

Согласно условию пуска, вращающий момент после переключения должен быть равен пусковому вращающему моменту. Допустим, пусковой момент выбран в соответствии с (1.2), тогда

$$\frac{2B}{\frac{s_{пер}}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_{пер}}} = \frac{2Bs_{кр}}{1 + s_{кр}^2}. \quad (1.3)$$

После преобразований получаем квадратное уравнение относительно $s_{пер}$:

$$s_{пер}^2 - s_{пер}(1 + s_{кр}^2) + s_{кр}^2 = 0. \quad (1.4)$$

Решение уравнения (1—4) даёт корни:

$$s_{пер1} = 1; \quad s_{пер2} = s_{кр}^2.$$

Таким образом, при $M_{в.пуск} = M'_{в.пуск}$ скольжение переключения может быть определено весьма просто:

$$s_{пер} = s_{кр}^2. \quad (1.5)$$

Обычно двигатель пускается с $M_{в.пуск}$ отличным от $M'_{в.пуск}$.

Допустим

$$\frac{M_{в.пуск}}{M'_{в.пуск}} = m. \quad (1.6)$$

Тогда

$$s_{пер} = \frac{1 + s_{кр}^2}{m} - \frac{\sqrt{\left(\frac{1 + s_{кр}^2}{m}\right)^2 - 4s_{кр}^2}}{2}. \quad (1.7)$$

Очевидно, при $m = 1$ $s_{пер} = s_{кр}^2$;

при $m = m_{нр} = \frac{1 + s_{кр}^2}{2s_{кр}}$; $s_{пер} = s_{кр}$;

при $m > m_{нр}$ $s_{пер}$ выражается комплексным числом, что не имеет физического смысла.

Таким образом, существует вполне определенное значение $m = m_{нр}$, при котором $s_{пер} = s_{пер.макс} = s_{кр}$

$$m_{нр} = \frac{1 + s_{кр}^2}{2s_{кр}}. \quad (1.8)$$

Для определения $s_{пер}$ при $m \neq 1$ формула (1.7) неудобна, ее можно значительно упростить, принимая во внимание, что при малых скольжениях естественная механическая характеристика двигателя почти прямолинейна. Тогда

$$s_{пер} \approx ms_{кр}^2. \quad (1.9)$$

В самом деле, из чертежа (фиг. 1) имеем:

$$\frac{b'a'}{a'd} = \frac{b''a''}{a''d + c''b''} \approx \frac{b''a''}{a''d}; \quad (1.10)$$

$$c''b'' \approx 0; \quad b'a' = M'_{в.пуск}; \quad a'd = s'_{пер} = s_{кр}^2,$$

$$b''a'' = m M'_{в.пуск}; \quad a''d = s_{пер}.$$

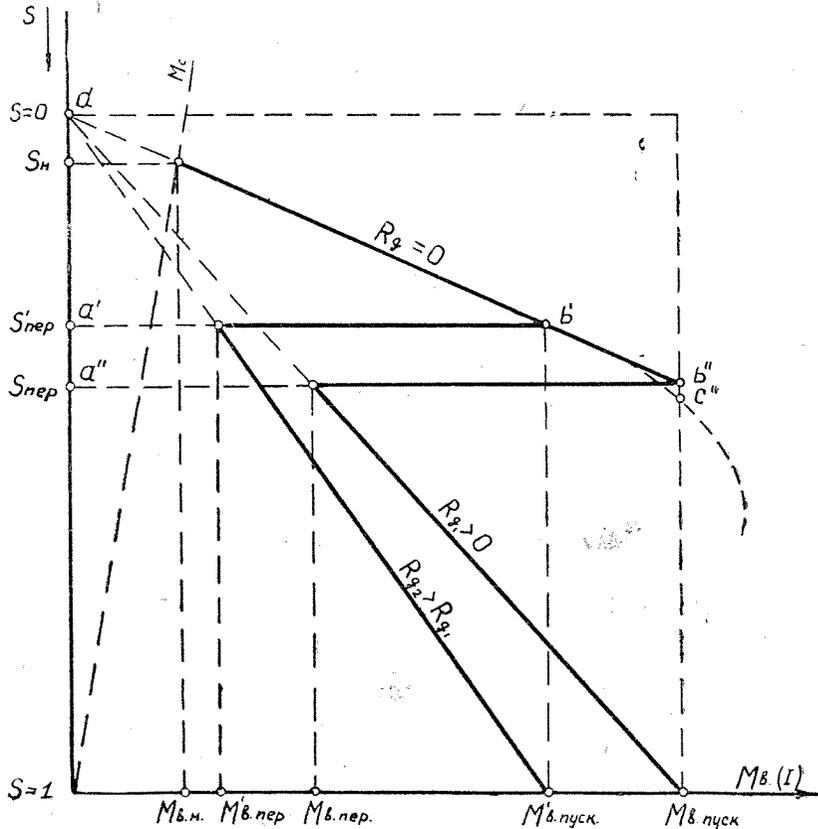
Подставив значения отрезков в пропорцию (1.10), получим:

