

**О СПОСОБЕ ВЫВОДА ДВИГАТЕЛЕЙ НА ЕСТЕСТВЕННУЮ
ХАРАКТЕРИСТИКУ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
С ПОВОРОТНЫМ СТАТОРОМ**

И. Я. Иванченко, Е. П. Штепа, Е. К. Нечаев

Харьков

В работе [1] показано, что переключение сопротивлений, включенных последовательно в цепь роторов двух асинхронных двигателей, один из которых имеет поворотный статор, на соединение по схеме «тре-

угольник» (рис. 1) позволяет вывести двигатели на естественную характеристику, однако способ реализации предложенного метода не описан. Указание автора работы [1] на необходимость переключений сопротивлений в цепи роторов при повороте статора на 180 эл.град ничем не обосновано. Как показал опыт, это не всегда приводит к желаемому результату.

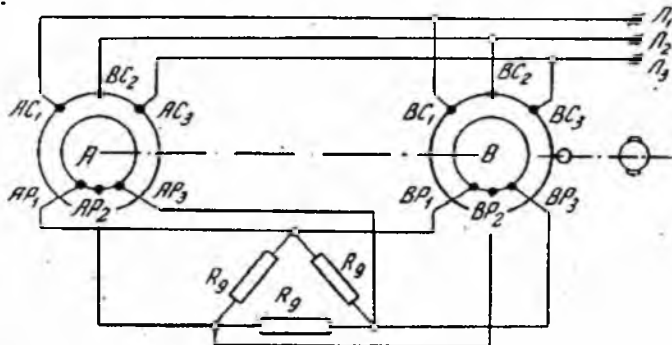


Рис. 1. Схема включения двигателей при соединении сопротивлений в цепи роторов по схеме «треугольник».

Для аналитического определения координаты точки переключения этих сопротивлений рассмотрим схему замещения двигателей (рис. 2). Вводя обозначения

$$R_s = \frac{1}{3} R_A,$$

$$z_1 = r_1 + j(x_0 + x_1),$$

$$z_2 = \frac{r_2}{s} + j(x_0 + x_2'),$$

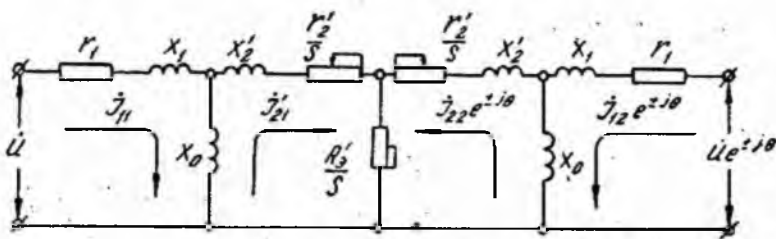


Рис. 2. Схема замещения двигателей.

согласно работе [2] запишем систему уравнений

$$\dot{U} = \dot{I}_{11} z_1 - \dot{I}_{21} j x_0, \quad (1)$$

$$\dot{U} = \dot{I}_{12} z_1 - \dot{I}_{22} j x_0, \quad (2)$$

$$\dot{I}_{11} j x_0 - \dot{I}_{21} z_2 = \frac{R_s'}{s} (\dot{I}_{21}' + \dot{I}_{22}' e^{\pm j\theta}), \quad (3)$$

$$(\dot{I}_{12} j x_0 - \dot{I}_{22} z_2) e^{\pm j\theta} = \frac{R_s'}{s} (\dot{I}_{21}' + \dot{I}_{22}' e^{\pm j\theta}). \quad (4)$$

Фазовые сдвиги всех токов выбираются относительно приложенных к статорам напряжений, причем знак плюс при комплексном показателе соответствует повороту статора по направлению вращения магнитного поля, а знак минус — против вращения магнитного поля.

