

К РАСЧЕТУ РЕОСТАТА ПОЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Л. И. ГАНДЖА

Поскольку скорость двигателя постоянного тока параллельного или независимого возбуждения можно регулировать изменением магнитного потока, зависимость которого от тока возбуждения выражается кривой намагничивания, расчёт регулировочного реостата, включаемого в цепь параллельной или независимой обмотки возбуждения, сводится к определению значений тока возбуждения на всех ступенях скорости двигателя. Сопротивления ступеней (или секций) реостата определяются величиной напряжения, приложенного к цепи обмотки возбуждения, и упомянутыми выше значениями тока возбуждения на заданных ступенях скорости двигателя.

Реостат поля должен быть рассчитан так, чтобы, с одной стороны, выдерживался заданный ряд скоростей, а с другой — заданный приводимым механизмом закон регулирования скорости. Последний может быть различным: регулирование может осуществляться при постоянном моменте, при постоянной мощности или при наличии какой-либо более сложной зависимости мощности или момента от скоростей заданного регулировочного ряда; он определяется исключительно видом зависимости, характеризующей приводимый механизм:

$$M_{ст} = f(n),$$

где

$M_{ст}$ — статический момент, приведенный к валу двигателя, и n — число оборотов в минуту приводного двигателя.

Ниже приводится наиболее общий метод расчёта реостата поля, пригодный для любого вида характеристики $M_{ст} = f(n)$.

На фиг. 1 представлены естественная механическая характеристика двигателя при $\Phi_n^{0.0} = 100\%$, искусственная при $\Phi_{н.т}^{0.0} < \Phi_n^{0.0}$ и характеристика $M_{ст}^{0.0} = f(n^{0.0})$. Очевидно, что скорости $n_n^{0.0}, \dots, n_{н.т}^{0.0}, \dots$ принадлежат заданному регулировочному ряду (здесь и далее индекс t означает соответствие данной величины t -ой ступени регулирования).

Искусственная характеристика, соответствующая ослабленному магнитному потоку $\Phi_{н.т}$, выражается уравнением

$$n_n = \frac{U_n - I_n \cdot r_d}{c_e \Phi_{н.т}}, \quad (1)$$

которое, будучи написано для случая установившегося режима при скорости $n_{н.т}$ на рассматриваемой t -ой ступени регулирования, имеет вид:

$$n_{н.т} = \frac{U_n - I_{н.т} \cdot r_d}{c_e \cdot \Phi_{н.т}}, \quad (2)$$

где

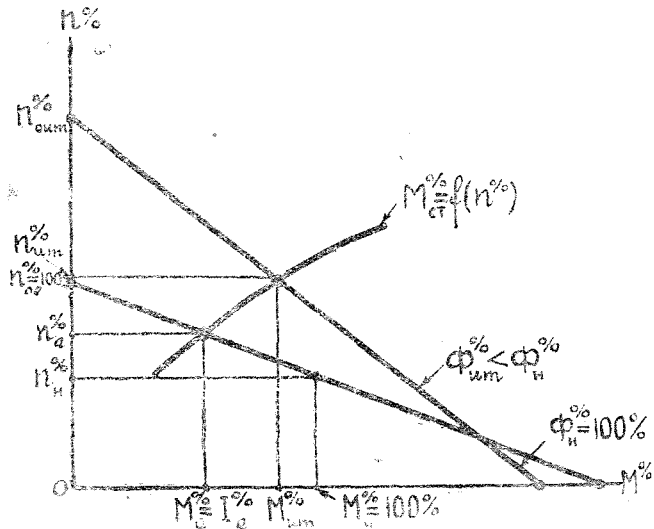
r_d — полное внутреннее сопротивление цепи якоря двигателя,

