

Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Методические рекомендации по решению домашнего задания  
по курсу «Электротехника и электроника»

Москва, 2007

Настоящие методические рекомендации к решению домашнего задания 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.

## Введение.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) широко используются в электроприводе. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с такими электрическими машинами, как синхронные и асинхронные двигатели. К этим преимуществам можно отнести относительную простоту изготовления, дешевизну, большой пусковой момент, управляемость.

Целью предлагаемого домашнего задания является закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях и семинарских заданиях при самостоятельном расчете студентами различных режимов работы ДПТ.

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

1. Расчет естественной механической характеристики  $n=f(M)$  и электромеханической характеристики  $n=f(I_a)$ .
2. Расчет искусственных механических характеристик  $n=f(M)$  ДПТ при различных способах регулирования угловой скорости  $n$ :
  - при изменении напряжения источника питания  $U$ ;
  - при введении в цепь ротора ДПТ добавочного сопротивления  $R_{я\text{доб}}$ ;
  - при изменении потока возбуждения  $\Phi$ .
3. Расчет искусственных механических характеристик  $n=f(M)$  ДПТ при различных способах электрического торможения:
  - при генераторном торможении;
  - при динамическом торможении;
  - при торможении противовключением.

Методика расчета всех пунктов домашнего задания рассмотрена ниже.

## **Требования к оформлению отчета.**

Отчет по выполненной расчетно-графической работе должен содержать:

1. Титульный лист (см. стр. 23).
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 предусмотренные учебным планом сроки.

## 1. Содержание домашнего задания.

### ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ ПО ТЕМЕ

#### «Двигатели постоянного тока»

Для двигателей постоянного тока выполнить следующие расчеты и построения:

1. Нарисовать электрическую схему включения двигателя постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением.
2. Рассчитать и построить естественные механическую  $n=f(M)$  и электромеханическую  $n=f(I_a)$  характеристики. Определить частоту вращения  $n_D$  при заданном моменте сопротивления  $M_D = M_H \cdot k$  на валу двигателя.
3. Рассчитать и построить на одном графике естественную и искусственные характеристики  $n=f(M)$  при различных способах регулирования частоты вращения  $n$  двигателя постоянного тока. Определить для каждого случая частоту вращения  $n_D$  при заданном моменте сопротивления  $M_D = M_H \cdot k$  на валу двигателя:
  - а) при регулировании изменением напряжения сети ( $U' = U \cdot q_1$ );
  - б) при реостатном регулировании ( $R_{я\text{доб}} = R_{я} \cdot q_2$ );
  - в) при изменении потока возбуждения ( $\Phi' = \Phi \cdot q_1$ ).
4. Рассчитать и построить на одном графике естественную и искусственные характеристики  $n=f(M)$  при различных способах торможения ДПТ:
  - а) при генераторном торможении, для  $n_T = n_H \cdot h_1$  и  $M_T = M_H \cdot k$ ;
  - б) при динамическом торможении, для  $n_T = n_D$  и  $M_T = M_H \cdot k$ ;
  - в) при торможении противовключением:  
 $n_T = n_H \cdot h_2$  и  $M_T = M_H \cdot k$  для реостатного торможения;  
 $n_T = n_D$  и  $M_T = M_H \cdot k$  для торможения с изменением полярности напряжения на обмотке якоря.

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

В качестве исходных данных приводятся следующие величины :

$U_n$  – номинальное напряжение двигателя, В;

$P_n$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$n_n$  – номинальная частота вращения ротора, об/мин;

$\eta_n$  – к.п.д., коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке, %;

$R_{я}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{доп пол}}$  – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

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

Полезной мощностью  $P_2$  двигателя постоянного тока является механическая мощность, которая определяется через механические параметры по формуле:  $P_2 = M \cdot \Omega = M \cdot (2\pi / 60) \cdot n = 0.1047 \cdot M \cdot n$ ,  
где  $M$  – момент на валу двигателя;  $\Omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Используя номинальные данные  $P_{2н}$  и  $n_n$ , можно вычислить номинальный вращающий момент двигателя:

$$M_n = 9.55 \cdot P_{2н} / n_n.$$

Здесь  $P_{2н}$  – в [Вт],  $n_n$  – в [об/мин],  $M_n$  – в [Н·м].

