

Особенности расчётов характеристик двигателей постоянного тока со смешанным возбуждением

12, декабрь 2015

Гридин В. М.

УДК: 621.313.2

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

gridin1940@mail.ru

Введение

Изложенный материал позволяет составлять алгоритмы расчётов характеристик двигателей постоянного тока (ДПТ) со смешанным возбуждением для различных условий работы, используя только каталожные данные, и проводить такие расчеты без применения итерационных процедур.

Предложена зависимость относительного магнитного потока от относительного результирующего по МДС тока двух обмоток возбуждения и от якорного тока в виде квадратичной параболы. Для определения ключевых характеристик – скорости вращения вала двигателя n и якорного тока $I_{\text{я}}$ предложена система двух уравнений с двумя неизвестными – n и $I_{\text{я}}$. Для случая, когда скорость n известна, получены выражения для напряжения на параллельной обмотке возбуждения или тока в последовательной обмотке возбуждения, которые обеспечивают известную скорость n . Приведены примеры расчетов характеристик ДПТ по каталожным данным.

В известной литературе отсутствуют алгоритмы расчётов характеристик двигателей постоянного тока (ДПТ) со смешанным возбуждением только по каталожным данным. Целью настоящей работы является обеспечение возможности составлять такие алгоритмы расчётов для различных условий работы ДПТ и проводить такие расчеты без применения итерационных процедур.

Условия работы ДПТ характеризуются значениями напряжения питания $U_{\text{п}}$, момента нагрузки на валу M , а также напряжения на параллельной (шунтовой) обмотке возбуждения (ОВ) $U_{\text{вш}}$ и тока в последовательной (сериесной) ОВ $I_{\text{вс}}$. Для расчетов характеристик ДПТ кроме каталожных данных и значений $U_{\text{п}}$, M , $U_{\text{вш}}$, $I_{\text{вс}}$ необходимо знать и использовать значение отношения МДС одной из ОВ к сумме МДС обеих ОВ. Если такое значение неизвестно, то приходится задавать его, руководствуясь назначением ОВ, а при возможности определять его по результатам испытания серийного ДПТ (см. Приложение).

Примером ДПТ со смешанным возбуждением являются двигатели серий 4П и Д для металлургических, крановых, экскаваторных и других электроприводов [1]. В них МДС параллельной и последовательной обмоток возбуждения (ОВ) действуют согласно. При этом МДС последовательной ОВ может быть меньше или больше МДС параллельной ОВ. Соответственно этому будем называть ДПТ с параллельно - последовательным и ДПТ с последовательно - параллельным возбуждением.

Обозначим за f отношение МДС параллельной ОВ к сумме МДС обеих ОВ при номинальном режиме работы ДПТ, т.е. при номинальных значениях напряжения питания $U_{\text{пн}}$, якорного тока $I_{\text{ян}}$ и равенствах $U_{\text{вш}} = U_{\text{пн}}$, $I_{\text{вс}} = I_{\text{ян}}$.

Для ДПТ с параллельно - последовательным возбуждением вспомогательная последовательная (стабилизирующая) ОВ предназначена для небольшого увеличения крутизны механической характеристики ДПТ и как следствие — для обеспечения более устойчивой его работы [2]. Поэтому значение отношения f близко к единице и при его неизвестности можно считать, что $f \approx 0,85 \div 0,95$.

Для ДПТ с последовательно – параллельным возбуждением вспомогательная параллельная ОВ предназначена для ограничения скорости вращения вала при отсутствии нагрузки и небольшой нагрузке на валу. Поэтому значение f относительно невелико и при его неизвестности можно считать, что $f \approx 0,1 \div 0,2$.

Считаем, что реакция якоря скомпенсирована с помощью дополнительных полюсов, а также – компенсационной обмотки при её наличии. Тогда при равенствах $U_{\text{вш}} = U_{\text{п}}$, $I_{\text{вс}} = I_{\text{я}}$ можно записать следующее выражение для относительного результирующего по МДС тока двух ОВ, или просто относительного тока возбуждения;

$$i_{\text{в}} = f \cdot \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{пн}}} + (1-f) \cdot \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{ян}}} \quad (1)$$

Если ток в серийной (последовательной) ОВ $I_{\text{вс}}$ и ток якоря $I_{\text{я}}$ различные, например, при обеспечении заданной скорости вращения вала, то в формуле (1) надо заменить $I_{\text{я}}$ на $I_{\text{вс}}$.