Из уравнения (2) определяем ток

$$I_{12} = \frac{\dot{U} + I_{22} j x_0}{z_1}.$$

Подставляя это значение в выражение (4), имеем

$$\dot{U} j x_0 e^{\pm j\theta} - (x_0^2 + z_1 z_2) \dot{I}_{22} e^{\pm j\theta} = \frac{R_2}{s} (\dot{I}_{21} + \dot{I}_{22} e^{\pm j\theta}). \quad (5)$$

Аналогично из уравнений (1) и (3) находим

$$\dot{U} j x_0 - (x_0^2 + z_1 z_2) \dot{I}_{21} = \frac{R_2}{s} z_1 (\dot{I}_{21} + \dot{I}_{22} e^{\pm j\theta}). \quad (6)$$

Суммируя уравнения (5) и (6), получаем выражение для тока, протекающего в общем сопротивлении схемы,

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{21} + \dot{I}_{22} e^{\pm j\theta} = \frac{\dot{U} j x_0 (1 + e^{\pm j\theta})}{x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \frac{R_2}{s} \right)}. \quad (7)$$

Подставляем выражение (7) в уравнение (5) и решаем его относительно $\dot{I}_{22}$:

$$\dot{I}_{22} = \frac{\dot{U} j x_0 \left\{ x_0^2 + z_1 \left[z_2 + \frac{R_2}{s} (1 - e^{\mp j\theta}) \right] \right\}}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \frac{R_2}{s} \right) \right] (x_0^2 + z_1 z_2)}. \quad (8)$$

Аналогично

$$\dot{I}_{21} = \frac{\dot{U} j x_0 \left\{ x_0^2 + z_1 \left[z_2 + \frac{R_2}{s} (1 - e^{\pm j\theta}) \right] \right\}}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \frac{R_2}{s} \right) \right] (x_0^2 + z_1 z_2)}. \quad (9)$$

Из уравнений (1), (2) следует

$$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{U}}{z_1} + \dot{I}_{21} \frac{j x_0}{z_1}, \quad (10)$$

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{U}}{z_1} + \dot{I}_{22} \frac{j x_0}{z_1}. \quad (11)$$

Подставляя в уравнение (10), (11) значения токов $\dot{I}_{21}$ и $\dot{I}_{22}$ из выражений (8), (9), получаем после некоторых преобразований

$$\dot{I}_{11} = \dot{U} \frac{x_0^2 \left[z_2 + \frac{R_2}{s} (1 + e^{\pm j\theta}) \right] + z_1 z_2 \left(z_2 + 2 \frac{R_2}{s} \right)}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \frac{R_2}{s} \right) \right] (x_0^2 + z_1 z_2)}. \quad (12)$$

Аналогично

$$\dot{I}_{12} = \dot{U} \frac{x_0^2 \left[z_2 + \frac{R_2}{s} (1 + e^{\mp j\theta}) \right] + z_1 z_2 \left(z_2 + 2 \frac{R_2}{s} \right)}{\left[x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \frac{R_2}{s} \right) \right] (x_0^2 + z_1 z_2)}. \quad (13)$$

Полученные зависимости для токов можно упростить, для чего выражение $x_0^2 + z_1 z_2$ преобразуем к виду

$$x_0^2 + z_1 z_2 = [r_1 + j(x_0 + x_1)] \left(\frac{r_2}{s} + jx_2' \right) + jx_0(r_1 + jx_1).$$

Если теперь в члене $z_1 = r_1 + j(x_0 + x_1)$ пренебречь величиной сопротивления статора r_1 по сравнению с суммой $x_0 + x_1$ и считать, что

$$z_1 \approx j(x_0 + x_1) = jx_0\sigma_1,$$

где $\sigma_1 = \frac{x_0 + x_1}{x_0}$ — коэффициент рассеяния Гопкинсона, то можно записать

$$x_0^2 + z_1 z_2 = jx_0 \left[r_1 + \sigma_1 \frac{r_2'}{s} + j(x_1 + \sigma_1 x_2') \right].$$

