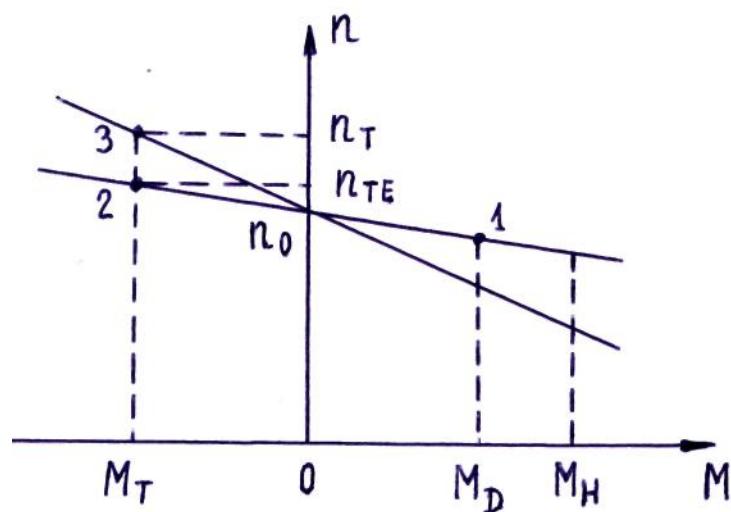


Рис.4.2.

Режим генераторного (рекуперативного) торможения наступает , когда частота вращения ротора n оказывается больше частоты вращения ротора в режиме холостого хода n_0 (см. рис.4.2, точка 2).

При $n > n_0$ $E > U$ и ток якоря I_a становится отрицательным, т.е. меняет направление. Ток якоря и э.д.с. оказываются направленными в одну сторону ($E \uparrow \uparrow I_a, P > 0$) , машина постоянного тока работает в режиме генератора , электрическая энергия отдается в сеть.

Рабочая точка машины постоянного тока находится во втором квадранте (точ. 2, рис.4.2.).

Так как ток якоря I_a поменял направление и стал отрицательным, соответственно меняет направление и момент, тоже становится отрицательным, т.е. тормозит вращение ротора ($M = M_T < 0$).

По условию задания требуется рассчитать тормозную реостатную характеристику, соответствующую генераторному торможению и обеспечивающую при заданном моменте торможения M_T частоту вращения n_T (точ. 3.).

Решение этой задачи проводим в два этапа.

На первом этапе определяем частоту вращения n_{TE} при работе ДПТ на естественной характеристике ($R_{ядоб} = 0$) и при заданном тормозном моменте M_T

$$n_{TE} = U/(C_E \cdot \Phi) + M_T \cdot (R_a + R_{доп\,пол})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2)$$

На втором этапе определяем величину добавочного сопротивления $R_{ядоб}$, вводимого в цепь якоря и обеспечивающего прохождение реостатной характеристики $n'(M)$ через точку 3 с координатами M_T и n_T ($M_T = M_{H \cdot t}$, $n_T = n_H \cdot h_1$). Воспользуемся выражением

$$n_T = U/(C_E \cdot \Phi) + M_T \cdot (R_a + R_{доп\,пол} + R_{ядоб})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2)$$

Задавая числовые значения M_T и n_T , определяем $R_{ядоб}$.

Затем необходимо рассчитать и построить на одном графике естественную $n_{TE}(M)$ и реостатную $n_T(M)$ механические характеристики , соответствующие генераторному торможению (см. рис.4.2.).

На построенных характеристиках $n(M)$ показываем расчетные точки, соответствующие тормозному моменту M_T .

Далее необходимо указать преимущества и недостатки рассмотренного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения .

4.2. Динамическое торможение .

Описание процесса торможения.

При выполнении динамического торможения ДПТ цепь якоря двигателя отключается от сети постоянного напряжения и замыкается на реостат с сопротивлением $R_{добр}$ (см. рис.4.3.).

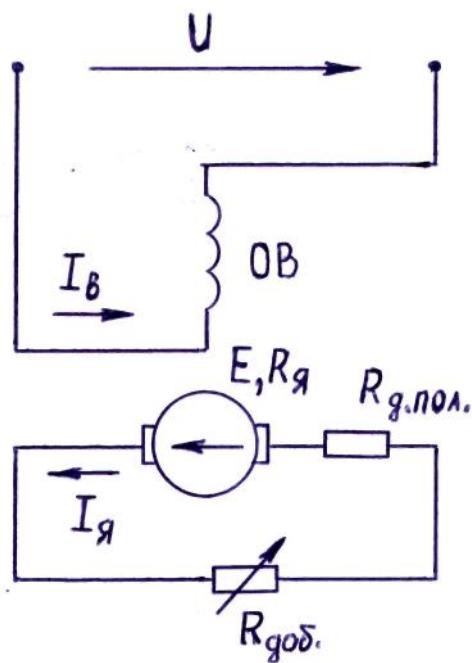


Рис.4.3.