$$\frac{M'_{в.пуск.}}{s^2_{кр}} \approx \frac{m \cdot M'_{в.пуск.}}{s_{пер}},$$

откуда

$$s_{пер} \approx m s^2_{кр}.$$

Допущенная при этом погрешность не превышает погрешности при графическом определении $s_{пер}$, причем она тем меньше, чем ближе m к единице.



Фиг. 1. Диаграмма пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока с одноступенчатым ускорением

Приведенное добавочное сопротивление, включенное в цепь ротора [1]:

$$R'_g = s'_{кр} \sqrt{r^2_{ec} + x^2_k} - r'_p = s'_{кр} \frac{r'_p}{s_{кр}} - r'_p = r'_p \left(\frac{s'_{кр}}{s_{кр}} - 1 \right), \quad (1.11)$$

где r'_p — приведенное активное сопротивление ротора, $s'_{кр}$ — значение критического скольжения при наличии в цепи ротора добавочного сопротивления R_g :

$$s'_{кр} = \frac{M_{в.макс}}{M_{в.пуск}} = \frac{B}{m M'_{в.пуск}}. \quad (1.12)$$

Подставив (1.2) в (1.12), получим:

$$s'_{кр} = \frac{B(1 + s^2_{кр})}{m \cdot 2B s_{кр}} = \frac{1 + s^2_{кр}}{m \cdot 2s_{кр}}$$

или, учитывая равенство (1.8), будем иметь:

$$s'_{kp} = \frac{m_{np}}{m} \quad (1.13)$$

Подставив полученное значение s'_{kp} в (1.11), найдем

$$R'_g = r'_p \left(\frac{m_{np}}{m s_{kp}} - 1 \right) \quad (1.14)$$

Действительное сопротивление

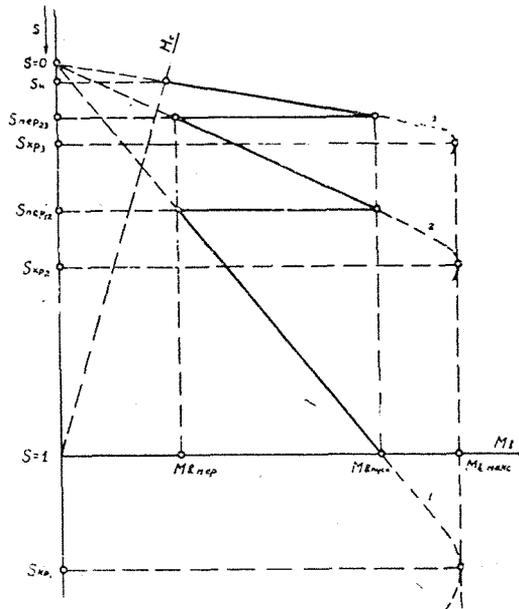
$$R_g = \frac{R'_g}{K^2} \quad (1.15)$$

где K — коэффициент трансформации обмоток.

Определение других величин производится обычным путем.

Пуск с двухступенчатым ускорением

Полученные результаты легко могут быть применены для аналитического расчета пуска с двухступенчатым ускорением. В самом деле, из чертежа (см. фиг. 2) имеем:



Фиг. 2. Пуск с двухступенчатым ускорением

$$\frac{M_{в.пер}}{s_{пер12}} = M_{в.пуск} \quad (2.1)$$

и

$$\frac{M_{в.пуск}}{s_{пер12}} = \frac{M_{в.пер}}{s_{пер23}} \quad (2.2)$$

Погрешность, допущенная при этом, весьма невелика, так как в начальной своей части механические характеристики двигателя почти прямолинейны.