Обозначив

$$z = r_1 + \sigma_1 \frac{r_2'}{s} + j(x_1 + \sigma_1 x_2').$$

получим

$$x_0^2 + z_1 z_2 = jx_0 z.$$

Аналогично

$$x_0^2 + z_1 \left(z_2 + 2 \frac{R_2'}{s} \right) = jx_0 \left(z + 2\sigma_1 \frac{R_2'}{s} \right),$$

$$x_0^2 + z_1 \left[z_2 + \frac{R_2'}{s} (1 - e^{\pm j\theta}) \right] = jx_0 \left[z + \sigma_1 \frac{R_2'}{s} (1 - e^{\pm j\theta}) \right].$$

Тогда на основании уравнений (8) и (9) запишем

$$I_{21}' = U \frac{z + \sigma_1 \frac{R_2'}{s} (1 - e^{\mp j\theta})}{z \left(z + 2\sigma_1 \frac{R_2'}{s} \right)}, \quad (14)$$

$$I_{22}' = U \frac{z + \sigma_1 \frac{R_2'}{s} (1 - e^{\mp j\theta})}{z \left(z + 2\sigma_1 \frac{R_2'}{s} \right)}, \quad (15)$$

а на основании уравнений (10), (11) и (7)

$$I_{11} = I_0 + \frac{1}{\sigma_1} I_{21}', \quad (16)$$

$$I_{12} = I_0 + \frac{1}{\sigma_1} I_{22}', \quad (17)$$

где

$$I_0 = \frac{U}{j(x_0 + x_1)} = \frac{U}{jx_0\sigma_1}; \quad (18)$$

$$I_s = U \frac{1 + e^{\pm j\theta}}{z + 2\sigma_1 \frac{R_2'}{s}}. \quad (19)$$

Эквивалентная схема, соответствующая полученным уравнениям (14)—(19), представлена на рис. 3.

Моменты, развиваемые каждым двигателем, можно выразить через активные составляющие роторных токов:

$$M_1 = \frac{3UI_{21a}'}{\sigma_1 \omega_0}, \quad M_2 = \frac{3UI_{22a}'}{\sigma_1 \omega_0}. \quad (20)$$

Для определения активной составляющей тока I'_{21} выражение (14) преобразуем к виду

$$I'_{21} = \frac{U}{2} \left(\frac{1 - e^{\pm j\theta}}{z} + \frac{1 + e^{\pm j\theta}}{z + 2\sigma_1 \frac{R'_2}{s}} \right).$$

Если при вычислении моментов пренебречь активным сопротивлением статора, то

$$z \approx \sigma_1 \frac{r'_2}{s} + j(x_1 + \sigma_1 x'_2).$$

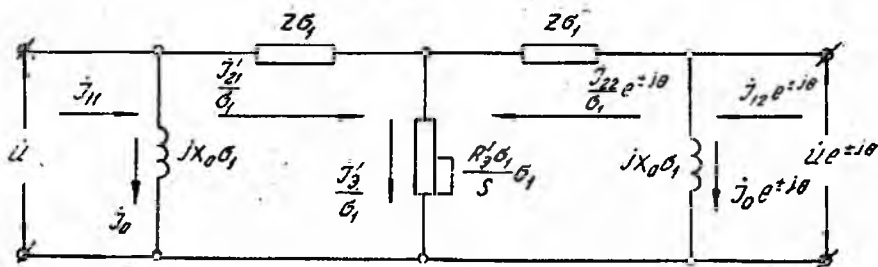


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения двигателей.

При таких допущениях

$$I'_{21} = \frac{U}{2} \left[\frac{1 - e^{\pm j\theta}}{\sigma_1 \frac{r'_2}{s} + j(x_1 + \sigma_1 x'_2)} + \frac{1 + e^{\pm j\theta}}{\sigma_1 \frac{r'_2 + 2R'_2}{s} + j(x_1 + \sigma_1 x'_2)} \right].$$

