

рекування роботи вантажно-транспортного комплексу кар'єру при зміні вхідних параметрів, формування динамічної моделі для визначення оптимальних вантажопотоків та термінів технічного обслуговування і ремонтів обладнання.

Список літератури

1. Шапиро В.Д. и др. Управление проектами. - СПб: Два-три, 1996. - 645 с.
2. Ньюэл Майкл В. Управление проектами для профессионалов. Руководство по подготовке к сдаче сертификационного экзамена / Пер. с англ. - М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. - 416 с.

Рукопис подано до редакції 02.02.12

УДК 621.314

Э.С. ГУЗОВ, О.Е. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук, доц., А.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, ассистент
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХФАЗНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Изложен сравнительный анализ процессов в двухфазной и трехфазной асинхронной машине. Приведены векторные диаграммы и диаграммы напряжения и тока асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при холостом ходе, под нагрузкой и в генераторном режиме.

Проблема и ее связь с практическими задачами. Эксплуатируемые на шахтах и рудниках Украины двухосные рудничные электровозы оснащены неэффективными и явно устаревшими типами контакторно-резисторных систем управления тяговыми электродвигателями постоянного тока.

Анализ исследований и публикаций. В последние годы в Украине возобновились исследования по созданию современных энергоэффективных систем ТЭП, в том числе с традиционными видами трехфазных асинхронных тяговых электрических двигателей (ТАД) [1].

Испытания подтвердили в основном ожидаемую эффективность новых разработок тяговых асинхронных электроприводов (ТАП) для рудничных типов электровозов [2].

Однако, как показали результаты предварительных испытаний, не отходя от определяющих преимуществ ТАП, особенно для условий шахт, необходим дальнейший поиск альтернативных по энергоэффективности и технологичности структур и самих асинхронных электроприводов.

Один из возможных направлений создания таких видов ТАП является электропривод на базе двухфазных ТАД с IGBT-преобразователями [3].

Постановка задачи. Исследование электромагнитных процессов в двухфазной и сравнение их с трехфазной асинхронной машиной в тяговом (двигательном) и тормозном (генераторном) режимах работы тяговых электроприводов для условий рудничных электровозов.

Изложение материала и результаты. Согласно [4,5] электромагнитные процессы в асинхронной машине (АМ) рассматриваются при следующих допущениях:

обмотки статора трехфазного двигателя соединены в симметричную звезду;
зазор равномерный;

связь между магнитодвижущей силой и потокоцеплением (поток) – линейная;

распределение магнитного потока обмоток по расточке статора синусоидальное.

При питании асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АД) симметричным трехфазным напряжением постоянной частоты ω_s в нем возникает вращающееся магнитное поле. Это поле изображают обобщенным пространственным вектором $\vec{\psi}_s$, модуль которого равен амплитуде синусоидальной волны, рис. 1а.

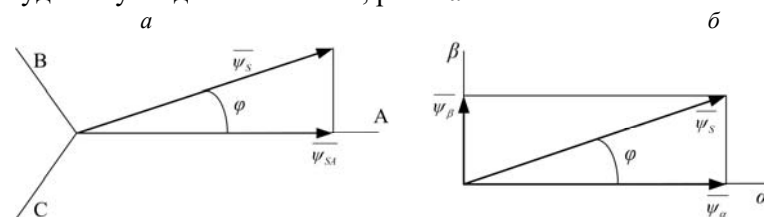


Рис. 1. Представление пространственного вектора магнитного потока $\vec{\psi}_s$

асинхронной машины: a - в трех неподвижных осях А,В,С; \bar{b} - в двух неподвижных осях α, β

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

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

Обратно

$$\bar{\psi}_s = \frac{2}{3} \left(\psi_A + \bar{a} \cdot \psi_B + \bar{a}^2 \cdot \psi_C \right)$$

где единичные векторы $\bar{a} = \exp\left(j \frac{2}{3} \pi\right)$; $\bar{a}^2 = \exp\left(j \frac{4}{3} \pi\right)$.

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

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= \frac{2}{3} \left(U_A + \bar{a} \cdot U_B + \bar{a}^2 \cdot U_C \right) \\ \bar{I}_s &= \frac{2}{3} \left(I_A + \bar{a} \cdot I_B + \bar{a}^2 \cdot I_C \right) \end{aligned}$$

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 α и β , например, для магнитного потока, рис. 1б. Для упрощения математических выкладок принимают ось α вещественной и совпадающей с осью фазы А трехфазной системы, ось β принимают мнимой.

Тогда

$$\bar{\psi}_s = \bar{\psi}_\alpha + j \bar{\psi}_\beta; \quad \bar{\psi}_\alpha = |\bar{\psi}_s| \cdot \cos \varphi = \psi_s \cdot \cos \varphi; \quad \bar{\psi}_\beta = \psi_s \cdot \sin \varphi.$$

Минув этап 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

$$\left. \begin{aligned} \bar{\psi}_A &= \bar{\psi}_\alpha \\ \bar{\psi}_B &= -\frac{1}{2} \bar{\psi}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\psi}_\beta \\ \bar{\psi}_C &= -\frac{1}{2} \bar{\psi}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\psi}_\beta \end{aligned} \right\}$$

Изложенное позволяет утверждать, что описание АД в двух ортогональных неподвижных осях α и β теоретически соответствует представлению двухфазного АД, аналогично трехфазному. Иными словами двухфазный и трехфазный АД 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 АД, 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 $\omega_r = p \cdot \omega_{\text{мех}}$, где p - число пар полюсов, $\omega_{\text{мех}}$ - механическая скорость вращения ротора.