Номинальная электрическая мощность, потребляемая из сети двигателем

$$P_{1н} = P_{2н} / \eta_n.$$

Номинальный ток двигателя  $I_n = P_{1н} / U_n$ .

Номинальный ток возбуждения  $I_{вн} = U_n / R_{\text{возб}}$ .

Номинальный ток обмотки якоря  $I_{ян} = I_n - I_{вн} = P_{1н} / U_n - U_n / R_{\text{возб}}$ .

Схема включения ДПТ с параллельным возбуждением изображена на рис. 1.

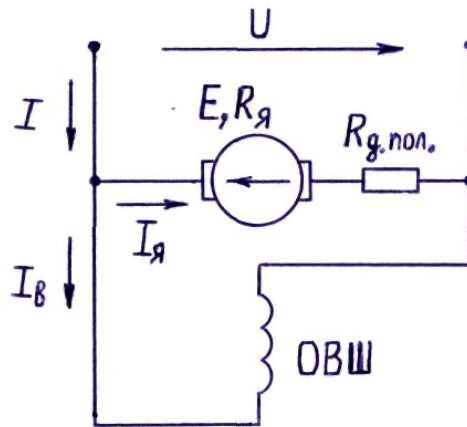


Рис. 1

Уравнение электрического состояния силовой цепи двигателя можно записать в виде:

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

где  $E = C_E \Phi \cdot n$  – э.д.с. вращения;  $C_E$  – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами двигателя.

Уравнение электромеханической характеристики  $n = f(I_{\text{я}})$  имеет вид:

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

Учитывая, что  $M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}$ , где  $C_M$  – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами двигателя, получаем уравнение механической характеристики  $n = f(M)$ :

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

Полученные выражения для характеристик  $n = f(I_{\text{я}})$  и  $n = f(M)$  имеют линейный характер при условии, что магнитная цепь двигателя не насыщена (см. рис. 2 характеристика 1).

