

Г. П. ЛЫЩИНСКИЙ
Кандидат технических наук

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В СПЕЦИАЛЬНОЙ СХЕМЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Характерной особенностью двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением является зависимость потока возбуждения от тока нагрузки. Вследствие этого при малых нагрузках скорость вращения может получить недопустимо большое значение.

Регулировочные возможности двигателя с последовательным возбуждением более ограничены, чем, например, у двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, что объясняется зависимостью между током якоря и потоком.

Практически скорость двигателя можно регулировать:

а) в обычной схеме включения — дополнительным сопротивлением в цепи якоря машины и изменением подводимого к зажимам двигателя напряжения;

б) в специальной схеме включения — шунтированием обмотки якоря и шунтированием обмотки возбуждения.

Изменение скорости за счет подведенного к зажимам двигателя напряжения применяется редко (в основном для привода некоторых типов металлорежущих станков и транспортных механизмов).

В установках электрической тяги, в крановых приводах и в некоторых других случаях регулирование скорости осуществляют путем изменения величины дополнительного сопротивления, включенного в цепь якоря. Это позволяет получить более благоприятные механические характеристики двигателя.

Шунтирование якоря двигателя обеспечивает скорость идеального холостого хода, а следовательно, и безопасную работу машины при малых нагрузках. Кроме того, шунтирование якоря позволяет перевести машину в рекуперативный режим и работать параллельно с электрической сетью.

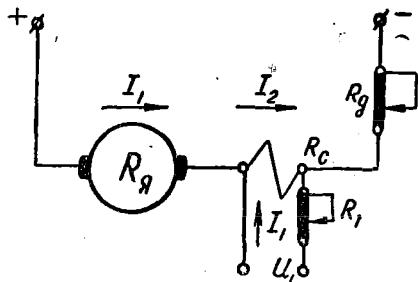
Если на некотором участке работы требуется получить от производственного механизма повышение скорости вращения для того, чтобы быстрее отработать заданный путь, производят шунтирование обмотки возбуждения. Такая схема, например, применяется для электропривода кривошипных ножниц, когда после реза механизм возвращается в исходное положение.

В настоящей работе рассматривается способ регулирования скорости двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, который позволяет получить механические характеристики, аналогичные характеристикам в схемах с шунтированием обмотки якоря и обмотки возбуждения.

Принципиальная схема включения представлена на рис. 1.

В схеме приняты обозначения:

U — напряжение сети; U_1 — напряжение вспомогательного источника тока; R_x, R_c — сопротивления якоря и обмотки возбуждения; R_g — дополнительное сопротивление; R_1 — регулировочное сопротивление.



Таким образом, в предлагаемой схеме обмотка возбуждения подмагничивается от дополнительного источника тока.

Для выхода механической и скоростной характеристик реакцией якоря пренебрегаем.

На основании законов Кирхгофа составим исходные уравнения:

Рис. 1. Принципиальная схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

$$I_2 = I + I_1, \quad [1]$$

$$U = E + I \cdot (R_x + R_g) + I_2 \cdot R_c, \quad [2]$$

$$U_1 = I_2 \cdot R_c + I_1 \cdot R_1. \quad [3]$$

Решая уравнения [1] и [3], получим следующие значения токов

$$I_1 = \frac{U_1 - I \cdot R_c}{R_1 + R_c}; \quad [4]$$

$$I_2 = \frac{U_1 + I R_1}{R_1 + R_c} \quad [4a]$$

и уравнение равновесия напряжений в якорной цепи

$$U = E + I(R_x + R_g + R_c) + R_c \frac{U_1 - I R_c}{R_1 + R_c}. \quad [5]$$

Подставим в уравнение [5] значение электродвижущей силы

$$E = k_e \cdot n \cdot \phi',$$

где ϕ' — магнитный поток, созданный током возбуждения, т. е. алгебраической суммой токов $I + I_1$; k_e — конструктивная постоянная машины по э. д. с., равная

$$k_e = \frac{p \cdot N}{a \cdot 60} 10^{-8};$$

p — число пар полюсов машины; N — число активных проводников обмотки якоря; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

После некоторых преобразований получим уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{1}{k_e \phi'} [U - I(R_x + R_g + R_c)] - \frac{U_1 - I R_c}{k_e \phi' (R_1 + R_c)} R_c. \quad [6]$$

Если подставить значение тока, выраженное через момент

$$I = \frac{M}{k_e \phi'},$$

получим уравнение для механической характеристики двигателя

$$n = \frac{1}{\kappa_e \phi'} \left(U - U_1 \frac{R_c}{R_1 + R_c} \right) - \frac{M}{\kappa_e \kappa_m \phi'^2 (R_1 + R_c)} [(R_\pi + R_g)(R_1 + R_c) + R_c R_1], \quad [7]$$

где k_m — конструктивная постоянная машины по моменту.