U_n — номинальное напряжение двигателя,

$I_{u.m}$ — ток якоря при работе двигателя на m -ой искусственной характеристике со скоростью $n_{u.m}$ и

c_e' — коэффициент пропорциональности между противо-э.д.с. двигателя и произведением $n_{u.m} \cdot \Phi_{u.m}$, определяемый как

$$c_e' = \frac{U_H}{\Phi_H \cdot n_{oe}} \quad (3)$$



Фиг. 1

При переводе двигателя со скорости n_e на скорость $n_{u.m}$ ток его изменится, согласно фиг. 1, от значения I_e до значения $I_{u.m}$ в отношении

$$\frac{M_{u.m}}{M_e}$$

за счёт изменения статического момента по характеристике $M_{ст} = f(n)$ и в отношении

$$\frac{\Phi_H}{\Phi_{u.m}}$$

за счёт изменения магнитного потока. Таким образом будем иметь:

$$I_{u.m} = I_e \frac{M_{u.m}}{M_e} \cdot \frac{\Phi_H}{\Phi_{u.m}}, \quad (4)$$

а после подстановки (3) и (4) в (2) получим

$$n_{u.m} = \frac{U_H - I_e \cdot \frac{\Phi_H}{\Phi_{u.m}} \cdot \frac{M_{u.m}}{M_e} \cdot r_D}{\Phi_{u.m} \cdot \frac{U_H}{\Phi_H \cdot n_{oe}}},$$

откуда

$$\frac{n_{u.m}}{n_{oe}} = \frac{\frac{U_H}{U_H} - \frac{I_e}{U_H} \cdot \frac{\Phi_H}{\Phi_{u.m}} \cdot \frac{M_{u.m}}{M_e} \cdot r_D}{\frac{\Phi_{u.m}}{\Phi_H}} \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет получить конечный результат в более простой форме, если все величины, входящие в него, выразить в процентных значениях. Для этого примем за 100% величины n_{oe} , U_n , I_n , Φ_n , M_n и R_n и представим (5) в виде:

$$100 \cdot \frac{n_{u,m}}{n_{oe}} = \frac{\left(\frac{U_n}{U_n} \cdot \frac{I_e}{U_n} \cdot \frac{I_n}{I_n} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{u,m}} \cdot \frac{M_{u,m}}{M_n} \cdot \frac{M_n}{M_e} \cdot r_{\partial} \cdot \frac{100}{100} \cdot \frac{100}{100} \right) \cdot 100}{\frac{\Phi_{u,m}}{\Phi_n} \cdot 100} \cdot 100,$$

тогда

$$n_{u,m}^{o\%} = \frac{10^4 \cdot I_e^{o\%} \cdot r_{\partial}^{o\%} \cdot M_{u,m}^{o\%}}{\Phi_{u,m}^{o\%} \cdot M_e^{o\%}} \cdot \frac{10^2}{\Phi_n^{o\%}} \quad (6)$$

Выражение (6) может быть представлено в виде следующего квадратного уравнения, если иметь в виду, что при $\Phi = \Phi_n$, $I_e^{o\%} = M_e^{o\%}$:

$$(\Phi_{u,m}^{o\%})^2 - \frac{10^4}{n_{u,m}^{o\%}} \cdot \Phi_{u,m}^{o\%} + \frac{r_{\partial}^{o\%} \cdot M_{u,m}^{o\%}}{n_{u,m}^{o\%}} \cdot 100 = 0, \quad (7)$$

откуда

$$\Phi_{u,m}^{o\%} = \frac{5 \cdot 10^3}{n_{u,m}^{o\%}} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{r_{\partial}^{o\%} \cdot M_{u,m}^{o\%} n_{u,m}^{o\%}}{10^6}} \right). \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет расчётным путем найти значение магнитного потока, соответствующего скорости и нагрузке двигателя на данной ступени регулирования.