Воспользовавшись формулой Эйлера, после некоторых преобразований выделим активную составляющую тока I'_{21} (для случая поворота статора по направлению поля):

$$I'_{21a} = \frac{U}{2} \left[\frac{(1 - \cos \theta) \sigma_1 \frac{r'_2}{s} - (x_1 + \sigma_1 x'_2) \sin \theta}{\left(\sigma_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x'_2)^2} + \frac{(1 + \cos \theta) \sigma_1 \frac{r'_2 + 2R'_2}{s} + (x_1 + \sigma_1 x'_2) \sin \theta}{\left(\sigma_1 \frac{r'_2 + 2R'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x'_2)^2} \right].$$

Подставляя полученное значение в выражение (20), имеем

$$M_1 = \frac{3U^2 p}{2\sigma_1 \omega_0} \left[\frac{\sigma_1 \frac{r'_2}{s} (1 - \cos \theta) - (x_1 + \sigma_1 x'_2) \sin \theta}{\left(\sigma_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x'_2)^2} + \frac{\sigma_1 \frac{r'_2 + 2R'_2}{s} (1 + \cos \theta) + (x_1 + \sigma_1 x'_2) \sin \theta}{\left(\sigma_1 \frac{r'_2 + 2R'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x'_2)^2} \right] \quad (21)$$

Аналогично

$$M_2 = \frac{3U^2 p}{2\sigma_1 \omega_0} \left[\frac{\sigma_1 \frac{r_2'}{s} (1 - \cos \Theta) + (x_1 + \sigma_1 x_2') \sin \Theta}{\left(\sigma_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2} + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_1 \frac{r_2' + 2R_s'}{s} (1 + \cos \Theta) - (x_1 + \sigma_1 x_2') \sin \Theta}{\left(\sigma_1 \frac{r_2' + 2R_s'}{s} \right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2} \right] \quad (22)$$

Введем в формулы (21) и (22) значения критического момента двигателя, работающего в обычной схеме. При $r_1 = 0$

$$M_k = \frac{3pU^2}{2\sigma_1 \omega_0 (x_1 + \sigma_1 x_2')}.$$

Если, кроме того, воспользоваться выражениями для критических скольжений

$$s_k = \frac{\sigma_1 r_2'}{x_1 + \sigma_1 x_2'} \text{ и } s'_k = \frac{\sigma_1 (r_2' + 2R_s')}{x_1 + \sigma_1 x_2'},$$

то после несложных преобразований получим

$$M_1 = M_k \left[\frac{1 - \cos \Theta - \frac{s}{s_k} \sin \Theta}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} + \frac{1 + \cos \Theta + \frac{s}{s_k} \sin \Theta}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \right], \quad (23)$$

$$M_2 = M_k \left[\frac{1 - \cos \Theta + \frac{s}{s_k} \sin \Theta}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} + \frac{1 + \cos \Theta - \frac{s}{s_k} \sin \Theta}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \right] \quad (24)$$

На рис. 4 для примера приведены зависимости M_1 и M_2 от скольжения s при различных углах Θ . Расчет произведен для двигателей АКН16-44-12 и АКС16-44-12. Последний является специальным асинхронным двигателем с поворотным статором.

Из графиков видно, что момент M_1 в значительном диапазоне значений Θ и s является отрицательным, т.е. двигатель АКН-16-44-12 может работать в генераторном режиме.

Для случая, когда статор совершает поворот против направления вращения магнитного поля, все выводы остаются теми же, однако второй двигатель работает в генераторном режиме, т.е. в формулах моментов меняются индексы. Поскольку оба двигателя работают на общий вал, суммарный момент

$$M = M_1 + M_2 = 2M_k \left(\frac{1 - \cos \Theta}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} + \frac{1 + \cos \Theta}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \right) \quad (25)$$

На рис. 5 приведен график результирующих моментов для названных выше двигателей, показывающий, что все механические характеристики пересекаются в точке a . Координаты этой точки можно найти, если воспользоваться выражением (25) и задаться любыми значениями

θ_1 и θ_2 . Решив совместно полученные два уравнения, найдем значения скольжения s_a и момента M_a , соответствующие точке пересечения:

$$s_a = \sqrt{s_k \cdot s_k'}$$

$$M_a = 4M_k \frac{s_a}{s_k + s_k'} \quad (26)$$

Для исследуемого привода $s_a = 0,33$, $M_a = 58,4$ нм.