Ротор по инерции продолжает вращаться , в обмотке якоря (на роторе) наводится э.д.с. Е. Так как напряжение внешнего источника на обмотке якоря отсутствует, ток в цепи определяется выражением

$$I_{\text{я}} = (-E)/(R_{\text{я}} + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{добр}}) < 0 .$$

Ток $I_{\text{я}}$ и момент $M = C_M \Phi \cdot I_{\text{я}}$ становятся отрицательными, момент действует против направления вращения ротора, т.е. становится тормозящим. Наклон характеристики динамического торможения определяется величиной суммарного сопротивления в цепи якоря $(R_{\text{я}} + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{добр}})$.

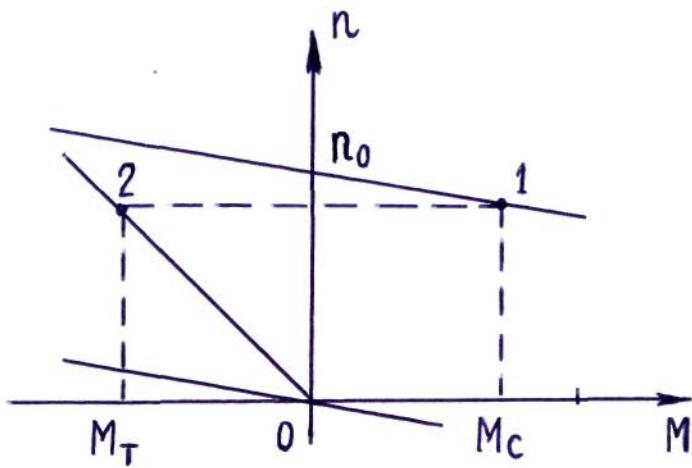


Рис.4.4.

На рис.4.4 точка 1 соответствует работе машины в двигательном режиме на естественной характеристике (первый квадрант). При выполнении динамического торможения рабочая точка ДПТ попадает в точку 2 на характеристике

динамического торможения (второй квадрант). Далее частота вращения n ДПТ начнет уменьшаться, рабочая точка будет двигаться по характеристике из точки 2 к точке 0. Этим способом возможно торможение ДПТ до $n = 0$.

Чтобы представить вид характеристики $n(M)$ двигателя постоянного тока при динамическом торможении (2 квадрант, рис. 4.4.) достаточно характеристику $n(M)$ при генераторном торможении, рассмотренную ранее (рис. 4.2.), сместить вниз на величину n_0 . Полученная характеристика будет проходить через начало координат графика $n(M)$.

Расчет характеристики $n(M)$ при динамическом торможении.

Требуется рассчитать и построить реостатную характеристику $n_T(M)$, соответствующую динамическому торможению и проходящую через точку с координатами M_T и n_T .

Расчет проводим в два этапа:

- расчет характеристики $n_{TE}(M)$ при $R_{DOB} = 0$;
- расчет реостатной характеристики $n_T(M)$ (при $R_{DOB} \neq 0$), проходящей через расчетную точку с заданными координатами M_T и n_T .

Расчет характеристики $n_T(M_T)$ при $R_{DOB} = 0$.

Первый этап - расчет характеристики при $R_{DOB} = 0$.

Уравнение механической характеристики $n_{TE}(M)$, соответствующее динамическому торможению (при $R_{DOB} = 0$), принимает вид

$$n_{TE} = M_T \cdot (R_a + R_{dop\ pol}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Полученное выражение соответствует прямой линии, проходящей через начало координат. Угол наклона ее к оси абсцисс равен углу наклона естественной характеристики $n(M)$ ДПТ.

При динамическом торможении ДПТ, работающего, например, в номинальном режиме ($n = n_h$) без добавочного сопротивления в цепи якоря ($R_{DOB} = 0$), возникнут ток якоря I_a и тормозной момент M_T многократно превышающие их номинальные значения.

$$\begin{aligned} I_{aT} &= -E / (R_a + R_{dop\ pol}) \gg I_{a\ nom}, \\ \text{и } M_T &= C_M \Phi \cdot I_{aT} \gg M_{nom}. \end{aligned}$$

Второй этап – расчет реостатной характеристики $n_T(M)$ при $R_{DOB} \neq 0$.