Общий характер зависимости $\Phi_{u,m}^{o\%} = f(n_{u,m}^{o\%})$ графически представлен на фиг. 2. Как это видно из (8) и фиг. 2, в области скоростей от 0 до $n_{u, макс}^{o\%}$ магнитный поток может принимать два значения; в точке a , для которой $n_{u,m}^{o\%} = n_{u, макс}^{o\%}$, магнитный поток имеет однозначное значение, определяемое из (8) на основании того, что при

$$1 - 4 \frac{r_{\partial}^{o\%} \cdot M_{u, макс}^{o\%} \cdot n_{u, макс}^{o\%}}{10^6} = 0,$$

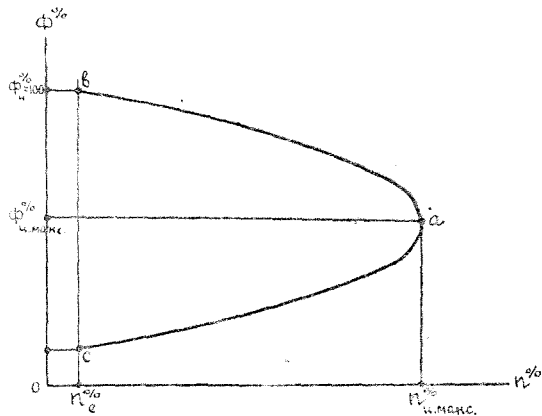
$$n_{u, макс}^{o\%} = \frac{0,25 \cdot 10^6}{r_{\partial}^{o\%} \cdot M_{u, макс}^{o\%}} \quad (9)$$

и

$$\Phi_{u, макс}^{o\%} = \frac{5 \cdot 10^3}{n_{u, макс}^{o\%}}, \quad (10)$$

где индекс *макс* характеризует максимальную скорость и значения прочих величин, ей соответствующих.

Фиг. 2 и выражение (8) дают возможность заключить, что скорость двигателя возрастает при ослаблении магнитного потока не безгранично, а до некоторого предела, определяемого точкой a и уравнениями (9) и (10). При дальнейшем ослаблении магнитного потока скорость начинает уменьшаться. Однако этот предел повышения скорости лежит вне области допустимых для двигателя скоростей и практически его достигнуть нельзя без ущерба для машины.



Фиг. 2

Таким образом ветвь *av* кривой фиг. 2 характеризует собой область реально допустимых режимов работы двигателя, ветвь же *ac* характеризует область режимов, не допустимых для него.

В соответствии со сказанным знак перед корнем в (8) должен быть выбран такой, чтобы получаемые при расчётах значения магнитных потоков соответствовали бы ветви *av*, определяющей область допустимых для двигателя режимов. Это условие может быть, очевидно, представлено как

$$\Phi_n \geq \Phi_{u.m} > \Phi_{u.макс.} \quad (11)$$

Полагая на основании (11)

$$\Phi_{u.m} = \Phi_n$$

и имея в виду, что при этом (фиг. 1)

$$n_{u.m} = n_e,$$

$$M_{u.m} = M_e,$$

представим (8) в виде

$$\Phi_n^{o_0} = \frac{5 \cdot 10^3}{n_e^{o_0}} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{r_{\partial}^{o_0} \cdot M_e^{o_0} \cdot n_e^{o_0}}{10^6}} \right). \quad (12)$$

Если в общем случае двигатель на естественной характеристике работает в режиме, отличном от номинального, то, согласно фиг. 1,

$$\frac{M_e^{o_0}}{M_n^{o_0}} = \frac{n_{o.e}^{o_0} - n_e^{o_0}}{n_{o.e}^{o_0} - n_n^{o_0}} = k,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} M_e^{o_0} &= k \cdot M_n^{o_0} = k \cdot 100, \\ n_e^{o_0} &= n_{o.e}^{o_0} - k(n_{o.e}^{o_0} - n_n^{o_0}) = 100 - k(100 - n_n^{o_0}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12) и имея в виду, что

$$r_{\partial}^{o_0} = 100 - n_n^{o_0},$$

получим

$$\Phi_n^{o_0} = \frac{5 \cdot 10^3}{100 - k(100 - n_n^{o_0})} \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{(100 - n_n^{o_0}) \cdot k \cdot [100 - k(100 - n_n^{o_0})]}{10^4}} \right\},$$