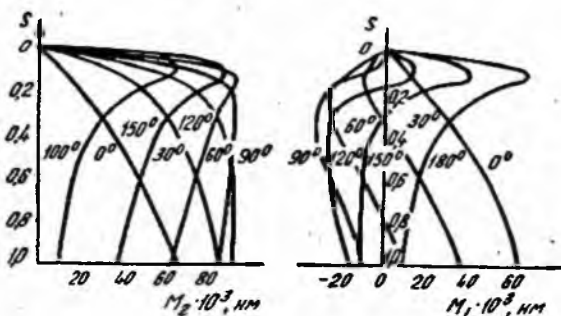


Рис. 4. Механические характеристики двигателей.

Через точку a проходит также одна из механических характеристик до переключения сопротивлений в цепи роторов, определяемая выражением

$$M = 2M_k \frac{1 - \cos \theta_n}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (27)$$

где θ_n — угол поворота статора до переключения,
 s_k — критическое скольжение до переключения.

Подставляя в уравнение (27) координаты точки a из (26), находим значение угла $\theta_n = 124^\circ 30'$, при котором механическая характеристика до переключения проходит через эту точку. Следовательно, переключение сопротивлений при $\theta = 124^\circ 30'$ и $s = 0,33$ обеспечивает плавный вывод двигателей на естественную характеристику. Переключение сопротивлений при $124^\circ 30' < \theta < 180^\circ$ сопровождается толчками тока, а при $\theta < 124^\circ 30'$ двигатели могут не выйти на естественную характеристику (рис. 5). Автоматически эта точка отыскивается при повороте статора в функциях угла θ и скорости подъемной машины при замыкании контактов реле скорости РС и конечного включателя КПП, что вызывает срабатывание контактора КПВ (рис. 6).

Для проверки предложенного способа были сняты осциллограммы разгона промышленного образца привода с поворотным статором на шахте им. К. А. Румянцева в г. Горловке (рис. 7). Осциллограммы снимались при статической нагрузке $35 \cdot 10^3$ нм и повороте статора в период разгона машины против направления вращения его магнитного поля, поэтому ток статора I'' двигателя D_2 имеет большие значения, чем ток I' двигателя D_1 .

На осциллограмме рис. 7 зафиксирован момент переключения сопротивлений при угле поворота статора $\theta = 180^\circ$, сопровождавшийся скачком токов статоров от $I' = 40$ а и $I'' = 65$ а до значений $I' = 90$ а и $I'' = 130$ а. Переключение при $\theta = 144^\circ$ произошло практически без толчков

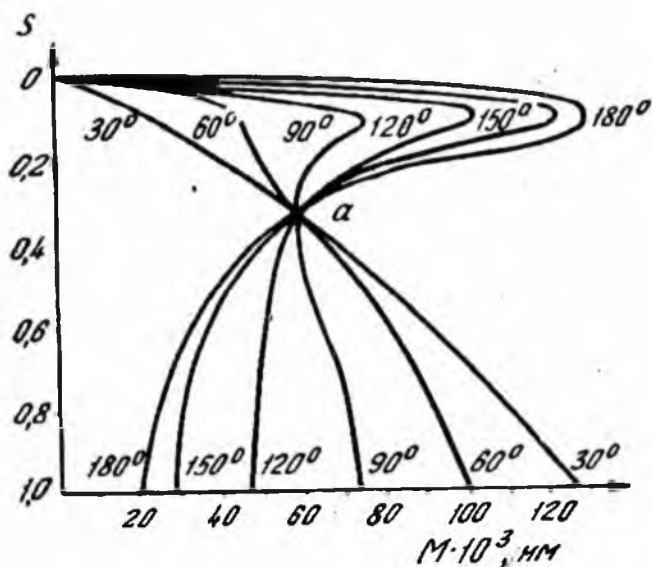


Рис. 5. Суммарные механические характеристики.