Чтобы избежать аварии ДПТ, в цепь якоря вводят ограничивающее сопротивление $R_{DOB} \neq 0$ (см. рис.4.3.). При этом получаем

$$\begin{aligned} I_{aT} &= -E / (R_a + R_{dop\ pol} + R_{DOB}) < 2 \cdot I_{a\ nom}; \\ n_T &= M_T \cdot (R_a + R_{dop\ pol} + R_{DOB}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2). \end{aligned}$$

Подставляя в полученное выражение $n_T(M_T)$ числовые значения координат заданной точки (n_T и M_T), через которую должна проходить реостатная характеристика, определяем величину соответствующего R_{DOB} .

На общем графике строим естественную характеристику $n(M)$, соответствующую работе машины в двигательном режиме, и две тормозных характеристики : $n_{TE}(M)$ при $R_{DOB} = 0$ и реостатную $n_T(M)$ (см. рис.4.4.). На них показываем частоты вращения, соответствующие заданному M_T .

Далее необходимо указать преимущества и недостатки рассмотренного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения .

Торможение противовключением .

Применяются две модификации торможения противовключением:

- а) с использованием реостатной характеристики $n(M)$;
- б) с изменением полярности напряжения в цепи якоря .

Торможение противовключением происходит, когда обмотки ДПТ включены для одного направления вращения, а якорь (ротор) под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположном направлении.

Торможение противовключением с использованием $R_{я\, доб.}$.

Описание процесса торможения.

Рассмотрим первый вариант торможения противовключением с использованием реостатной характеристики $n(M)$. Схема включения ДПТ приведена на рисунке 4.1.

Рассмотрим, как происходит процесс торможения с помощью графика (см. рис.4.5.).

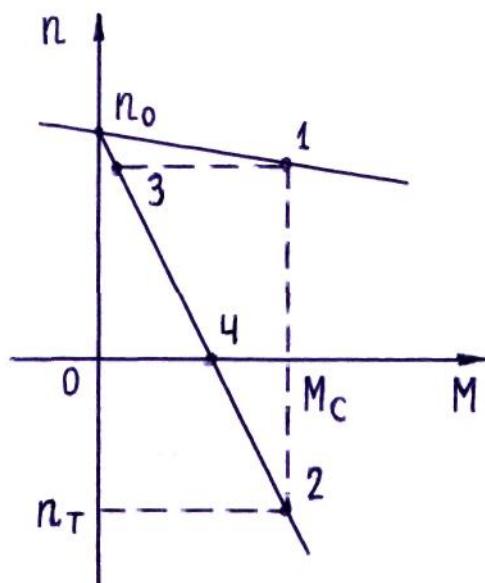


Рис.4.5.

Допустим лебедка поднимает груз, который создает на валу двигателя активный момент сопротивления M_C . Этому режиму на естественной характеристике $n(M)$ соответствует точка 1. Теперь потребовалось этот груз опустить. При этом момент сопротивления остается тем же и действует в том же направлении, а изменяются величина и направление частоты вращения ($n_T < 0$). На графике (рис.4.5.) этому соответствует на реостатной характеристике точка 2 с координатами $n = n_T$ и $M = M_C$. Для получения необходимой реостатной характеристики в цепь якоря вводим добавочное сопротивление $R_{я\, доб.}$, обеспечивающее необходимый наклон зависимости $n(M)$:

$$n = U/(C_E \cdot \Phi) + M \cdot (R_{я} + R_{доп\, пол} + R_{я\, доб})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Изменяя величину $R_{я\, доб.}$, можно влиять на скорость опускания груза.

Для выполнения торможения включаем в цепь якоря добавочное сопротивление $R_{Я\ доб}$ (см. рис.4.1.). В первый момент в силу инерции частота вращения ротора n остается неизменной, соответствующей точке 1, а двигатель уже начинает работать на реостатной характеристике в точке 3. Момент, создаваемый двигателем в точке 3, оказывается значительно меньше момента сопротивления M_C и двигатель начинает тормозиться, частота вращения n уменьшается, рабочая точка движется по реостатной характеристике вниз от точки 3 к точке 4.

Если требуется прекратить подъем груза, т.е. остановить двигатель, то необходимо в точке 4 отключить двигатель от сети.

Если ДПТ не отключать от сети, движение рабочей точки продолжится по реостатной характеристике вниз до точки 2 . В точке 2 врачающий момент двигателя M станет равным моменту сопротивления M_C , создаваемого грузом, двигатель будет вращаться с постоянной отрицательной скоростью $n = n_T < 0$, груз будет равномерно опускаться.

Работе ДПТ в режиме торможения противовключением с введением добавочного сопротивления $R_{Я\ доб}$ в цепь якоря соответствует уравнение

$$n_T = U/(C_E \cdot \Phi) + M_T \cdot (R_{Я\ доб} + R_{доп\ пол} + R_{Я\ доб})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Подставляя в уравнение числовые значения координат рассматриваемой точки 2 ($n_T < 0 ; M_T$), определяем величину $R_{Я\ доб}$, обеспечивающую необходимый наклон реостатной характеристики $n(M)$.