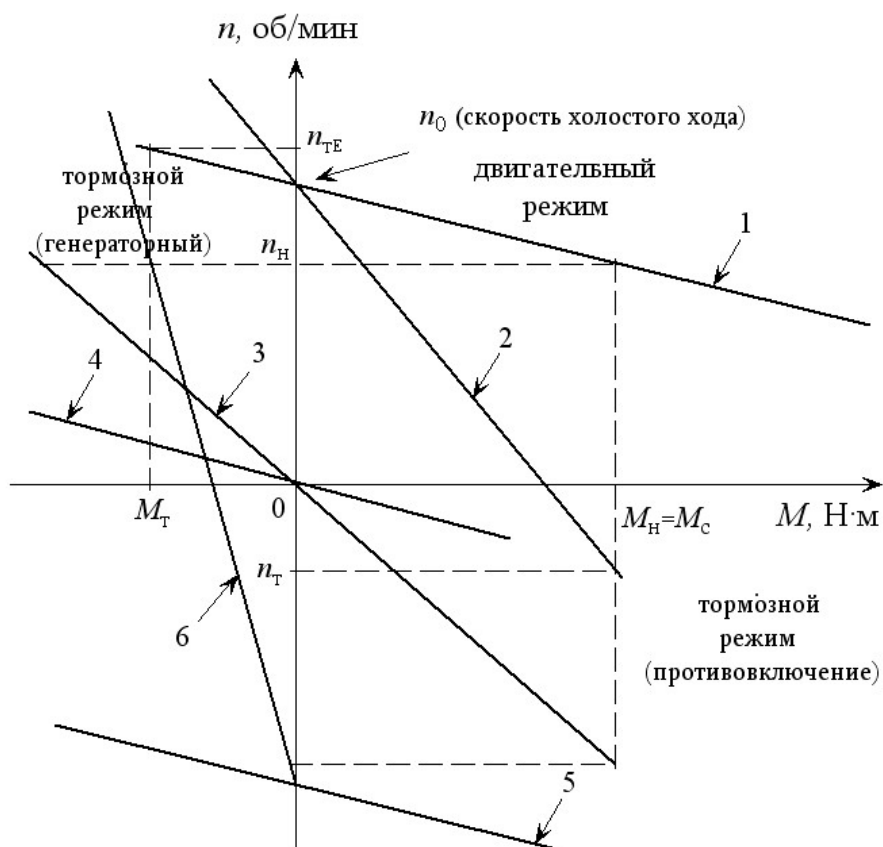


Рис. 2

Постоянные коэффициенты  $k_E = C_E \cdot \Phi$  и  $k_M = C_M \cdot \Phi$  можно определить по формулам:

$$C_E \cdot \Phi = E_H / n_H \text{ и } C_M \cdot \Phi = M_H / I_{яH}.$$

Для построения естественной механической  $n=f(M)$  и электромеханической  $n=f(I_{я})$  характеристик необходимо знать координаты двух точек:

- 1)  $n = n_0$  при  $M = 0$  и  $I_{я} = 0$  (режим холостого хода, Х.Х.);
- 2)  $n = n_H$  при  $M = M_H$  и  $I_{я} = I_{яH}$  (номинальный режим).

После построения графиков  $n=f(I_{я})$  и  $n=f(M)$  нужно определить частоту вращения ДПТ, соответствующую заданному моменту нагрузки на валу двигателя  $M_D = M_H \cdot k$  аналитически (по уравнению механической характеристики) и графически (по графику  $n=f(M)$ ), а также рассчитать пусковой момент двигателя (при  $n = 0$ ).

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

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

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

Выражения для электромеханической характеристики  $n=f(I_{\text{я}})$  и механической характеристики  $n=f(M)$  имеют вид:

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

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

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  $\Delta n$  остается неизменным при одинаковых значениях момента  $M$ . Значит наклон характеристики  $n=f(M)$  не меняется.

При уменьшении напряжения ( $U' = U \cdot q1$ ), приложенного к обмотке якоря, искусственная характеристика  $n'=f(M)$ , смещается вниз относительно естественной характеристики  $n=f(M)$ .

Расчет искусственной характеристики  $n'=f(M)$  (при  $U' = U \cdot q1$ ).

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

1) для режима холостого хода :

$$M = 0; \quad n_0' = U' / (C_E \cdot \Phi) = U \cdot q1 / (C_E \cdot \Phi) = n_0 \cdot q1;$$

2) при номинальной нагрузке:

$$M = M_{\text{н}}; \quad n'_{\text{н}} = U' / (C_E \cdot \Phi) - M_{\text{н}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{доп пол}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Естественную  $n=f(M)$  и искусственную  $n'=f(M)$  характеристики нужно строить на общем графике.

Коэффициент регулирования  $k_D$  при заданном  $M_D$ .

Вычислить коэффициент регулирования  $k_D$  частоты вращения  $n$  при изменении напряжения источника питания  $U' = U \cdot q1$  и при моменте нагрузки

$M_D = M_H \cdot k$  можно по формуле:  $\kappa_D = n_D' / n_D$ .

Где  $n_D$  – частота вращения, соответствующая моменту  $M_D$ , при работе ДПТ на естественной характеристике  $n=f(M)$ ,  $n_D'$  – частота вращения, соответствующая моменту  $M_D$ , при работе ДПТ на искусственной характеристике  $n'=f(M)$  при том же моменте нагрузки  $M_D$  и при пониженном напряжении  $U_1' = U_1 \cdot q_1$ .

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

### 3.2. Расчет характеристики $n=f(M)$ при введении добавочного сопротивления $R_{я\text{доб}}$ в цепь якоря (реостатное регулирование).

Влияние  $R_{я\text{доб}}$  на вид характеристики  $n=f(M)$ .

