

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТИПА ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РУДНИЧНЫХ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Основным видом транспорта на горных и других видах предприятий с технологиями подземного ведения работ, является электровозный. На отечественных шахтах эксплуатируется около 4 тысяч рудничных электровозов, оборудованных энергонезэффективными тяговыми электрохимическими системами и давно требующих замены на современные. Как свидетельствует опыт магистральных и промышленных типов электровозов, такими являются системы на базе асинхронных тяговых двигателей с импульсными системами управления напряжением их питания, в частности на основе IGB-транзисторов.

Желание дальнейшего повышения эффективности и необходимость минимизации массогабаритных показателей для условий рудных электровозов привело к поиску более энергоэффективной системы с точки зрения потерь электроэнергии в самой системе.

*Анализ электромагнитных процессов в ТАД.* Электромагнитные процессы в ТАД необходимо рассматривать при следующих допущениях [1, 2]:

- обмотки статора трехфазного двигателя соединены в симметричную звезду;
- зазор равномерный;
- связь между магнитодвижущей силой и потокосцеплением (поток) – линейная;
- распределение магнитного потока обмоток по расточке статора синусоидальное.

При питании ТАД симметричным трехфазным напряжением постоянной частоты  $\omega_s$  в нем возникает вращающееся магнитное поле. Это поле изображают обобщенным пространственным вектором  $\bar{\psi}_s$ , модуль которого равен амплитуде синусоидальной волны, рис. 1, а.

Поток, создаваемый каждой фазой, является проекцией  $\bar{\psi}_s$  на неподвижную ось соответствующей фазы:

$$\bar{\psi}_{SA} = \bar{\psi}_s \cdot \cos \varphi; \quad \bar{\psi}_{SB} = \bar{\psi}_s \cdot \left( -\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right); \quad \bar{\psi}_{SC} = \bar{\psi}_s \cdot \left( -\frac{1}{2} \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right).$$

Обратно:  $\bar{\psi}_s = \frac{2}{3} (\bar{\psi}_A + \bar{a} \cdot \bar{\psi}_B + \bar{a}^2 \cdot \bar{\psi}_C)$ , где единичные векторы:  $\bar{a} = \exp\left(j \frac{2}{3} \pi\right)$ ;  $\bar{a}^2 = \exp\left(j \frac{4}{3} \pi\right)$ .

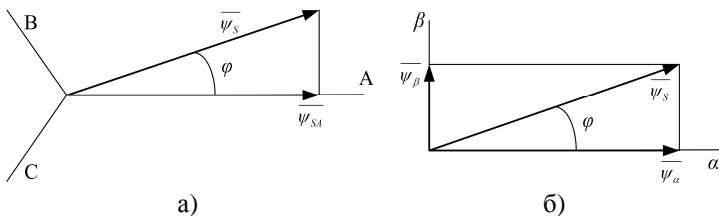


Рис. 1 Представление пространственного вектора магнитного потока  $\bar{\psi}_s$  асинхронной машины: а) в трех неподвижных осях А, В, С; б) в двух неподвижных осях  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Поток  $\bar{\psi}_s$  – физически существующая величина, по аналогии с ней представляют виртуальные обобщенные векторы напряжения и тока:

$$\bar{U}_s = \frac{2}{3} (U_A + \bar{a} \cdot U_B + \bar{a}^2 \cdot U_C),$$

$$\bar{I}_s = \frac{2}{3} (I_A + \bar{a} \cdot I_B + \bar{a}^2 \cdot I_C)$$

Вектор  $\bar{I}_s$  пропорционален физически существующему вектору напряженности поля.

Обобщенные векторы  $\bar{\psi}_s$ ,  $\bar{U}_s$ ,  $\bar{I}_s$  можно также представить в системе двух неподвижных ортогональных осей  $\alpha$  и  $\beta$ , например, для магнитного потока, рис. 1, б. Для упрощения математических выкладок принимают ось  $\alpha$  вещественной и совпадающей с осью фазы А трехфазной системы, ось  $\beta$  принимают мнимой.

Тогда:  $\bar{\psi}_s = \bar{\psi}_\alpha + j\bar{\psi}_\beta$ ;  $\bar{\psi}_\alpha = |\bar{\psi}_s| \cdot \cos \varphi = \bar{\psi}_s \cdot \cos \varphi$ ;  $\bar{\psi}_\beta = \bar{\psi}_s \cdot \sin \varphi$

Минув этапы приведения трехфазной системы к обобщенным векторам и далее к двухфазной системе координат, можно установить прямое соответствие между трехфазной и двухфазной системами:

$$\bar{\psi}_\alpha = \frac{2}{3} \left( \bar{\psi}_A - \frac{\bar{\psi}_B + \bar{\psi}_C}{2} \right) = \bar{\psi}_A; \quad \bar{\psi}_\beta = \frac{\bar{\psi}_B - \bar{\psi}_C}{\sqrt{3}}$$

Обратное преобразование:  $\bar{\psi}_A = \bar{\psi}_\alpha$ ;  $\bar{\psi}_B = -\frac{1}{2} \bar{\psi}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\psi}_\beta$ ;  $\bar{\psi}_C = -\frac{1}{2} \bar{\psi}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\psi}_\beta$ .