На одном графике для сопоставления строим две характеристики $n(M)$ при изменении момента в диапазоне от 0 до $1.5 \cdot M_H$ (см. рис.4.5.) :

- естественную характеристику $n(M)$ ДПТ (при $R_{Я\ доб} = 0$) ;
- реостатную тормозную характеристику $n_T(M)$ при $R_{Я\ доб} \neq 0$.

На построенных характеристиках $n(M)$ следует показать расчетные точки, соответствующие заданному тормозному моменту M_T .

Далее следует отметить преимущества и недостатки данного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения.

Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря.

Описание процесса торможения.

Второй вариант торможения противовключением заключается в изменении во время работы двигателя направления врачающего момента M на противоположное путем изменения полярности источника напряжения в цепи якоря.

По закону Ампера сила F , действующая на проводник с током I , вычисляется по формуле

$$\bar{F} = [\bar{I} \times \bar{B}] \cdot L .$$

Здесь \bar{B} – индукция магнитного поля ;

L – активная длина проводника с током I .

Как следует из формулы изменить направление действующей силы F на противоположное можно либо изменив направление тока I , либо изменив направление магнитного поля B .

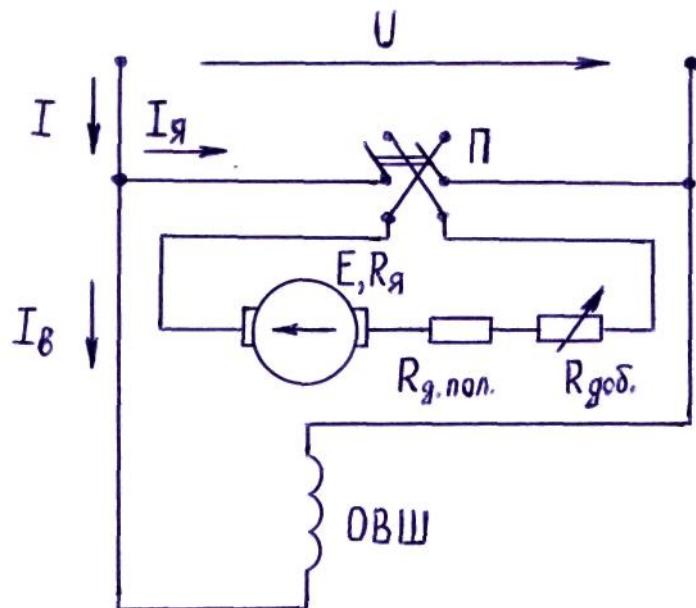


Рис.4.6.

На рис.4.6 приведена электрическая схема, позволяющая с помощью переключателя Π изменять полярность источника напряжения U в цепи якоря ДПТ. При этом в обмотке якоря изменяется направление тока $I_{\text{я}}$.

Предположим, первоначально двигатель работал на естественной характеристики $n(M)$ в первом квадранте в точке 1 (рис. 4.7.) ($R_{\text{я доб}} = 0$). Необходимо выполнить электрическое торможение ДПТ.

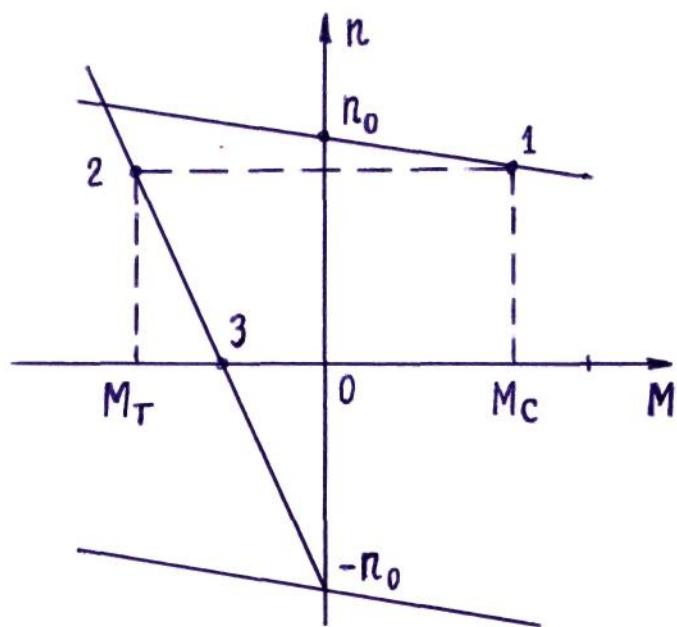


Рис.4.7.