Электрическая схема, соответствующая реостатному регулированию  $n$  ДПТ, приведена на рис.3.

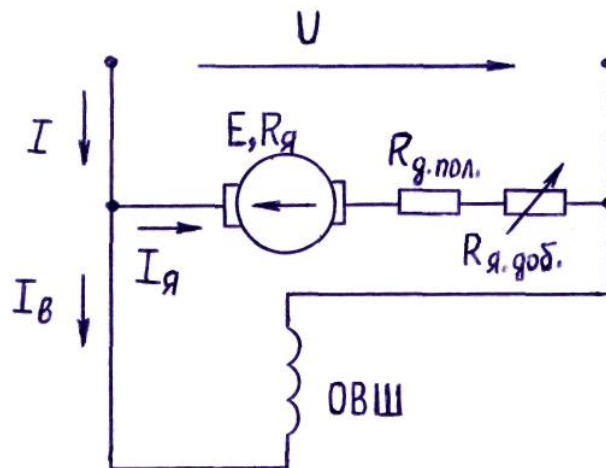


Рис. 3

Уравнение механической характеристики  $n'=f(M)$  при использовании реостатного регулирования выглядит следующим образом

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

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

Расчет реостатной характеристики  $n'=f(M)$ .

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

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

2) номинальный режим - при  $M = M_N$

$$n'_N = U / (C_E \cdot \Phi) - M_N \cdot (R_{\Sigma} + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{доб}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Естественную  $n = f(M)$  и искусственную  $n' = f(M)$  характеристики нужно строить на общем графике.

Коэффициент регулирования  $\kappa_D$  при заданном  $M_D$ .

Коэффициент регулирования частоты вращения  $\kappa_D$  определяется по формуле:  $\kappa_D = n_D' / n_D$ ,

где  $n_D' = U / (C_E \cdot \Phi) - M_D \cdot (R_{\Sigma} + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{доб}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2)$ ;  $M_D = M_N \cdot k$ ;  $R_{\text{доб}} = R_{\Sigma} \cdot q^2$ .

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

### 3.3. Расчет характеристики $n = f(M)$ при уменьшении потока возбуждения (полюсное регулирование).

Влияния потока возбуждения  $\Phi$  на вид характеристики  $n = f(M)$ .

На рис. 4 приведена электрическая схема, соответствующая регулированию частоты вращения  $n$  двигателя постоянного тока при уменьшении магнитного потока возбуждения ( $\Phi' = \Phi \cdot q_1$ ).

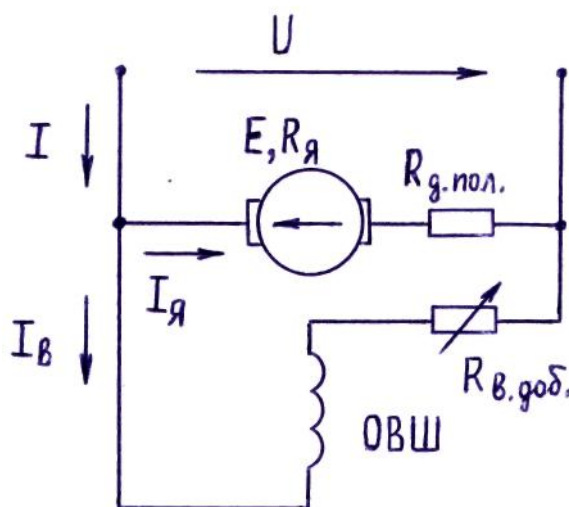


Рис. 4

При введении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения

$R_{в\ доб}$  уменьшается ток возбуждения  $I_{в}$ , уменьшается магнитный поток ( $\Phi' < \Phi$ ), создаваемый обмоткой возбуждения.

В соответствии с уравнением механической характеристики

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

при изменении магнитного потока  $\Phi$  изменяются скорость холостого хода и наклон механической характеристики ( $n_0$  и  $\Delta n$ ).