или

$$\Phi_n^{o_0} = \frac{5 \cdot 10^3}{100 - k(100 - n_n^{o_0})} \left\{ 1 \pm \frac{1}{10^2} \sqrt{[10^2 - 2 \cdot k \cdot (100 - n_n^{o_0})]^2} \right\},$$

или

$$\Phi_n^{o_0} = \frac{5 \cdot 10}{100 - k(100 - n_n^{o_0})} \left\{ 100 \pm [100 - 2 \cdot k \cdot (100 - n_n^{o_0})] \right\}, \quad (14)$$

откуда видно, что при выборе знака \pm уравнение (14) обращается в тождество

$$\Phi_n^{o_0} = 100 \text{ \%}.$$

Таким образом, при расчётах по (8) для всех реальных случаев регулирования скорости электропривода следует перед корнем принимать знак \pm .

В частном случае, если привод работает на естественной характеристике при номинальном режиме,

$$k = 1,$$

и выражение (14) обращается в

$$\Phi_n^{a_0} = \frac{5.10}{n_n^{a_0}} \left\{ 100 \pm [100 - 2(100 - n_n^{a_0})] \right\}, \quad (15)$$

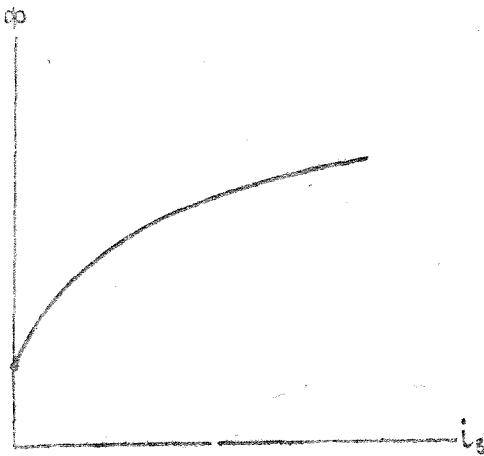
откуда также следует, что при выборе знака $+$ (15) обращается в тождество

$$\Phi_n^{a_0} = 100 \text{ \%}.$$

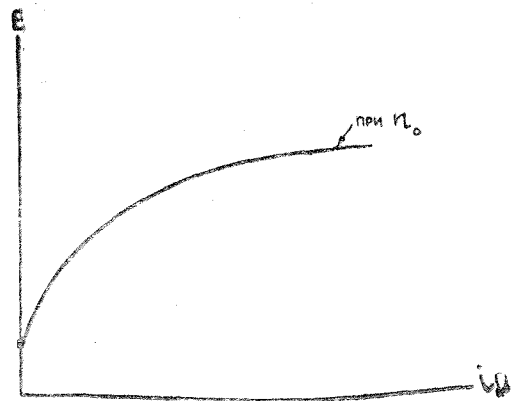
Для расчёта ступеней или секций реостата необходимо иметь кривую намагничивания данной машины (фиг. 3)

$$\Phi = f(i_a).$$

Последняя получается из опыта весьма просто, если пользоваться по-прежнему процентными значениями величин.



Фиг. 3



Фиг. 4

Если снять характеристику холостого хода машины при независимом возбуждении (фиг. 4)