Решая совместно (2.1) и (2.2), получим

$$s_{пер12} = \sqrt{s_{пер23}} \quad (2.3)$$

Скольжение $s_{пер23}$ будет равно скольжению при одноступенчатом пуске, то есть

$$s_{пер23} = m s_{кр3}^2, \quad (2.4)$$

где $s_{кр3}$ — критическое скольжение при $R_g = 0$ (кривая 3).

На основании (1.14) приведенное добавочное сопротивление, включенное в цепь ротора,

$$R'_g = r'_p \left(\frac{m_{np}}{m s_{кр3}} - 1 \right). \quad (2.5)$$

Первая ступень добавочного сопротивления (R'_{g1}) может быть определена из следующих соображений. Критическое скольжение $s_{кр1}$ при наличии в цепи ротора добавочного сопротивления R'_g может быть найдено по известной формуле [1]

$$s_{кр1} = \frac{r'_p + R'_g}{\sqrt{r_{c2}^2 + x_k^2}}. \quad (2.6)$$

Критическое скольжение при наличии в цепи ротора добавочного сопротивления R_{g2} (после первого переключения)

$$s_{кр2} = \frac{r'_p + R'_{g2}}{\sqrt{r_{c2}^2 + x_k^2}} = \frac{r'_p + R'_g - R'_{g1}}{\sqrt{r_{c2}^2 + x_k^2}}. \quad (2.7)$$

Из (2—7) имеем:

$$R'_{g1} = r'_p + R'_g - s'_{кр2} \sqrt{r_{c2}^2 + x_k^2}.$$

Используя равенство (2—6), получим

$$R'_{g1} = (r'_p + R'_g) \cdot \left(1 - \frac{s_{кр2}}{s_{кр1}} \right). \quad (2.9)$$

Из чертежа (фиг. 2) имеем

$$\frac{M_{вмакс}}{s_{кр2}} \approx \frac{M_{в.пуск}}{s_{пер12}}, \quad \text{откуда}$$

$$\frac{s_{кр2}}{\frac{M_{в.макс}}{M_{в.пуск}}} = s_{пер12} = \frac{s_{кр2}}{s_{кр1}}. \quad (2.10)$$

Тогда

$$R'_{g1} = (r'_p + R'_g)(1 - s_{пер12}). \quad (2.11)$$

Аналогично рассуждая, можем получить

$$R'_{g2} = r'_p \left(\frac{m_{np}}{m s_{кр3}} \cdot s_{пер12} - 1 \right) = r'_p \left(\frac{m_{np}}{\sqrt{m}} - 1 \right); \quad (2.12)$$

очевидно,

$$R'_g = R'_{g1} + R'_{g2}.$$

В остальном расчет не отличается от обычного.

Пуск с трехступенчатым ускорением

В этом случае порядок вывода формул аналогичен предыдущему. Расчетные формулы приобретают следующий вид:

1. Скольжения переключений

$$s_{пер12} = \sqrt{s_{пер23}}; \quad (3.1)$$

$$s_{пер23} = \sqrt{s_{пер34}^3}; \quad (3.2)$$

$$s_{пер34} = m s_{кр4}^2. \quad (3.3)$$

2. Критические скольжения

$$S_{kp1} = \frac{m_{np}}{m}; \quad (3.4)$$

$$S_{kp2} = \frac{m_{np}}{m} S_{nep12}, \quad (3.5)$$

$$S_{kp3} = \frac{m_{np}}{m} S_{nep23}, \quad (3.6)$$

$$S_{kp4} = \frac{r'_p}{\sqrt{r_c^2 + x_k^2}}. \quad (3.7)$$

3. Сопротивления ступеней

$$R'_g = r'_p \left(\frac{m_{np}}{m S_{kp4}} - 1 \right), \quad (3.8)$$

$$R'_{g1} = (r'_p + R'_g)(1 - S_{nep12}), \quad (3.9)$$

$$R'_{g2} = (r'_p + R'_g)(1 - S_{nep23}) - R'_{g1}, \quad (3.10)$$

$$R'_{g3} = r'_p \left(\frac{m_{np}}{m S_{kp4}} \cdot S_{nep23} - 1 \right). \quad (3.11)$$

Дальнейший расчет производится с помощью обычных формул.