Для построения искусственной характеристики  $n' = f(M)$  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:  $M = M_n$

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

Естественную  $n = f(M)$  и искусственную  $n' = f(M)$  характеристики нужно строить на общем графике.

Коэффициент регулирования  $k_D$  при заданном  $M_D$ .

Коэффициент регулирования частоты вращения  $n$  можно определить по формуле:  $k_D = n_D' / n_D$ ,

где  $n_D' = U / (C_E \cdot \Phi') - M_D \cdot (R_{я} + R_{доп\ пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot (\Phi')^2)$ ;  $M_D = M_n \cdot k$ ;  $\Phi' = \Phi \cdot q_1$ .

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 $n = f(M)$ 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. 5.

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

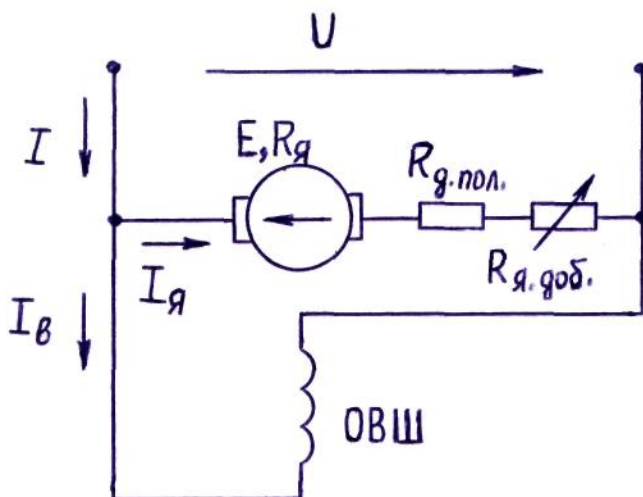


Рис. 5

При этом  $n < n_0$  и  $E < U$ , где  $n_0$  – частота вращения ротора ДПТ в режиме холостого хода ( $M_c = 0$ ),  $E$  – э.д.с. вращения.

Режим генераторного (рекуперативного) торможения наступает, когда частота вращения ротора  $n$  оказывается больше частоты вращения ротора в режиме холостого хода  $n_0$ . При этом  $E > U$  и ток якоря  $I_{\text{я}}$  становится отрицательным, т.е. меняет направление. Ток якоря и э.д.с. вращения оказываются направленными в одну сторону ( $E \uparrow \uparrow I_{\text{я}}, P > 0$ ), электрическая энергия отдается в сеть. Так как ток якоря  $I_{\text{я}}$  меняет направление и становится отрицательным, соответственно меняет направление и момент, который тоже становится отрицательным, т.е. тормозит вращение ротора ( $M = M_{\text{т}} < 0$ ).

Расчет тормозной реостатной характеристики, соответствующей генераторному торможению и обеспечивающей при заданном моменте торможения  $M_{\text{т}}$  частоту вращения  $n_{\text{т}}$  проводят в два этапа.

**На первом этапе** нужно определить частоту вращения  $n_{\text{тЕ}}$  при работе ДПТ на естественной характеристике ( $R_{\text{я доб}} = 0$ ) и при заданном тормозном моменте  $M_{\text{т}}$

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

На втором этапе определяют величину добавочного сопротивления  $R_{\text{я доб}}$ , вводимого в цепь якоря и обеспечивающего прохождение реостатной характеристики  $n' = f(M)$  через точку с координатами  $M_T$  и  $n_T$  ( $M_T = M_H \cdot k$ ,  $n_T = n_H \cdot h_1$ ). Для чего нужно воспользоваться выражением

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

Задавая числовые значения  $M_T$  и  $n_T$ , можно определить  $R_{\text{я доб}}$ .

Затем необходимо рассчитать и построить на одном графике естественную  $n_{TE} = f(M)$  и реостатную  $n_T = f(M)$  механические характеристики, соответствующие генераторному торможению. На этих графиках нужно показать 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  $R_{\text{доб}}$  (рис. 6).