Формула (1) пригодна также и для ДПТ с параллельным возбуждением, у которого $f = 1$, $i_{\text{в}} = U_{\text{п}}/U_{\text{пн}}$, и для ДПТ с последовательным возбуждением, у которого $f = 0$, $i_{\text{в}} = I_{\text{я}}/I_{\text{ян}}$.

Для расчётов характеристик ДПТ необходимо выразить и использовать среднюю (или стандартную) относительную характеристику (кривую) намагничивания магнитопровода якоря – зависимость относительного магнитного потока ϕ от относительного тока возбуждения $i_{\text{в}}$. Здесь: $\phi = \Phi/\Phi_{\text{н}}$, $\Phi_{\text{н}}$ — номинальный магнитный поток в якоре, при котором насыщение магнитопровода якоря — умеренное, оптимальное, т.е. компромиссное с точки зрения значений магнитного потока и потерь мощности на возбуждение (чем больше магнитный поток $\Phi_{\text{н}}$, тем больше и потери мощности на возбуждение).

В литературе, например, [3, 4], зависимость $\Phi(i_B)$ приведена в графическом или табличном виде. На рис.1 изображен график относительной характеристики $\Phi(i_B)$, приведенный в [4].

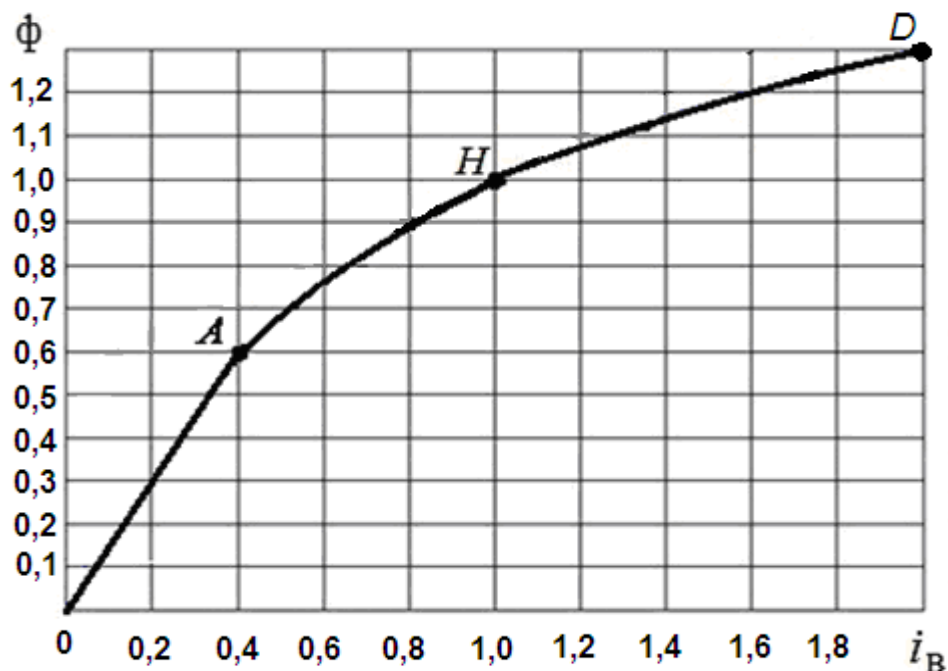


Рис.1. Относительная характеристика намагничивания магнитопровода якоря

Точка H с координатами $i_B = 1$ и $\Phi = 1$ соответствует номинальному режиму работы ДПТ. Согласно [2] она должна находиться несколько выше середины колена на характеристике (кривой) намагничивания.

Относительную характеристику намагничивания $\Phi(i_B)$ в графическом или в табличном виде можно и нужно аппроксимировать квадратичной параболой по трем точкам A , H , и D с координатами i_A и Φ_A , 1 и 1, i_D и Φ_D (см. рис. 1):

$$\Phi = -\alpha \cdot i_B^2 + \beta \cdot i_B + \gamma \quad (2)$$

Выражения для коэффициентов α , β , и γ найдем, решив систему трех уравнений:

$$\Phi_A = -\alpha \cdot i_A^2 + \beta \cdot i_A + \gamma, \quad 1 = -\alpha + \beta + \gamma, \quad \Phi_D = -\alpha \cdot i_D^2 + \beta \cdot i_D + \gamma.$$

Решение указанной системы:

$$\alpha = \frac{\Delta i - \Delta \Phi + i_A \cdot \Phi_D - i_D \cdot \Phi_A}{\Delta i \cdot (1 - i_A) \cdot (i_D - 1)},$$

$$\beta = \alpha \cdot (i_A + i_D) + \Delta \Phi / \Delta i, \quad \gamma = 1 + \alpha - \beta,$$