С помощью переключателя Π (см. рис. 4.6.) меняем направление тока $I_{\text{я}}$ в обмотке якоря. При этом меняется на противоположное направление силы, действующей на обмотку якоря, и направление врачающего момента двигателя.

Этому соответствует нижняя ветвь механической характеристики $n(M)$ (см. рис.4.7.), проходящая через точку с координатами $n = -n_0$ и $M = 0$ и параллельная исходной естественной характеристике с точкой 1. Если при этом не принять дополнительных мер, произойдет большой бросок тока

$$I_a = (-U - E) / (R_a + R_{\text{доп пол}})$$

со всеми вытекающими последствиями.

Для ограничения тока I_a в цепь якоря вводят добавочное сопротивление R_a доб .

Вместе с током якоря ($I_a < 0$) меняет направление и врачающий момент $M = C_m \Phi \cdot I_a$ (точ.2, рис. 4.7.). Он становится тормозным ($M = M_t < 0$), т.к. теперь действует против направления вращения ротора двигателя. Подбором R_a доб можно регулировать величину I_a и, соответственно, тормозной момент M_t .

Рассмотрим с помощью механической характеристики $n(M)$ (рис.4.7.) как осуществляется процесс торможения.

Вначале двигатель работал в точке 1 с некоторой постоянной скоростью n . При изменении полярности напряжения U на обмотке якоря двигатель переходит в точку 2 на реостатной характеристике $n(M)$, соответствующей измененной полярности U .

Так как момент, развиваемый двигателем, становится тормозным , частота вращения ротора уменьшается, рабочая точка перемещается по реостатной характеристике из точки 2 к точке 3, при которой $n = 0$. Если в это время двигатель не отключить от сети, то ротор начнет разгоняться в противоположную сторону в соответствии с направлением действующего врачающего момента.

Рассмотрим, как рассчитать реостатную характеристику, соответствующую торможению противовключением рассматриваемым методом и проходящую через заданную точку с параметрами

$$M_t = (-M_h \cdot t) \quad \text{и} \quad n_t = n_d .$$

Уравнение механической характеристики $n(M)$, соответствующей работе ДПТ на реостатной характеристике при измененной полярности U в цепи якоря

$$n = -U / (C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_a + R_{\text{доп пол}} + R_a \text{ доб}) / (C_E \cdot C_m \cdot \Phi^2) .$$

Подставляя в уравнение числовые значения координат точки (n_t и M_t), через которую должна проходить реостатная характеристика, определяем величину добавочного сопротивления R_a доб .

На одном графике строим три характеристики $n(M)$ при изменении момента в диапазоне от $-1.5 \cdot M$ до $+1.5 \cdot M$ (см. рис.4.7) :

- естественную характеристику $n(M)$;
- тормозную характеристику $n_{TE}(M)$ ДПТ при $R_a \text{ доб} = 0$;
- реостатную тормозную характеристику $n_T(M)$ (при $R_a \text{ доб} \neq 0$).

На построенных характеристиках $n(M)$ следует показать расчетные точки, соответствующие тормозному моменту M_t .

Далее следует отметить преимущества и недостатки данного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения.

5. Расчет семейства пусковых реостатных характеристик ДПТ. Описание процесса пуска.

Рассмотрим процесс пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. При пуске ДПТ обычно используют пусковой реостат. Схема включения ДПТ приведена на рис. 5.1.

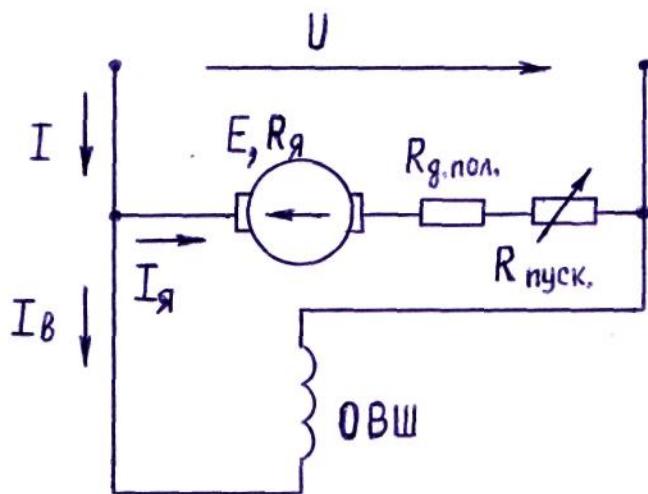


Рис.5.1.