Проанализируем уравнение [6]. Примем регулировочное сопротивление $R_1 = \infty$. При этом получим обычную схему включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Уравнение [6] принимает вид

$$n = \frac{U}{\kappa_e \phi'} - I \frac{R_\pi + R_c + R_g}{\kappa_e \phi'}. \quad [6a]$$

Магнитный поток ϕ создается в данном случае только током нагрузки I . Если регулировочное сопротивление $R_1 = 0$,

$$n = \frac{1}{\kappa_e \phi'} [U - I(R_\pi + R_c + R_g)] - \frac{U_1 - IR_c}{\kappa_e \phi'}. \quad [6b]$$

Знак перед вторым членом уравнения зависит от полярности подключения источника питания, подмагничивающего обмотку возбуждения. В зависимости от этого знака скоростная характеристика на графике будет располагаться выше или ниже естественной скоростной характеристики, получаемой в обычной схеме включения.

Если нагрузка на валу машины равна нулю, т. е. поток возбуждения создается только за счет тока I_2 , а ток $I = 0$, то уравнение [6] можно преобразовать так

$$n_0 = \frac{1}{\kappa_e \phi'}. \quad [8]$$

Уравнение [8] представляет собой скорость идеального холостого хода, позволяющего перевести машину на генераторный режим и работать параллельно с электрической сетью. Анализируя уравнение скорости идеального холостого хода нетрудно сделать вывод, что n_0 не зависит от величины дополнительного сопротивления, включенного в цепь якоря. Скорость идеального холостого хода прямо пропорциональна напряжению дополнительного источника U_1 и обратно пропорциональна регулировочному сопротивлению R_1 . Знак перед вторым членом уравнения [8] зависит от полярности включения дополнительного источника тока. Если изменить полярность источника тока, то, записав исходные уравнения с учетом изменения протекания тока I_1 и решив их, получим следующие значения токов

$$I_1 = \frac{U_1 + IR_c}{R_1 + R_c}; \quad I_2 = \frac{IR_1 - U_1}{R_1 + R_c}. \quad [9]$$

Уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{1}{\kappa_e \phi'} [U - I(R_\pi + R_g + R_c)] + \frac{U_1 + I R_c}{\kappa_e \phi' (R_1 + R_c)} \cdot R_c. \quad [10]$$

Если нагрузка на валу машины равна нулю (скорость идеального холостого хода), то $I = 0$, а $I_2 = -\frac{U_1}{R_1 + R_c} = -I_1$.

При этом направление магнитного потока изменится, машина переманитится и скорость идеального холостого хода будет равна

$$n_0 = \frac{1}{k_{\text{эф}}'} \left[U + U_1 \cdot \frac{R_c}{R_c + R_1} \right]. \quad [11]$$

В заключение отметим достоинства и недостатки предлагаемой схемы.

Регулируя величиной напряжения U_1 и сопротивлением R_1 , а также меняя полярность включения дополнительного источника напряжения, от схемы можно получить семейство характеристик, аналогичное двум схемам — схеме с шунтированием обмотки якоря и схеме с шунтированием обмотки возбуждения. В схеме включения с подмагничиванием обмотки возбуждения не нужны шунтирующие реостаты, контролер для переключения или регулирующая аппаратура (контакты). Недостатком схемы следует считать необходимость дополнительного источ-

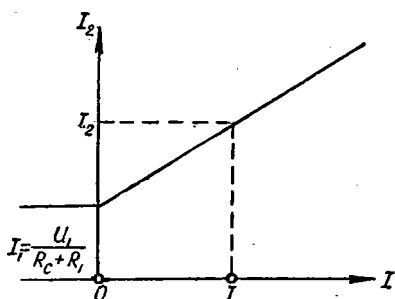


Рис. 2. График зависимости $I_2 = f [I]$

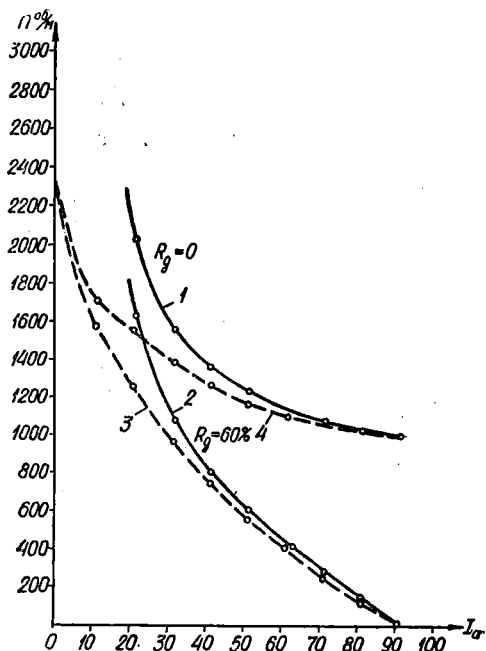


Рис. 3. Скоростные характеристики двигателя в обычной и специальной схемах включения.

1. Естественная характеристика двигателя; 2. $R_g = 60\%$
 $U_1 = 24$ в; $R_g = 0$; $U_1 = 25$ в.