где:

$$\Delta i = i_D - i_A, \quad \Delta \Phi = \Phi_D - \Phi_A.$$

Если, например $i_A = 0,4$, $\phi_A = 0,6$, $i_D = 2$, $\phi_D = 1,3$. (см. рис.1), то можно получить следующие значения:

$$\alpha = 0,229, \quad \beta = 0,988, \quad \gamma = 0,242.$$

Из выражения (2) получим формулу для относительного тока возбуждения:

$$i_B = \left[\beta - \sqrt{\beta^2 - 4 \cdot \alpha (\phi - \gamma)} \right] / (2 \cdot \alpha) \quad (3)$$

Относительный магнитный поток ϕ можно и нужно представить как функцию от якорного тока I_A . При равенстве $I_{BC} = I_A$ согласно формуле (1) обозначим:

$$i_B = b \cdot I_A + c,$$

где:

$$b = \frac{1-f}{I_{ян}}, \quad c = f \cdot \frac{U_{пн}}{U_{пн}}.$$

С учетом формулы (2) получим выражения:

$$\phi = -\alpha \cdot (b \cdot I_A + c)^2 + \beta \cdot (b \cdot I_A + c) + \gamma = -x \cdot I_A^2 + y \cdot I_A + z, \quad (4)$$

где:

$$x = b^2 \cdot \alpha, \quad y = b \cdot \beta - 2 \cdot b \cdot c \cdot \alpha, \quad z = c \cdot \beta + \gamma - c^2 \cdot \alpha.$$

В каталогах, справочниках для ДПТ со смешанным возбуждением указаны номинальные значения напряжения питания $U_{пн}$, мощности на валу $P_{2н}$, скорости вращения вала n_n и потребляемого тока I_n или КПД η_n . Для номинальных значений других характеристик ДПТ известны следующие выражения.

Номинальное напряжение на якорной цепи без щеток и коллектора:

$$U_n = U_{пн} - \Delta U_{щ},$$

где

$$U_{щ} \approx (1 \div 2) B$$

– падение напряжения на двух щеточно-коллекторных контактах.

Номинальный якорный ток:

$$I_{ян} = \xi \cdot I_n,$$

где

$$\xi = 0,95 \div 0,98,$$

Номинальный ток в параллельном ОБ:

$$I_{впн} = I_n - I_{ян}.$$

Сопротивление якорной цепи R при его неизвестности нужно определить по формуле:

$$R = \varepsilon \cdot (U_H \cdot I_{яH} - P_{2H}) / I_{яH}^2,$$

где

$$\varepsilon = 1 / (1 + \kappa_P^2),$$

$\kappa_P = P_2 / P_{2H}$ – коэффициент загрузки ДПТ по мощности P_2 , при котором его КПД считаем максимальным. Обычно $\kappa_P \approx 0,8$, тогда $\varepsilon = 0,61$.

Формула для R справедлива потому, что

$$I_{яH}^2 \cdot R + \Delta P_{OH} \approx U_H \cdot I_{яH} - P_{2H},$$

а, согласно [2]:

$$\Delta P_{OH} = \kappa_P^2 \cdot I_{яH}^2 \cdot R$$

Номинальная ЭДС:

$$E_H = U_H - I_{яH} \cdot R$$

Номинальная мощность неэлектрических потерь (механических и магнитных):

$$\Delta P_{OH} \approx E_H \cdot I_{яH} - P_{2H}$$

Ключевыми расчетными характеристиками ДПТ являются число оборотов в минуту вала двигателя n и якорный ток $I_{я}$. Вместо скорости n удобнее употреблять относительную скорость $\bar{n} = n / n_H$, тогда $n = \bar{n} \cdot n_H$. Значения якорного тока $I_{я}$ и относительной скорости $\bar{n}$ можно определить путем решения системы двух уравнений с двумя неизвестными – $I_{я}$ и $\bar{n}$. Первое уравнение:

$$U \cdot I_{я} - I_{я}^2 \cdot R \approx K \cdot \bar{n} + \Delta P_{OH} \cdot \bar{n}^v, \quad (5)$$

где:

$$U = U_H - \Delta U_{щ}, \quad K = M \cdot n_H / 9,55.$$

Уравнение (5) справедливо, так как:

$$K \cdot \bar{n} + \Delta P_{OH} \cdot \bar{n}^v \approx P_2 + \Delta P_O.$$

Значения показателя степени $v \approx 1,3 \div 1,6$ и мощности неэлектрических потерь ΔP_O зависят от марки электротехнической стали, типа и смазки подшипников рода вентиляции [2]. Его можно определить по результатам испытаний одного из серийных ДПТ.