При пуске двигатель переходит из режима покоя в режим работы на естественной характеристике $n(M)$. Ротор ДПТ приводит во вращение какой-либо рабочий механизм. При этом двигатель преодолевает момент сопротивления M_C , создаваемый рабочим механизмом, и динамический момент, идущий на преодоление инерции самого ротора и всех вращающихся частей рабочего механизма.

Этому соответствует следующее уравнение моментов, приведенных к валу АД

$$M = M_C + M_{дин} = M_C + J \frac{d\Omega}{dt} .$$

Здесь M - момент, развиваемый двигателем ;

M_C – статический момент сопротивления ;

$M_{дин} = J \frac{d\Omega}{dt}$ - динамический момент ;

J - суммарный момент инерции ротора ДПТ и вращающихся частей рабочего механизма , приведенный к валу двигателя;

Ω - угловая скорость вращения ротора;

$\frac{d\Omega}{dt}$ - угловое ускорение .

Если $M_{дин} > 0$, то $\frac{d\Omega}{dt} > 0$ - происходит разгон ДПТ .

При пуске стремятся обеспечить достаточно большой момент $M_{пуск}$.

Однако, при слишком большом пусковом моменте могут возникнуть недопустимо большие динамические толчки момента, которые приведут к механическим повреждениям двигателя.

Кроме этого в цепи якоря двигателя возникает большой пусковой ток $I_я$. В общем случае ток якоря выражается формулой

$$I_a = (U - E) / (R_a + R_{\text{доп пол}})$$

Непосредственное включение неподвижного двигателя в сеть ($n = 0, E = 0$) недопустимо, т.к. сопротивление цепи якоря ($R_a + R_{\text{доп пол}}$) мало и ток при этом достигнет значений в 10 – 20 раз превышающих номинальный ток .

Считается, что при токе якоря $I_a \geq 2.5 \cdot I_{a\text{ном}}$ возникает угроза появления кругового огня на коллекторе ДПТ. В реальных условиях стремятся обеспечить , чтобы пусковой ток якоря не превышал $(2 \div 2.2) \cdot I_{a\text{ном}}$. Ограничить ток якоря при пуске ($n = 0, E = 0$) можно, включив последовательно с обмоткой якоря пусковой реостат с соответствующим сопротивлением $R_{\text{пуск}}$ (см. рис.5.1.)

$$I_a = U / (R_a + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{пуск}})$$

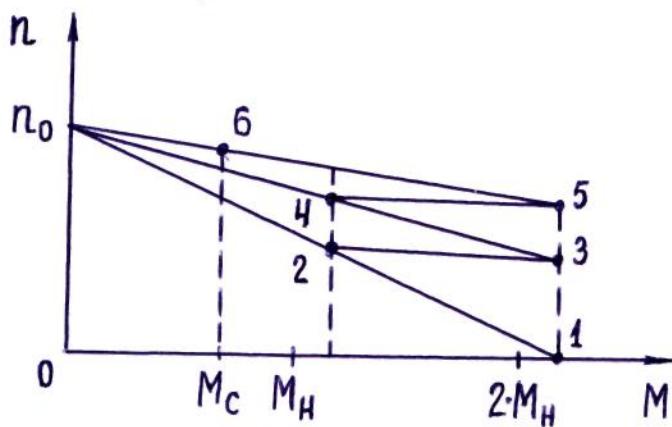


Рис.5.2.

Одновременно получим ограничение и пускового момента $M_{\text{пуск}}$ (точ. 1, рис.5.2.).

По мере увеличения частоты вращения ротора рабочая точка, характеризующая состояние ДПТ, движется по нижней реостатной характеристике от точ.1 к точ.2 , растет э.д.с. двигателя E , уменьшается ток I_a и момент M .

Одновременно уменьшается угловое ускорение $\frac{d\Omega}{dt}$. Для поддержания постоянства углового ускорения ротора уменьшают пусковое сопротивление $R_{\text{пуск}}$. При этом возрастает ток I_a и увеличивается момент M , определяющий угловое ускорение.

Пусковое сопротивление выполняется из нескольких секций, которые по мере разгона двигателя, по очереди выключаются. Двигатель каждый раз переходит на новую реостатную характеристику $n(M)$. В итоге при полностью выключенном пусковом сопротивлении ($R_{\text{пуск}} = 0$) двигатель продолжает работать уже на естественной характеристике $n(M)$.

Процесс пуска заканчивается, когда момент, развиваемый двигателем, становится равным моменту сопротивления, создаваемому рабочим механизмом ($M = M_C$), ротор двигателя вращается с постоянной скоростью ($n = \text{const}$), соответствующей точке 6 (см. рис.5.2.).

Чем больше ступеней имеет пусковое сопротивление, тем плавнее процесс пуска двигателя.