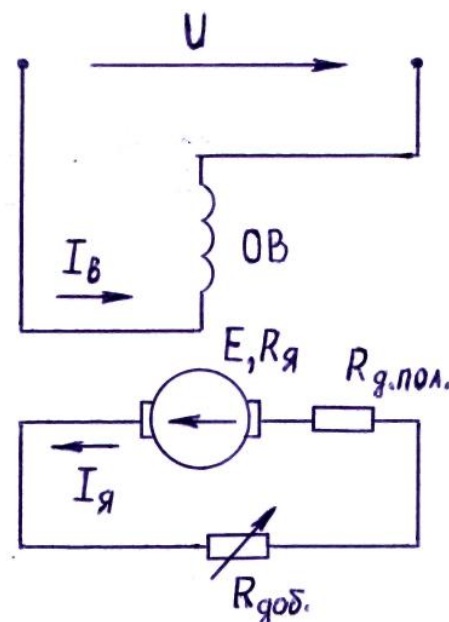


Рис. 6

Ротор по инерции продолжает вращаться, в обмотке якоря наводится э.д.с. вращения  $E$ . Так как напряжение внешнего источника на обмотке якоря отсутствует, ток в цепи определяется выражением

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

Ток  $I_{\text{я}}$  и момент  $M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}$  становятся отрицательными, момент действует против направления вращения ротора, т.е. становится тормозящим. При этом скорость вращения ротора будет уменьшаться вплоть до полной остановки ( $n = 0$ ). Наклон характеристики динамического торможения определяется величиной суммарного сопротивления в цепи якоря ( $R_{\text{я}} + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{я доб}}$ ).

Чтобы представить вид характеристики  $n=f(M)$  двигателя постоянного тока при динамическом торможении достаточно характеристику  $n=f(M)$  при генераторном торможении, рассмотренную ранее, сместить вниз на величину  $n_0$ . Полученная характеристика будет проходить через начало координат графика  $n=f(M)$  (рис. 2 характеристика 4).

#### Расчет характеристики $n=f(M)$ при динамическом торможении.

Расчет реостатной характеристики  $n_{\text{т}}=f(M)$ , соответствующей динамическому торможению и проходящей через точку с координатами  $M_{\text{т}}$  и  $n_{\text{т}}$  проводят в два этапа:

- а) расчет характеристики  $n_{\text{тЕ}}=f(M)$  при  $R_{\text{доб}} = 0$ ;
- б) расчет реостатной характеристики  $n_{\text{т}}=f(M)$  (при  $R_{\text{доб}} \neq 0$ ), проходящей через расчетную точку с заданными координатами  $M_{\text{т}}$  и  $n_{\text{т}}$ .

#### Расчет характеристики $n_{\text{тЕ}}=f(M_{\text{т}})$ при $R_{\text{доб}} = 0$ .

**Первый этап** - расчет характеристики при  $R_{\text{доб}} = 0$ .

Уравнение механической характеристики  $n_{\text{тЕ}}=f(M)$ , соответствующее динамическому торможению (при  $R_{\text{доб}} = 0$ ), принимает вид

$$n_{\text{тЕ}} = M_{\text{т}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{доп пол}})/(C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Полученное выражение соответствует прямой линии, проходящей через начало координат (рис. 2 характеристика 4). Угол наклона ее к оси абсцисс равен углу наклона естественной характеристики  $n=f(M)$  ДПТ.

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

$$I_{яТ} = -E / (R_{я} + R_{доп пол}) \gg I_{я ном},$$

$$\text{и } M_T = C_M \cdot \Phi \cdot I_{яТ} \gg M_{ном}.$$

**Второй этап** – расчет реостатной характеристики  $n_T = f(M)$  при  $R_{доб} \neq 0$ .

Чтобы избежать аварии ДПТ, в цепь якоря вводят ограничивающее сопротивление  $R_{доб} \neq 0$  (см. рис. 6). При этом

$$I_{яТ} = -E / (R_{я} + R_{доп пол} + R_{доб}) < 2 \cdot I_{я ном};$$

$$n_T = M_T \cdot (R_{я} + R_{доп пол} + R_{доб}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) \text{ (рис. 2 характеристика 3)}.$$

Подставляя в полученное выражение  $n_T = f(M_T)$  числовые значения  $M_T$  и  $n_T$ , можно определить величину соответствующего  $R_{доб}$ .