Изложенное позволяет утверждать, что описание ТАД в двух ортогональных неподвижных осях  $\alpha$  и  $\beta$  теоретически соответствует представлению двухфазного ТАД, аналогично трехфазному. Иными словами двухфазный и трехфазный ТАД аналогичны друг другу при равенстве обобщенных параметров. Корректнее говорить о подобии двигателей одинаковой мощности, тягового момента, оборотов и близких по значениям моментов

инерции ротора, коэффициента мощности и прочее.

Поэтому, далее рассмотрим соотношения для обобщенного ТАД, для которого уравнения записываются аналогично как для статора (с индексом «s»), так и для ротора (с индексом «r»), но с учетом того, что ротор вращается с электрической скоростью  $\omega_r = p \cdot \omega_{мех}$ , где  $p$  – число пар полюсов,  $\omega_{мех}$  – механическая скорость вращения ротора.

$$\text{Зависимости напряжений в статоре и роторе: } \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt}; \bar{U}_r = 0 = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt}$$

Магнитные потоки описываются выражениями:

$$\bar{\psi}_s = (L_s + L_\mu) \cdot \bar{I}_s + L_\mu \cdot \bar{I}_r, \tag{1}$$

$$\bar{\psi}_r = L_\mu \cdot \bar{I}_s + (L_r + L_\mu) \cdot \bar{I}_r, \tag{2}$$

где  $L_s, L_r$  – индуктивности рассеяния обмоток;  $L_\mu$  – индуктивность намагничивания (далее  $(L_s + L_\mu) = L_{s\Sigma}$  и  $(L_r + L_\mu) = L_{r\Sigma}$  – полные индуктивности обмоток).

Исключая  $\bar{I}_r$  из (1) и (2) находим:

$$\bar{\psi}_s = K_r \cdot \bar{\psi}_r + \sigma \cdot L_{s\Sigma} \cdot \bar{I}_s, \tag{3}$$

где  $K_r = \frac{L_\mu}{L_{r\Sigma}}$  – коэффициент связи ротора;  $\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_{s\Sigma}^2 + L_{r\Sigma}^2}$  – результирующий коэффициент рассеивания.

Момент двигателя в виде векторного произведения

$$M_s = \frac{3}{2} p (\bar{\psi}_s \times \bar{I}_s) = \frac{3}{2} \psi_s \cdot I_s \cdot \sin \Theta_s, \tag{4}$$

где  $\Theta_s$  – угол между векторами  $\bar{\psi}_s$  и  $\bar{I}_s$ .

Подставляя (3) в (4) получаем:  $M_s = \frac{3}{2} p \cdot K_r \cdot \psi_r \cdot I_s \cdot \sin \Theta_r$ , где  $\Theta_r$  – угол между векторами  $\bar{\psi}_r$  и  $\bar{I}_s$ .

$$\text{Уравнение движения ротора: } J \frac{d\omega_{мех}}{dt} = \frac{M_s}{p} - M_K$$

где  $J$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя;  $M_K$  – момент сопротивления.

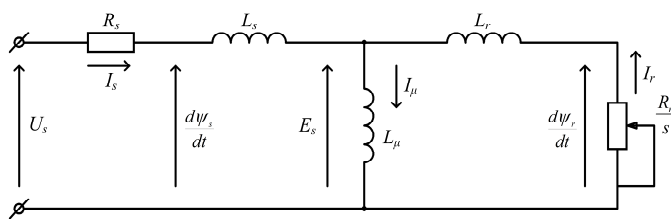


Рис. 2 Схема замещения фазы асинхронного двигателя в тяговом режиме.

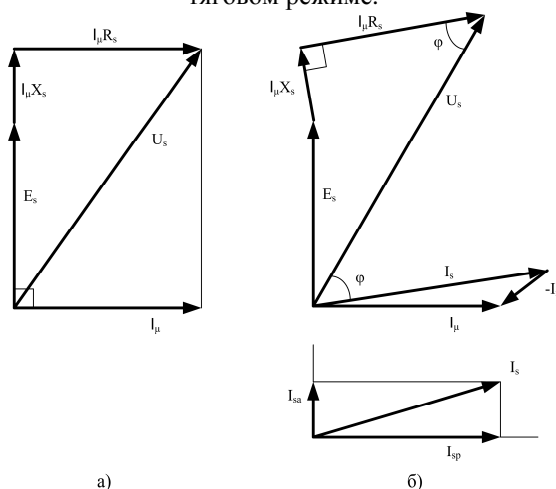


Рис. 3 Векторные диаграммы асинхронного двигателя: а) холостой ход; б) под нагрузкой  $s > 0$ .