Последовательность расчета пусковых реостатных характеристик $n(M)$.

Рассмотрим этапы расчета и построения реостатных характеристик, обеспечивающих пуск ДПТ (рис.5.2.).

На общем графике в осях n и M покажем естественную характеристику $n(M)$ в диапазоне изменения момента $M = (0 \div 2.2) \cdot M_{ном}$. Она уже рассчитана раньше (п. 2.1.).

Нижняя реостатная характеристика соответствует наибольшей величине пускового сопротивления $R'_{пуск}$.

Уравнение соответствующей реостатной характеристики $n(M)$ выглядит

$$n = U/(C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_a + R_{доп\,пол} + R'_{пуск})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Принимаем, что наибольшее значение пускового момента равно $M_{пуск\,max} = 2.2 \cdot M_{ном}$. Подставляем числовые значения координат точки 1 (рис.5.2.) ($n = 0$; $M = 2.2 \cdot M_{ном}$) и определяем величину $R'_{пуск}$.

Вычисляем координаты точки 2, в которой происходит уменьшение пускового сопротивления от $R'_{пуск}$ до $R''_{пуск}$ и переход рабочей точки на вторую реостатную характеристику. При пуске стремятся, чтобы пусковой момент не выходил из диапазона $M_{пуск} = (1.1 \div 2.2) \cdot M_{ном}$.

Принимаем момент, при котором происходит переключение пускового реостата равным $M_{перекл} = 1.1 \cdot M_{ном}$. Определяем частоту вращения в точке 2. Для этого подставляем в приведенное выше уравнение реостатной характеристики числовые значения $R'_{пуск}$ и $M = 1.1 \cdot M_{ном}$ и вычисляем n_{p2} .

В точке 2 происходит уменьшение пускового сопротивления ($R''_{пуск} < R'_{пуск}$) при неизменной частоте вращения ротора ДПТ. Рабочая точка скачком переходит в точку 3 на второй реостатной характеристике, соответствующей пусковому сопротивлению $R''_{пуск}$. Момент, вырабатываемый двигателем, скачком возрастает до величины $M = 2.2 \cdot M_{ном}$. Подставим в уравнение реостатной характеристики $n(M)$ числовые значения n_{p2} и $M = 2.2 \cdot M_{ном}$ и вычислим $R''_{пуск}$, соответствующее второй реостатной характеристике $n(M)$. В точке 3 врачающий момент ДПТ больше момента сопротивления M_C и частота вращения n продолжает увеличиваться до точки 4.

Опять воспользуемся уравнением соответствующей реостатной характеристики. Подставим в него числовые значения $R''_{пуск}$ и $M_{перекл} = 1.1 \cdot M_{ном}$. Вычисляем значение n_{p4} , соответствующее точке 4. При достижении точки 4 происходит полное выключение пускового реостата и рабочая точка двигателя скачком переходит в точку 5 на естественной характеристике $n(M)$ ДПТ. Снова скачком увеличивается электромагнитный момент ДПТ, происходит дальнейшее возрастание частоты вращения n , рабочая точка уже движется по естественной характеристике от точки 5 вверх к точке 6.

При достижении точки 6 врачающий момент ДПТ становится равным моменту сопротивления ($M = M_C$) и разгон двигателя прекращается. В точке 6 ротор ДПТ вращается с постоянной скоростью – процесс пуска заканчивается.

На общем графике строим естественную и две реостатных характеристики $n(M)$ и на них показываем участки, по которым движется рабочая точка при пуске ДПТ. Номерами отмечаем точки перехода рабочей точки с одной характеристики на другую по аналогии, как показано на рис.5.2.

6. Расчет рабочих характеристик ДПТ.

Электрическая схема замещения ДПТ с параллельным возбуждением представлена на рис.2.1. Все параметры схемы замещения известны, заданы в исходных данных. Проведем расчет рабочих характеристик ДПТ. Результаты расчета запишем в таблицу 6.1 и представим их в виде графиков.

Рассмотрим последовательность расчета указанных величин при работе ДПТ на естественной характеристике $n(M)$. Определяем ток возбуждения $I_{\text{возб}} = U/R_{\text{возб}}$.

Задаем 7 значений тока якоря I_a в диапазоне от 0 до $1,5 \cdot I_{a\text{ном}}$. Далее проводим все расчеты для принятых 7 значений тока якоря I_a . Ток, потребляемый из сети

$$I = I_a + I_{\text{возб}}.$$

Вычисляем частоту вращения

$$n = U/(C_E \cdot \Phi) - I_a \cdot (R_a + R_{\text{доп пол}})/(C_E \cdot \Phi).$$

Здесь $C_E \cdot \Phi$ определяется по данным номинального режима

$$C_E \cdot \Phi = (U_H - I_{aH} \cdot (R_a + R_{\text{доп пол}})) / n_H.$$

Вычисляем значения момента

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_a,$$

Здесь $C_M \cdot \Phi = M_H / I_{aH}$, $M_H = 9.55 \cdot P_{2H} / n_H$.