Следует отметить, что употребляемая выше кратность $m = \frac{M_{в.пуск}}{M'_{в.пуск}}$

вносит некоторую условность, так как обычно пусковой вращающий момент задается кратностью α по отношению к номинальному вращающему моменту, т. е.

$$M_{в.пуск} = \alpha \cdot M_{в.ном} \quad \text{или} \quad M_{в.пуск*} = \alpha. \quad (3.12)$$

Эта условность исчезнет, если выразить m через α .

На основании (1—12) и (1—13) имеем (используя (3.12))

$$S_{kp1} = \frac{M_{в.макс*}}{M_{в.пуск*}} = \frac{m_{np}}{m} = \frac{B}{\alpha},$$

откуда

$$m = \frac{\alpha}{B} m_{np}. \quad (3.13)$$

Покажем применение полученных формул на конкретных примерах.

Пример 1. Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет автоматический пуск в функции тока с одноступенчатым ускорением. Данные двигателя¹⁾:

Перегрузочная способность $B = \frac{M_{в.макс}}{M_{в.ном}} = 3.$

Активное сопротивление статора $r_c = 0,56 \text{ ом}.$

Активное сопротивление ротора $r'_p = 0,52 \text{ ом}.$

Реактивное сопротивление $x_k = x_c + x'_p = 3,5 \text{ ом}.$

¹⁾ Данные двигателя заимствованы из книги И. И. Соловьева „Автоматизация энергетических систем“. ГЭИ, 1950 г.

Коэффициент трансформации $K = \frac{U_{с.ф}}{U_{р.ф}} = 2$.

Пусковой момент $M_{в.пуск} = 2M_{в.ном}$ или $M_{в.пуск*} = 2$.
 Определить величину скольжения $s_{пер}$ и величину добавочного сопротивления R_g .

Расчет.

Критическое скольжение

$$s_{кр} = \frac{r'_p}{\sqrt{r_c^2 + x_k^2}} = \frac{0,52}{\sqrt{0,56^2 + 3,5^2}} = 0,147.$$

Предельная кратность

$$m_{пр} = \frac{1 + s_{кр}^2}{2 \cdot s_{кр}} = \frac{1 + 0,147^2}{2 \cdot 0,147} = 3,47.$$

Кратность пускового момента

$$m = \frac{\alpha}{B} \cdot m_{пр} = \frac{2}{3} m_{пр} = 0,667 m_{пр} = 2,35.$$

Скольжение $s_{пер}$

$$s_{пер} = m \cdot s_{кр}^2 = 2,35 \cdot 0,147^2 = 0,05.$$

Добавочное сопротивление

$$R'_g = r'_p \left(\frac{m_{пр}}{m \cdot s_{кр}} - 1 \right) = 0,52 \left(\frac{1}{0,667 \cdot 0,147} - 1 \right) = 4,78 \text{ ом.}$$

Действительное сопротивление

$$R_g = \frac{R'_g}{K^2} = \frac{4,78}{2^2} = 1,19 \text{ ом.}$$

Полученные результаты хорошо совпадают с графическим расчетом.
 Пример 2. Двигатель мельницы имеет автоматический пуск в функции тока с трехступенчатым ускорением. Произвести расчет параметров пуска.

Данные двигателя¹⁾:

Номинальная мощность $P_n = 368 \text{ квт.}$

Номинальное напряжение $U_n = 3000 \text{ в.}$

Активное сопротивление статора $r_c = 0,461 \text{ ом.}$

Активное сопротивление ротора $r'_p = 0,364 \text{ ом.}$

Реактивное сопротивление $x_k = x_c + x'_p = 5,6 \text{ ом.}$

Коэффициент трансформации $K = 5,55$.

Ток намагничивания $I_n \approx I_{xx} = 26 \text{ а.}$

Соединение обмоток статора и ротора—звезда.

Пусковой момент $M_{в.пуск*} = M_{в.пуск.макс} = B$.

Расчет.

Согласно режиму пуска $m = m_{пр}$.

1. Критическое скольжение

$$s_{кр4} = \frac{r'_p}{\sqrt{r_c^2 + x_k^2}} = \frac{0,364}{\sqrt{0,461^2 + 5,6^2}} = 0,065.$$

¹⁾ Данные взяты из книги И. А. Сыромятникова „Режимы работы асинхронных двигателей“, ГЭИ. 1950 год.