Представленным соотношениям соответствует схема замещения асинхронной машины (АМ) в тяговом режиме, приведенная на рис. 2.

В тормозном режиме АМ генерирует электроэнергию либо в контактную сеть (рекуперация), либо в тормозной резистор  $R_Q$  (резисторное торможение). В этом процессе также принимает участие сглаживающий конденсатор  $C_d$  в цепи постоянного тока. Схема замещений при этом принимает вид, представленный на рис. 5, где  $E_d, L_d, C_d, R_Q$  приведены к цепи переменного тока; векторные диаграммы приведены на рис. 6, диаграммы напряжения и тока показаны на рис. 7.

Сравнение диаграмм на рисунках 3, 4 и 6, 7 подтверждает известное положение для АМ: при переходе из двигательного режима в генераторный активная составляющая тока  $i_{sa}$  меняет знак, а реактивная составляющая  $i_{sp}$  знака не меняет, т.е. АМ генерирует активную мощность и потребляет реактивную.

Источником реактивной мощности для АМ в рассматриваемой системе являются либо контактная сеть (КС), либо сглаживающий конденсатор  $C_d$ .

Параметры двухфазных и трехфазных ТАД. Расчетная мощность, подведенная к валу двигателя:

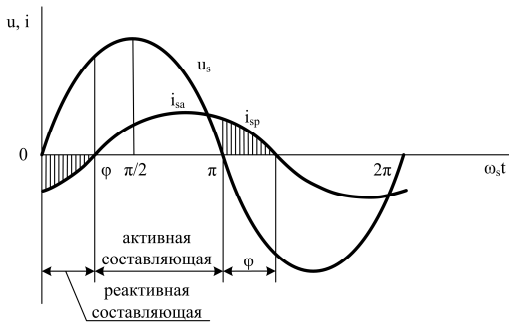


Рис.4 Диаграммы напряжения и тока асинхронного двигателя,  $s > 0$

ритах получается та же мощность двигателя.

Оценим потери в обмотках двигателей. Предположим, что напряжение в обоих вариантах остается одинаковым, по обмотке трехфазного двигателя с сопротивлением  $r$  протекает ток  $I_1$ . Тогда потери в обмотках трехфазного двигателя составят:  $\Delta P_{M3} = 3I_1^2 r$ .

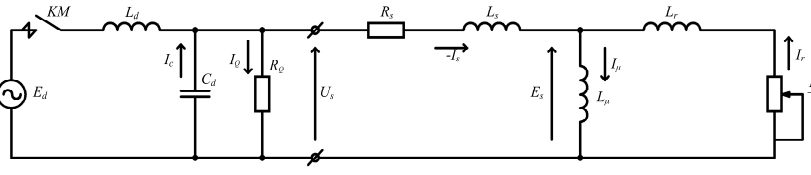


Рис. 5 Эквивалентная схема торможения асинхронной машины.

$$\Delta P_{M2} = 2(1,5I_1)^2 \cdot \frac{r}{1,5} = 2I_1^2 r.$$

Т.е. величина потерь, как и другие характеристики ТАД, при двухфазном исполнении остаются такими же, как и в трехфазном

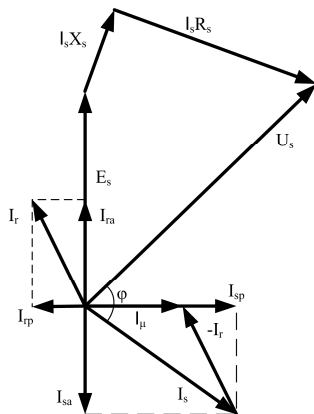


Рис. 6 Векторные диаграммы асинхронной машины в генераторном режиме,  $s < 0$ ,  $\varphi > \pi/2$ .

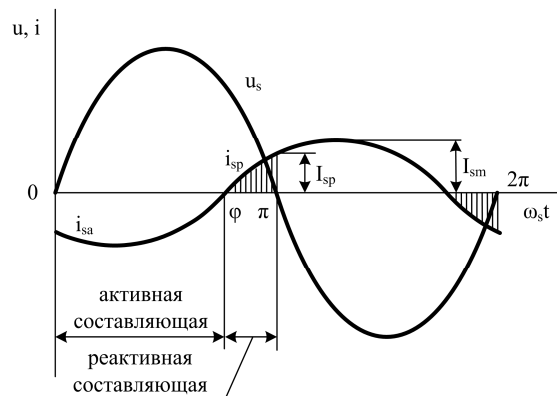


Рис. 7 Диаграммы напряжения и тока асинхронной машины в генераторном режиме,  $s < 0$

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М. – Л., Госэнергоиздат, 1963, – 744 с.
2. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / [Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышев А.А., Синчук И.О., Удовенко О.А., Пасько О.В., Гузов Э.С.]; под ред. О.Н. Синчука. – К.: 2006. – 252с.