Естественную характеристику  $n = f(M)$ , соответствующую работе машины в двигательном режиме, и две тормозных характеристики:  $n_{TE} = f(M)$  при  $R_{доб} = 0$  и реостатную  $n_T = f(M)$  нужно построить на общем графике. На графиках нужно показать точки, соответствующие заданному  $M_T$ .

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

### 4.3 Торможение противовключением.

Применяются две модификации торможения противовключением:

- а) с использованием реостатной характеристики  $n = f(M)$ ;
- 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.

#### 4.3.1 Торможение противовключением с использованием $R_{я доб}$ .

Описание процесса торможения.

Рассмотрим первый вариант торможения противовключением с использованием реостатной характеристики  $n=f(M)$ . Схема включения ДПТ приведена на рисунке 5.

Рассмотрим, как происходит процесс торможения.

Допустим, лебедка поднимает груз, который создает на валу двигателя активный момент сопротивления  $M_c$  (рис. 2 характеристика 1). Теперь потребовалось этот груз опустить. Это можно осуществить с помощью резистора большого сопротивления, включенного в цепь якоря. Наклон механической характеристики при этом станет очень крутым (рис. 2 характеристика 2). Скорость вращения ротора двигателя из-за инерции в первый момент останется неизменным, а момент, развиваемый двигателем, станет меньше момента сопротивления на валу. Скорость вращения начнет падать, достигнет нулевого значения, а затем, изменив направление вращения, будет нарастать до тех пор, пока момент двигателя не уравновесит момент сопротивления на валу. Таким образом, груз будет опускаться с постоянной скоростью ( $n = n_T, M = M_c$ ).

Реостатная характеристика при этом будет выглядеть следующим образом:

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

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

Подставляя в уравнение значения требуемых  $n_T$  и  $M_T$ , можно определить величину  $R_{я\ доб}$ , обеспечивающего необходимый наклон реостатной характеристики  $n=f(M)$ .

Естественную характеристику  $n=f(M)$  ( $R_{я\ доб} = 0$ ), соответствующую работе машины в двигательном режиме, и реостатную тормозную характеристику  $n_T=f(M)$  ( $R_{я\ доб} \neq 0$ ) нужно построить на общем графике. На графиках нужно показать точки, соответствующие заданному  $M_T$ .

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

#### 4.3.2 Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря.

##### Описание процесса торможения.

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

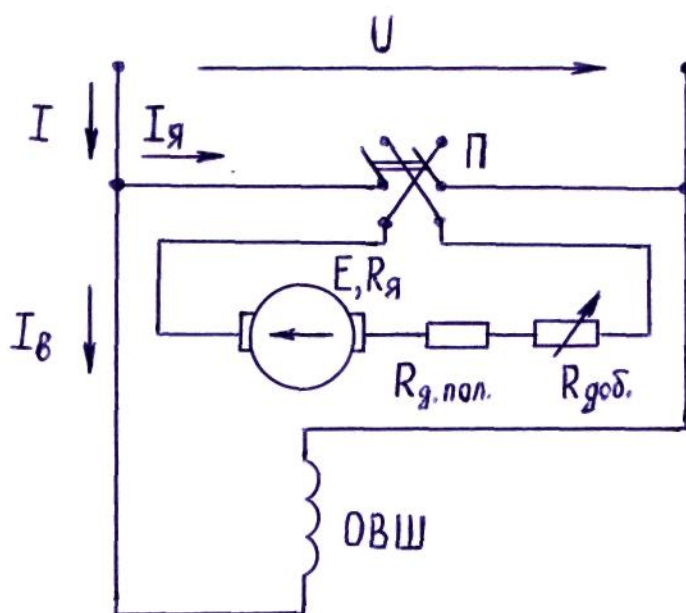


Рис. 7

На рис. 7 приведена электрическая схема, позволяющая с помощью переключателя П изменять полярность источника напряжения  $U$  в цепи якоря ДПТ. При этом в обмотке якоря изменяется направление тока  $I_я$ . Однако если просто переключить полярность питающего якорь напряжения (см. рис. 2 характеристика 5), то в цепи якоря произойдет сильный скачек тока, т.к.