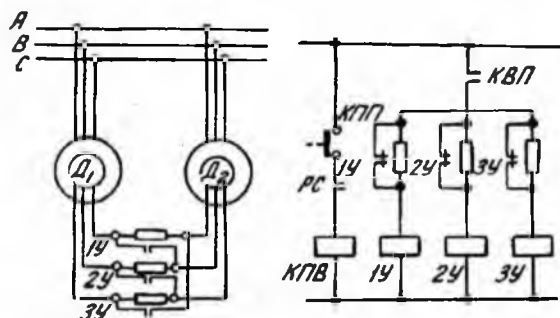


Рис. 6. Схема автоматического отыскания точки переключения сопротивлений.

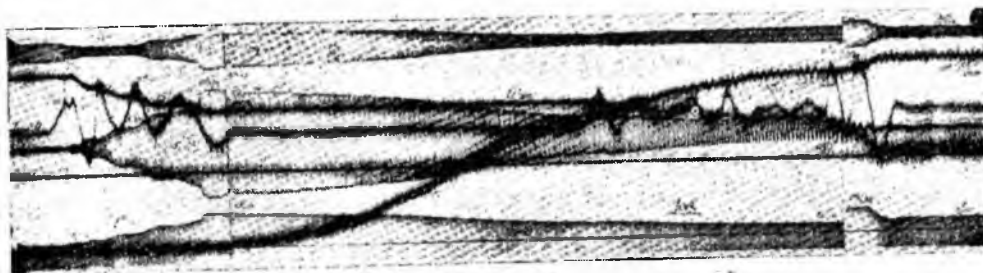


Рис. 7. Осциллограмма разгона промышленного образца привода с поворотным статором на шахте им. К. А. Румянцева.

тока. Следовательно, эксперимент подтвердил, что при значениях угла $124^{\circ}30' < \theta < 180^{\circ}$ токи переключения уменьшаются.

Таким образом, при применении двигателей с поворотным статором для привода подъемной машины или аналогичных механизмов, требующих плавного регулирования скоростей в широком диапазоне, необходимо выводить двигатели на естественную характеристику в функции угла поворота статора и скорости подъемной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Миневич. Бесступенчатая схема пуска двухдвигательного привода мощных ленточных конвейеров. Сб. трудов МГИ. Изд-во МГИ, 1962, № 42.
2. И. М. Садовский. Согласованное вращение асинхронных двигателей. Изд-во ГЭИ, 1948.

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ЛИНЗ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ

В. А. Коноваленко

Сумы

Дан расчет проводимости в щели полюсного наконечника электронного микроскопа и по параметру формы полюсного наконечника найдены его размеры.

Расчет магнитной цепи электронного микроскопа позволяет определить следующие величины:

- 1) магнитный поток, соответствующий заданной силе линзы, в щели полюсного наконечника;
- 2) внешний диаметр цилиндрической части полюсного наконечника, соответствующий заданному параметру формы;
- 3) внутренний и внешний диаметры уширенной части полюсного наконечника;
- 4) критические сечения в магнитопроводе;
- 5) магнитную индукцию в критических сечениях — в целях выяснения вопроса о насыщении материала в этих сечениях.

Особенность расчета магнитной цепи электронного микроскопа состоит в сочетании намагничивающей силы, сосредоточенной в щели полюсного наконечника, с параметром формы, предварительно заданным.

Как правило, полюсные наконечники изготавливаются из пермендюра, а магнитопровод — из различных сортов стали или пермаллоя. Для расчета необходимо иметь кривые намагничивания материалов, выражающих магнитную индукцию как функцию напряженности магнитного поля. Исходными уравнениями при расчете магнитных цепей являются для узла магнитной цепи [1]

$$\Sigma \Phi = 0, \quad (1)$$

и для замкнутого контура

$$\Sigma j = \Sigma \Phi R_m, \quad (2)$$

где Φ — магнитный поток;

j — намагничивающая сила;

R_m — магнитное сопротивление.

Пусть задан симметричный полюсный наконечник, у которого шири-