$$E = f(i_a)$$

при вращении ее со скоростью n_0 , то, имея в виду, что

$$E = c_e' \cdot \Phi \cdot n_0,$$

$$U_n = c_e' \cdot \Phi_n \cdot n_0,$$

получим

$$100 \frac{E}{U_n} = 100 \frac{\Phi}{\Phi_n},$$

или

$$E^{n_0} = \Phi^{a_0}.$$

Если характеристика холостого хода снята при

$$n = k_1 \cdot n_0,$$

то

$$E = c_e' \cdot \Phi \cdot n,$$

$$U_N = c_e' \cdot \Phi_N \cdot n_0,$$

$$\frac{E}{U_N} \cdot 100 = \frac{\Phi}{\Phi_N} \cdot \frac{n}{n_0} \cdot 100,$$

или

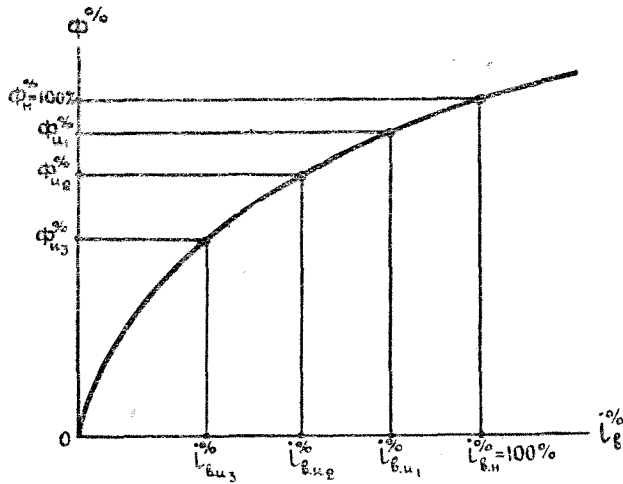
$$E^{o/o} = k_1 \cdot \Phi^{o/o}.$$

Приведенные соотношения дают возможность перейти от характеристики холостого хода (фиг. 4) к кривой намагничивания (фиг. 5)

$$\Phi^{o/o} = f(i_a).$$

Если далее значения магнитного потока определены по (8) для заданного регулировочного ряда

$$n_{e_1}^{o/o}, n_{u_1}^{o/o}, n_{u_2}^{o/o}, n_{u_3}^{o/o}, \dots,$$



Фиг. 5

как

$$\Phi_N^{o/o}, \Phi_{u_1}^{o/o}, \Phi_{u_2}^{o/o}, \Phi_{u_3}^{o/o}, \dots,$$

то по кривой фиг. 5 определяются соответствующие значения тока возбуждения

$$i_{в.н}^{o/o}, i_{в.у_1}^{o/o}, i_{в.у_2}^{o/o}, i_{в.у_3}^{o/o}, \dots,$$

где за 100 % принят номинальный ток возбуждения. Зная номинальное напряжение обмотки возбуждения $U_{в.н}$, получим сопротивления ступеней реостата в омах

$$R_1 = \frac{U_{в.н} \cdot 100}{i_{в.н_1}^{o/o} \cdot i_{в.н}^{o/o}} - r_{о.в},$$

$$R_2 = \frac{U_{в.н} \cdot 100}{i_{в.н_2}^{o/o} \cdot i_{в.н}^{o/o}} - r_{о.в},$$

$$R_3 = \frac{U_{в.н} \cdot 100}{i_{в.н_3}^{o/o} \cdot i_{в.н}^{o/o}} - r_{о.в}$$

и т. д.

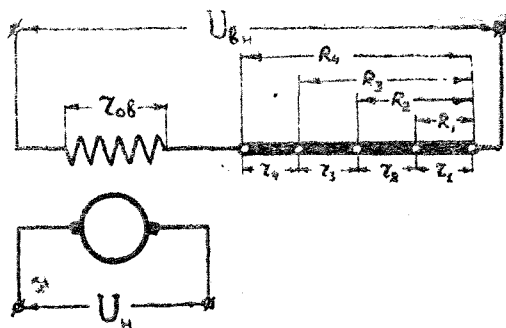
Сопротивления секций реостата определяются (фиг. 6) как

$$r_1 = R_1,$$

$$r_2 = R_2 - R_1,$$

$$r_3 = R_3 - R_2$$

и т. д.



Фиг. 6

Выводы

1. В результате исследования дается общий метод расчёта регулировочных реостатов для двигателей параллельного и независимого возбуждения при любом виде зависимости $M_{em} = f(n)$.

2. Показано, что при ослаблении магнитного потока скорость возрастает не безгранично, а только до определенного предела $n_{и.макс}$, после которого она начинает уменьшаться при дальнейшем уменьшении магнитного потока.

3. Применение метода выражения значений всех величин в процентах позволило получить простые рабочие формулы, необходимые для расчёта регулировочных реостатов.