$I_я = (-U - E) / (R_я + R_{доп. пол})$ . Для ограничения тока  $I_я$  в цепь якоря вводят добавочное сопротивление  $R_{я.доб.}$ . В этом случае наклон механической характеристики изменится (рис. 2 характеристика 6). Т.к. знак тока  $I_я$  меняется, то и момент развиваемый двигателем становится тормозным

$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = M_{\text{т}} < 0$ . Подбором  $R_{\text{я доб}}$  можно регулировать величину  $I_{\text{я}}$  и, соответственно, тормозной момент  $M_{\text{т}}$ .

Так как момент, развиваемый двигателем, становится тормозным, частота вращения ротора будет уменьшаться, рабочая точка переместится по реостатной характеристике до  $n = 0$ . Если в это время двигатель не отключить от сети, то ротор начнет разгоняться в противоположную сторону в соответствии с направлением действующего вращающего момента.

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

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

Подставляя в уравнение числовые значения требуемых  $n_{\text{т}}$  и  $M_{\text{т}}$ , можно определить величину добавочного сопротивления  $R_{\text{я доб}}$ .

Естественную характеристику  $n = f(M)$  ( $R_{\text{я доб}} = 0$ ), соответствующую работе машины в двигательном режиме, тормозную характеристику  $n_{\text{тЕ}} = f(M)$  ДПТ при  $R_{\text{я доб}} = 0$  и реостатную тормозную характеристику  $n_{\text{т}} = f(M)$  при  $R_{\text{я доб}} \neq 0$  нужно построить на общем графике. На графиках нужно показать точки, соответствующие заданному  $M_{\text{т}}$ .

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

## 1. 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?
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  $R_{я\text{ доб}}$ . Электрическая схема. Уравнение. Преимущества и недостатки метода.
14. Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря. Электрическая схема. Уравнение. Преимущества и недостатки метода.

Список рекомендуемой литературы:

2. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. Учебник для вузов – М. : Энергоатомиздат, 1985.
3. Липатов Д.Н. Вопросы и задачи по электротехнике для программированного обучения. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. 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.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Введение .....	3
1. Содержание домашнего контрольного задания .....	5
6. Расчет номинальных данных и построение естественной механической характеристики $n=f(M)$ .....	6
7. Расчет искусственных механических характеристик $n=f(M)$ при различных способах регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока .....	9
8. Расчет характеристики $n=f(M)$ при уменьшении напряжения источника питания в цепи якоря .....	9
3.2. Расчет характеристики $n=f(M)$ при введении добавочного сопротивления $R_{я\text{доб}}$ в цепь якоря .....	10
9. Расчет характеристики $n(M)$ при изменении потока возбуждения .....	11
10. Расчет искусственных механических характеристик $n=f(M)$ при различных способах электрического торможения ДПТ ...	12
4.1. Генераторное торможение .....	13
4.2. Динамическое торможение .....	14
4.3. Торможение противовключением .....	16
4.3.1. Торможение противовключением с использованием $R_{я\text{доб}}$ ..	16
4.3.2. Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря .....	18
5. Контрольные вопросы .....	19
6. Список рекомендуемой литературы.....	21

Приложение 1      *Образец титульного листа.*

Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана

Кафедра электротехники и промышленной электроники ФН7

Домашнее задание №  
по курсу «Электротехника и электроника» на тему:  
**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Вариант №

Выполнил:

Группа

Проверил:

Дата сдачи работы на проверку:

Москва, 20\_\_