2. Пределная кратность

$$m_{np} = \frac{1 + s_{кр}^2}{2 s_{кр}} = \frac{1 + 0,0042}{2 \cdot 0,065} = 7,7.$$

3. Скольжение переключений

$$\begin{aligned} s_{пер\ 34} &= s_{кр4} = 0,065; \\ s_{пер23} &= \sqrt{\frac{s_{пер34}^3}{s_{пер34}}} = \sqrt{0,065^3} = 0,165; \\ s_{пер12} &= \sqrt{\frac{s_{пер23}^3}{s_{пер23}}} = \sqrt{0,165^3} = 0,405. \end{aligned}$$

4. Полное добавочное сопротивление

$$R'_g = r'_p \left(\frac{m_{np}}{m s_{кр4}} - 1 \right) = 0,364 \left(\frac{1}{0,065} - 1 \right) = 5,25 \text{ ом.}$$

Действительное сопротивление

$$R_g = \frac{R'_g}{K^2} = \frac{5,25}{5,55^2} = 0,174 \text{ ом.}$$

5. Сопротивление первой ступени

$$R'_{g1} = (r'_p + R'_g) (1 - s_{пер12}) = 5,61 (1 - 0,405) = 3,34 \text{ ом.}$$

Действительное сопротивление

$$R_{g1} = \frac{R'_{g1}}{K^2} = \frac{3,34}{5,55^2} = 0,111 \text{ ом.}$$

6. Сопротивление второй ступени

$$R'_{g2} = (r'_p + R'_g) (1 - s_{пер23}) - R_{g1} = 5,61 (1 - 0,165) - 3,34 = 1,36 \text{ ом.}$$

Действительное сопротивление

$$R_{g2} = \frac{R'_{g2}}{K^2} = \frac{1,36}{5,55^2} = 0,045 \text{ ом.}$$

7. Действительное сопротивление третьей ступени

$$R_{g3} = R_g - (R_{g1} + R_{g2}) = 0,174 - (0,111 + 0,045) = 0,018 \text{ ом.}$$

8. Ток в цепи ротора перед моментом закорачивания первой ступени сопротивления

$$\begin{aligned} I'_{p.пер1} &= \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(r_c + \frac{r'_p + R'_g}{s_{пер12}} \right)^2 + x_{2к}^2}} = \\ &= \frac{3000}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{3000}{\sqrt{\left(0,461 + \frac{5,61}{0,405} \right)^2 + 5,6^2}} = 117 \text{ а.} \end{aligned}$$

Согласно условию пуска

$$I'_{p.пер1} = I'_{p.пер2} = I'_{p.пер3} = I'_{p.пер} = 117 \text{ а.}$$

9. Ток в цепи статора (ток срабатывания токового реле)

$$I_c = \sqrt{I'^2_{p.пер} + I_n^2} = \sqrt{117^2 + 26^2} = 120 \text{ а.}$$

10. Ток в цепи ротора после первого переключения

$$I'_{p1} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{\left(r_c + \frac{r'_p + R'_g - R'_{g1}}{S_{пер12}}\right)^2 + x_k^2}} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(0,461 + \frac{5,61 - 3,34}{0,405}\right)^2 + 5,6^2}} = 210 \text{ а.}$$

11. Ток в цепи ротора в начальный момент пуска

$$I'_{p.пуск} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(r_c + r'_p + R'_g)^2 + x_k^2}} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(0,461 + 5,61)^2 + 5,6^2}} = 210 \text{ а.}$$

Согласно условию пуска

$$I'_{p1} = I'_{p.пуск} = 210 \text{ а.}$$

Графический расчет дает результаты, хорошо совпадающие с полученными.

Заключение

По мнению автора, предлагаемый метод расчета позволяет:

1. Ускорить расчет по сравнению с графоаналитическим методом, особенно в случае многоступенчатого пуска.

2. Получить не менее точные результаты, а в двух частных случаях, когда $m = 1$ и $m = m_{пр}$, погрешность обуславливается лишь тем фактом, что естественная механическая характеристика двигателя (1—1) выведена в предположении, что $r_c = 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев И. И. Автоматизация энергетических систем. Госэнергоиздат, 1950.
2. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных двигателей. Госэнергоиздат, 1950.