Второе уравнение с неизвестными $\bar{n}$ и $I_{я}$:

$$\frac{U - I_{я} \cdot R}{\bar{n} \cdot E_H} = -\alpha (b \cdot I_{я} + c)^2 + \beta (b \cdot I_{я} + c) + \gamma \quad (6)$$

или

$$\frac{U - I_{я} \cdot R}{\bar{n} \cdot E_H} = -x \cdot I_{я}^2 + y \cdot I_{я} + z \quad (7)$$

Два последних уравнения справедливы, так как:

$$E = U - I_{\text{я}} \cdot R = E_{\text{н}} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \cdot \frac{n}{n_{\text{н}}},$$

$$\Phi = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R}{\bar{n} \cdot E_{\text{н}}} \quad (8)$$

и справедливо выражение (4).

Из уравнения (5) получим выражение для якорного тока:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - \sqrt{U^2 - 4 \cdot R \cdot (K \cdot \bar{n} + \Delta P_{\text{ОН}} \cdot \bar{n}^{\text{в}})}}{2 \cdot R} \quad (9)$$

Если это выражение поставить в формулу (7), то можно получить одно уравнение с одним неизвестным $\bar{n}$, решив которое можно и нужно рассчитать значение якорного тока $I_{\text{я}}$ по формуле (9) и $n = \bar{n} \cdot n_{\text{н}}$.

В частном случае при параллельном возбуждении нужно рассчитать относительный ток возбуждения $i_{\text{в}}$ как $U_{\text{П}}/U_{\text{ПН}}$, относительный магнитный поток Φ по формуле (2), величину g по формуле:

$$g = \frac{M \cdot n_{\text{н}} \cdot R}{9,55 \cdot \Phi \cdot E_{\text{н}}}$$

и якорный ток $I_{\text{я}}$ по формуле:

$$I_{\text{я}} = \frac{U + g - \sqrt{(U - g)^2 - 4 \cdot R \cdot \Delta P_{\text{ОН}}}}{2 \cdot R} \quad (10)$$

Последняя формула получена при допущении о постоянстве мощности неэлектрических потерь ($\Delta P_{\text{О}} \approx \Delta P_{\text{ОН}}$) и подстановке в уравнение (5) выражения для $\bar{n}$, вытекающего из формулы (8):

$$\bar{n} = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R}{E_{\text{н}} \cdot \Phi} \quad (11)$$

Рассчитав значение тока $I_{\text{я}}$ по формуле (10), нужно рассчитать значение отношения $\bar{n}$ по формуле (11) и скорости n как $\bar{n} \cdot n_{\text{н}}$.

Зная значения $I_{\text{я}}$ и n , нужно рассчитать значения других характеристик ДПТ по известным формулам:

$$I = I_{\text{я}} + \frac{U_{\text{П}}}{U_{\text{ПН}}} \cdot I_{\text{ВШН}}, \quad P_1 = U_{\text{П}} \cdot I, \quad P_2 = M \cdot n / 9,55, \quad \eta = P_2 / P_1$$

Для случая, когда заданы значения напряжения питания $U_{\text{П}}$, момента нагрузки на валу M и дополнительно скорости вращения вала n , вначале нужно рассчитать относительную скорость $\bar{n}$, как $n/n_{\text{н}}$ и якорный ток $I_{\text{я}}$ по формуле (9). Далее

рассчитывается относительный магнитный поток ϕ по формуле (8) и относительный ток возбуждения i_B по формуле (3). Затем рассчитывается $U_{ВШ}$ для ДПТ с параллельно – последовательным возбуждением:

$$U_{ВШ} = \frac{i_B - (1-f) \cdot I_{Я} / I_{ЯН}}{f} \cdot U_{ПН},$$

так как:

$$I_{ВС} = I_{Я}, \quad i_B = \frac{U_{ВШ}}{U_{ПН}} \cdot f + (1-f) \cdot \frac{I_{Я}}{I_{ЯН}},$$

а для ДПТ с последовательно – параллельным возбуждением:

$$I_{ВС} \approx \frac{i_B - f \cdot U_{П} / U_{ПН}}{1-f} \cdot I_{ЯН}, \quad (12)$$

так как:

$$U_{ВШ} = U_{П}, \quad i_B \approx f \cdot \frac{U_{П}}{U_{ПН}} + (1-f) \cdot \frac{I_{ВС}}{I_{ЯН}}$$

В частности, для ДПТ с параллельным возбуждением $f = 1$, $U_{ВШ} = i_B \cdot U_{ПН}$, а для ДПТ с последовательным возбуждением $f = 0$, $I_{ВС} = i_B \cdot I_{ЯН}$. Наконец нужно рассчитать значения тока I , мощностей P_1 , P_2 и КПД η (см. выше).