Используемые единицы измерения: M – [Нм]; P_2 – [Вт]; n – [об/мин].

Затем определяем полезную P_2 и потребляемую P_1 мощности и к.п.д.:

$$P_2 = 0,105 \cdot M \cdot n; P_1 = U_H \cdot (I_a + I_B); \eta \% = 100 \cdot P_2 / P_1.$$

Результаты расчетов записываем в таблицу 6.1.

Таблица 6.1.

	1	2	3	4	5	6	7
I_a , А	0	$0,25 \cdot I_{aH}$	$0,5 \cdot I_{aH}$	$0,75 \cdot I_{aH}$	I_{aH}	$1,25 \cdot I_{aH}$	$1,5 \cdot I_{aH}$
I , А	0						
n , об/мин							
M , Нм	0						
P_2 , Вт	0						
P_1 , Вт							
КПД, %	0						

На общем графике в крупном масштабе строим расчетные зависимости I , n , M , P_1 , $\eta = f(P_2)$.

Для каждой физической величины строим отдельную ось с соответствующей шкалой и единицами измерения. Шкала указывается, начиная с нуля,

равномерная, без разрывов, с выбранным шагом (шаг рекомендуется выбирать – 1, либо 2, либо 5, умноженный на 10^n).

Примерный вид рабочих характеристик ДПТ показан на рис. 6.1.

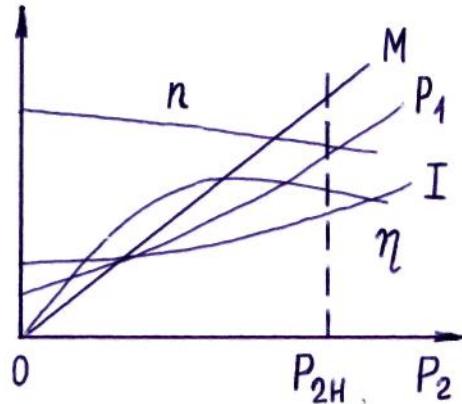


Рис. 6.1.

7. Контрольные вопросы.

1. Устройство двигателя постоянного тока (ДПТ).
2. Способы возбуждения магнитного поля в ДПТ.
3. Электрическая схема замещения ДПТ с параллельным возбуждением.
4. Механическая характеристика ДПТ с параллельным возбуждением.
Уравнение. График.
5. Способы регулирования частоты вращения n . Их сравнение.
6. Реостатное регулирование n . Электрическая схема. Уравнение. График.
7. Якорное регулирование n . Электрическая схема. Уравнение. График.
8. Полюсное регулирование n . Электрическая схема. Уравнение. График.
9. Как осуществить реверс ДПТ ? Закон Ампера.
10. Основные способы торможения ДПТ. Их сравнение.
11. Генераторное торможение. Электрическая схема. Уравнение.
Преимущества и недостатки метода.
12. Динамическое торможение. Электрическая схема. Уравнение.
Преимущества и недостатки метода.
13. Торможение противовключением с использованием $R_{\text{доб}}$. Электрическая схема. Уравнение. Преимущества и недостатки метода.
14. Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря. Электрическая схема. Уравнение. Преимущества и недостатки метода.
15. Пуск ДПТ. Характеристика $n(M)$. Уравнение. Расчет пускового сопротивления.
16. Рабочие характеристики ДПТ . Объясните их вид .

8. Литература.

1. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. Учебник для вузов – М. : Энергоатомиздат, 1985.
2. Липатов Д.Н. Вопросы и задачи по электротехнике для программи-рованного обучения. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Электротехника и электроника. Учебник для вузов. / Под редакцией В.Г.Герасимова. - М.: Энергоатомиздат, 1997.
4. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. / Под редакцией В.Г. Герасимова. : Учебное пособие для вузов.- М.: Высшая школа, 1987.
5. Справочник по электрическим машинам: В двух томах / Под редакцией И.П. Копылова, Б.К. Клокова. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1986.

Образец титульного листа.

Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

Кафедра электротехники и промышленной электроники

Домашнее задание № 3
по курсу « Электротехника и электроника » на тему:
РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С
ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ.

Вариант № 10

Выполнил : студент Иванов Б.В.
группа РК – 9,61

Проверил : доцент Волченков В.И.

Дата сдачи работы на проверку _____

Москва, 2007