ника тока, который должен обладать достаточной мощностью. Вследствие того, что регулирование скорости напряжением U_1 и сопротивлением R_1 производится при малых нагрузках (аналогично схемам с шунтированием обмотки возбуждения и якоря), магнитная система машины не насыщена, и всякое изменение тока возбуждения будет сказываться на скорости двигателя. Регулирование скорости машины при малых нагрузках уменьшает мощность источника дополнительного питания. Согласно расчету и экспериментальным данным мощность источника тока для подмагничивания обмотки возбуждения равна 7—10 проц. от номинальной мощности машины.

На основании сказанного выше можно предположить следующую методику расчета скоростных и механических характеристик, если известны паспортные и обмоточные данные машины, сопротивления обмоток якоря и возбуждения. Величинами напряжения дополнительного источника, сопротивлениями R_g и R_1 задаются из соображений получения необхо-

димой жесткости характеристики. Результаты расчета удобнее всего свести в таблицу.

По уравнению [4а] строим график зависимости $I_2 = f(I)$ (рис. 2). Поскольку выражение [4а] является уравнением прямой линии, то достаточно определить любые две точки. Задавая ток нагрузки I по графику (рис. 2), определяем ток I_2 , которому соответствует на кривой намагничивания поток ϕ' . По обмоточным данным машины определяем конструктивный коэффициент — k_e и произведение $k_e \phi'$, а далее по выражению [6] находим скорость вращения двигателя. Результаты расчета представляем в виде графиков.

Приложение: Паспортные данные машины: $U = 220$ в, $I_n = 62$ а, $n_n = 1130$ об/мин, $R_n = 0,18$ ом, $R_c = 0,14$ ом. Кривая намагничивания задана таблицей 1.

Таблица 1

Таблица кривой намагничивания железа двигателя

$I\%$	20	40	60	80	100	120	140	160
$\phi\%$	40	70	84	94	100	107	110	112

Рассчитаем:

1. Естественную скоростную характеристику — $n = f(I)$;

2. Реостатную характеристику при $R_g = 60\% R_n$;

3. Скоростные характеристики в специальной схеме включения.

Обычным способом, пользуясь кривой намагничивания, рассчитаем естественную и реостатную характеристики. Результаты расчета сведем соответственно в таблицы 2 и 3, по которым на рис. 3 построены кривые 1 и 2.

Таблица 2.

Расчетная таблица зависимости $n = f(I)$

I	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$k_e \phi$	0,059	0,1	0,13	0,15	0,166	0,17	0,185	0,191	0,195
n	3690	2025	1550	1355	1230	1130	1068	1020	980

Таблица 3

Расчетная таблица зависимости $n = \varphi(I)$ при $R_g = 60\% R_n$

I	10	20	30	40	50	60	70	80	90
n	3320	1628	1080	800	600	415	265	130	00

Для расчета характеристик в схеме с подмагничиванием обмотки возбуждения принимаем следующие величины: $U_1 = 24$ в, $R_1 = 2$ ом, $R_g = 0,0$. Пользуясь выраженным методом расчета, определим скорость машины. Данные расчета сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Расчетная таблица зависимости $n = \psi(I)$ для $U = 24b$, $R_1 = 2 \text{ ом}$, $R_g = 0$

I	10	20	30	40	50	60	70	80	90
I_2	20,55	29,9	39,2	48,6	57,9	67,2	76,7	86,2	94,2
$\kappa_{\text{эфф}'}$	0,12	0,135	0,152	0,165	0,175	0,183	0,189	0,194	0,197
n	1570	1265	960	740	557	400	256	134	-2,5

По данным таблицы 4 на рис. 3 построена характеристика 3. Там же построена характеристика 4 для случая $R_g = 2,13 \text{ ом}$ (60% от R_n) $U_1 = 24 \text{ в}$.

Результаты расчета сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Расчетная таблица зависимости $n \alpha(I)$ для $U_1 = 24b$, $R_1 = 60\% R_n$, $R_g = 2,13 \text{ ом}$

I	10	20	30	40	50	60	70	80	90
I_2	20,95	29,9	39,2	48,6	57,9	62,7	76,7	86,2	94,2
$\kappa_{\text{эфф}'}$	0,125	0,135	0,152	0,165	0,175	0,183	0,189	0,194	0,197
n	1720	1570	1380	1255	1170	1095	1045	1000	970

По выражению [8] определим скорость идеального холостого хода.

$$\text{Ток } I_2 = I_1 = \frac{24}{0,14 + 2,13} \cong 10,6 \text{ а } \kappa_{\text{эфф}'} = 0,09.$$

$$\text{Тогда } n_0 = \frac{1}{0,09} [220 - 24 \cdot 0,06] = 2400 \text{ об/мин.}$$

Если увеличить напряжение дополнительного источника тока, то скорость идеального холостого хода будет меньше. Например, при напряжении $U_1 = 48 \text{ в}$, $n_0 = 2000 \text{ об/мин}$.