Примеры расчетов характеристик ДПТ

Пример 1. ДПТ с последовательно - параллельным возбуждением Д21 имеет следующие номинальные характеристики при $U_{ПН} = 220$ В: $P_{2Н} = 5500$ Вт, $I_{Н} = 31,5$ А, $n_{Н} = 1450$ об/мин.

ДПТ нагружен номинальным моментом $M = M_{Н}$ и питается пониженным напряжением: $U_{П} = 0,8 \cdot U_{ПН} = 176$ В.

Приняли: $f = 0,15$, $\alpha = 0,229$, $\beta = 0,988$, $\gamma = 0,242$ (см. выше), $\Delta U_{Щ} = 1,5$ В, $\xi = 0,98$, $\varepsilon = 0,61$, $v = 1,6$.

Предварительно определили:

$U_{Н} = 218,5$ В, $I_{ЯН} = 31,0$ А, $R = 0,81$ Ом, $E_{Н} = 193,4$ В, $P_{ОН} = 499$ Вт.

Для $U = 176$ В и $M = M_{Н}$, рассчитали: $U = 174,5$ В, $K = 5500$ Вт, $b = 0,027$ 1/А, $c = 0,12$.

Затем решили систему уравнений (5) и (6) и получили значения:

$I_{Я} = 31,3$ А, $\bar{n} = 0,785$, $n = 1138$ об/мин.

Наконец рассчитали и получили значения:

$$I = 31,7 \text{ А}, \quad P_1 = 5579 \text{ Вт}, \quad P_2 = 4317 \text{ Вт}, \quad \eta = 0,774.$$

Пример 2. Для того же ДПТ кроме значения $U_{П} = U_{ПН} = 220$ В и равенства $M = M_{Н}$ дополнительно задано значение скорости вращения вала $n = 1600$ об/мин. ($\bar{n} = 1,103$).

Сразу рассчитали якорный ток по формуле (9) и получили значение $I_{\text{я}} = 35,0$ А. Далее по формулам (8), (3), (12) последовательно рассчитали и получили значения $\phi = 0,891$, $i_{\text{в}} = 0,810$, $I_{\text{вс}} = 23,65$ А. Наконец рассчитали и получили значения:

$$I = 35,5 \text{ А}, P_1 = 7810 \text{ Вт}, P_2 = 6067 \text{ Вт}, \eta = 0,777.$$

Приложение

Определение отношения f МДС обмоток возбуждения

В случае наличия серийного ДПТ, желательно той же серии, что и ДПТ – объект расчета, значение характеристики f в формуле (1) для относительного тока возбуждения $i_{\text{в}}$ можно и нужно определить по результатам испытания этого ДПТ, хотя бы по результатам опыта холостого хода ДПТ. Предварительно измеряют сопротивление якорной цепи R и номинальный ток в параллельной ОВ $I_{\text{ян}}$, рассчитывают номинальные значения напряжения $U_{\text{н}}$, якорного тока $I_{\text{ян}}$ и ЭДС $E_{\text{н}}$ (см. выше). При номинальном напряжении питания ($U_{\text{п}} = U_{\text{пн}}$, $U = U_{\text{н}}$) и $M = 0$ измеряют скорость вращения вала двигателя n и якорный ток $I_{\text{я}}$. Рассчитывают значения относительной скорости $\bar{n}$ как $n/n_{\text{н}}$ и относительного магнитного потока ϕ по формуле (8). Определяют значение относительного потока возбуждения $i_{\text{в}}$ по графику $\phi(i_{\text{в}})$ или по формуле (3). Наконец рассчитывают значение отношения f по формуле:

$$f = \frac{i_{\text{в}} - I_{\text{я}} / I_{\text{ян}}}{1 - I_{\text{я}} / I_{\text{ян}}},$$

вытекающей из формулы (1).

Заключение

Материалы статьи позволяют проводить расчеты характеристик ДПТ со смешанным возбуждением для различных условий работы, используя только каталожные данные, причем без применения итерационных процедур.

Список литературы

- [1]. Копылов И.П., Клоков Б.К. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т. Т. 1. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. М.: Энергоиздат. 1988. 455с.
- [2]. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов вузов. Изд. 2, перераб. и доп. Л.: Энергия. 1974. 840с.
- [3]. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа. 2002 . 607 с.
- [4]. Герасимов В.Г. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат. 1987. 253с.