

Урок 21 (24.01.2019)

Электродвигатель и электрогенератор. Мощность и КПД электродвигателя.

1. Электродвигатель и электрогенератор

На прошлом уроке мы разобрали принцип действия электродвигателя толкающего типа: проводящая планка на рельсах в магнитном поле.

Аналогично устроен и обычный электродвигатель роторного типа. При этом аналогом силы Ампера, которая толкает планку, в роторном двигателе служит вращающий момент, действующий на рамку с током. Напомним, что вращающий момент равен $\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}$, где $\vec{\mu} = NI\vec{S}$ – магнитный дипольный момент (не путать с μ – магнитной проницаемостью материала).

Обычно в школьных задачах не надо считать вращающий момент таким способом, т.к. реальный электродвигатель устроен значительно сложнее. Практически всегда единственное, что требуется, не забывать формулы динамики вращательного движения.

Противо-ЭДС в электродвигателе.

Рассмотрим такую страшную задачу:

Сопrotивление обмотки ротора двигателя постоянного тока равно $R = 5,0 \text{ Ом}$. Двигатель подключён к источнику с напряжением $U = 120 \text{ В}$, и, когда двигатель развивает полные обороты при штатной нагрузке, противо-ЭДС равна $\varepsilon_{\text{инд}} = 108 \text{ В}$. Рассчитать силу тока в двигателе в момент пуска и при штатной работе двигателя.

Решение. В момент пуска электродвигателя ротор практически неподвижен. Поэтому противо-ЭДС равна нулю, и, по закону Ома, $I_{\text{старт}} = U/R = 24 \text{ А}$. При нормальной нагрузке у нас, как сказано в задаче, возникает ЭДС самоиндукции $\varepsilon_{\text{инд}}$, направленная против внешнего напряжения. Поэтому рабочий ток: $I = (U - \varepsilon_{\text{инд}})/R = 2,4 \text{ А}$.

Мощность и КПД электродвигателя.

Пусть сопротивление обмотки якоря равно R , напряжение в сети U , трение отсутствует. Пусть, при этом, «извне» к якорю приложен постоянный вращающий момент M (механическая нагрузка). Пусть, наконец, двигатель работает в стационарном режиме, т.е. якорь вращается с постоянной угловой скоростью ω , при этом через обмотку якоря идёт ток I .

В этом случае мы можем, воспользовавшись законом сохранения энергии, приравнять потребляемую из сети мощность $P = UI$ сумме механической мощности P_M и теплоте, выделяющейся за единицу времени $I^2 R$:

$$UI = P_M + I^2 R.$$

При этом ток в цепи можно записать, с учётом возникающей ЭДС самоиндукции:

$$I = \frac{U - \varepsilon}{R},$$

где ε – абсолютная величина ЭДС самоиндукции.

Из этих двух формул видно, что

$$P_M = I\varepsilon .$$

С другой стороны, т.к. скорость вращения якоря постоянна и геометрия обмоток не меняется, ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости вращения:

$$\varepsilon = \xi\omega ,$$

где ξ – коэффициент пропорциональности.

Механическая мощность при равномерном движении равна

$$P_M = M\omega ,$$

следовательно

$$I = \frac{P_M}{\varepsilon} = \frac{M\omega}{\xi\omega} = M/\xi .$$

При неподвижном якоре ЭДС самоиндукции равна нулю и ток в цепи максимальный:

$$I_{\max} = U/R ,$$

в этот же момент (т.е. пока якорь неподвижен) двигатель развивает максимальный крутящий момент:

$$M_{\max} = \frac{U\xi}{R} .$$

Оценим, как себя ведёт механическая мощность, развиваемая электродвигателем.

$$P_M = IU - I^2R = \frac{U}{\xi}M - \frac{R}{\xi^2}M^2 .$$

Это уравнение симметричной параболы, с ветвями, направленными вниз. Очевидно, что механическая мощность равна нулю, при $M = 0$ и при $M = M_{\max}$ (холостой ход и остановка якоря). Максимальная мощность достигается посередине, при $M = M_{\max}/2$ и равна

$$P_{M_{\max}} = \frac{1}{4}P_{\max} = \frac{1}{4}\frac{U^2}{R} ,$$

где $P_{\max} = I_{\max}U = \frac{U^2}{R}$.

Иными словами максимальная механическая мощность, развиваемая электродвигателем в 4 раза меньше максимальной электрической мощности, потребляемой электродвигателем.

КПД электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_M}{P} = 1 - \frac{R}{\xi U}M .$$

Заметим, что КПД электродвигателя максимальна (и равна 100%) при $M = 0$, т.е. когда двигатель не работает... Это показывает, в очередной раз, что КПД – не единственная характеристика, которую надо максимизировать.

Индукционные токи и другие эффекты.

Несколько эффектов: вихревые токи (токи Фуко), магнитный демпфер, наборный сердечник.

2. Задачи

1. Частота ротора электродвигателя постоянного тока, включённого в цепь батареи с разностью потенциалов $U = 24 \text{ В}$, при полном сопротивлении цепи $R = 20 \text{ Ом}$ равна $\nu = 600 \text{ мин}^{-1}$ при токе в цепи $I = 0,2 \text{ А}$. Какую ЭДС разовьёт тот же двигатель, работая в качестве динамо-машины с частотой $\nu_0 = 1200 \text{ мин}^{-1}$?
2. Какую частоту разовьёт электродвигатель постоянного тока с постоянным магнитом, включённый в цепь с ЭДС ε при полном сопротивлении цепи R , если, работая в качестве генератора, он развивает ЭДС ε_0 при частоте ν_0 ? Момент силы трения на оси двигателя равен M .
$$\nu = \nu_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \frac{2\pi MR\nu_0}{\varepsilon_0^2} \right)$$
3. Какую ЭДС развивает динамо-машина постоянного тока, если при сопротивлении цепи $R_1 = 300 \text{ Ом}$ на вращение ротора затрачивается мощность $P_1 = 50 \text{ Вт}$, а потери на трение составляют $\chi = 4\%$ по мощности? Какую мощность для поддержания той же частоты необходимо затрачивать при сопротивлении цепи $R_2 = 60 \text{ Ом}$?