Зависимости напряжений в статоре и роторе

$$\bar{U}_S = R_S \cdot \bar{I}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt}; \quad \bar{U}_r = 0 = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt}.$$

Магнитные потоки описываются выражениями

$$\bar{\psi}_S = (L_S + L_\mu) \cdot \bar{I}_S + L_\mu \cdot \bar{I}_r \quad (1)$$

$$\bar{\psi}_r = L_\mu \cdot \bar{I}_S + (L_r + L_\mu) \cdot \bar{I}_r \quad (2)$$

где L_S, L_r - индуктивности рассеяния обмоток; L_μ - 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

$$\bar{\psi}_S = K_r \cdot \bar{\psi}_r + \sigma \cdot L_{S\Sigma} \cdot \bar{I}_S \quad (3)$$

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

$$M_S = \frac{3}{2} p (\bar{\psi}_S \times \bar{I}_S) = \frac{3}{2} \psi_S \cdot I_S \cdot \sin \Theta_S \quad (4)$$

где Θ_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 Θ_r - угол между векторами $\bar{\psi}_r$ и \bar{I}_S .

Уравнение движения ротора

$$J \frac{d\omega_{\text{мех}}}{dt} = \frac{M_S}{p} - M_K,$$

где J - приведенный к валу двигателя момент инерции двигателя и ВМП; M_K - момент сопротивления.

Представленным соотношениям соответствует схема замещения АД в тяговом режиме приведена на рис. 2.

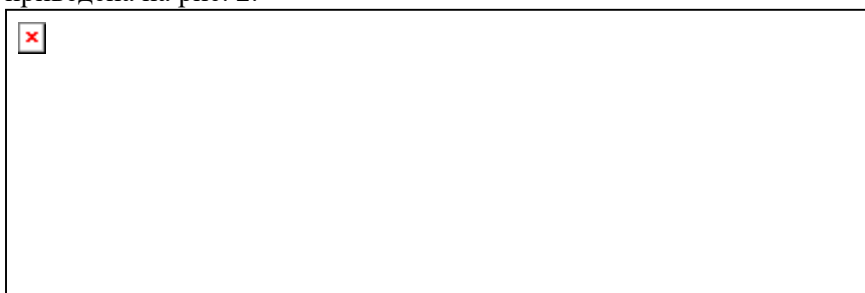


Рис. 2. Схема замещения фазы асинхронного двигателя в тяговом режиме

где $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ - скольжение ротора по отношению к основной составляющей вращающегося магнитного поля; ω - синхронная частота вращения магнитного поля; ω_r - частота вращения ротора.

Векторные диаграммы холостого хода и нагруженного АД приведены на рис. 3, где I_{Sa}, I_{Sp} - соответственно активная и реактивная составляющие тока статора; $X_S = \omega_S L_S$, $X_r = \omega_S L_r$, $X_\mu = \omega_S L_\mu$ - индуктивные сопротивления

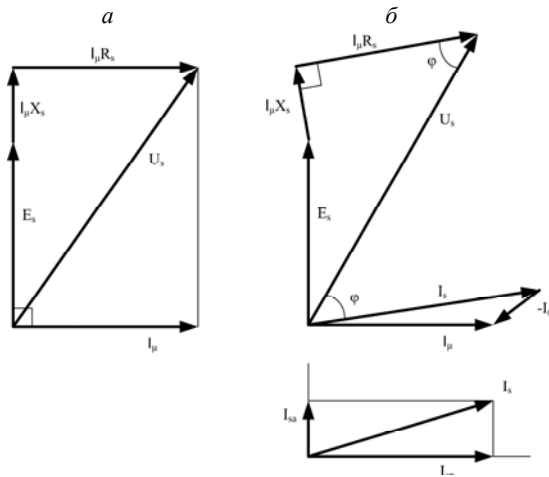


Рис. 3. Векторные диаграммы асинхронного двигателя: а - холостой ход; б - под нагрузкой $s > 0$

Диаграммы напряжения и тока АД в тяговом режиме приведены на рис. 4.

В тормозном режиме ТЭП 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 замещения 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

$$I_{sp} = I_{sm} \cdot \sin(\pi - \varphi) = I_{sm} \cdot \sin \varphi$$

Сравнение диаграмм на рисунках 3,4 и 6, 7 наглядно 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.

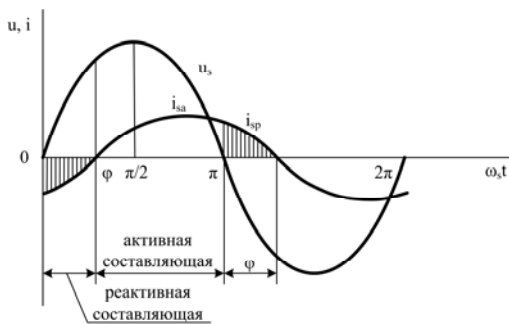


Рис. 4. Диаграммы напряжения и тока асинхронного двигателя, $s > 0$

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

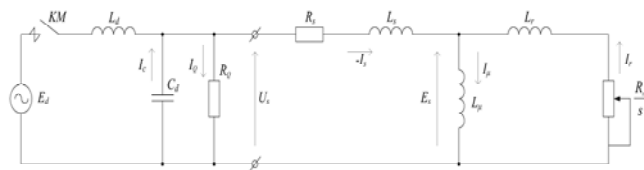


Рис. 5. Эквивалентная схема торможения асинхронной машины

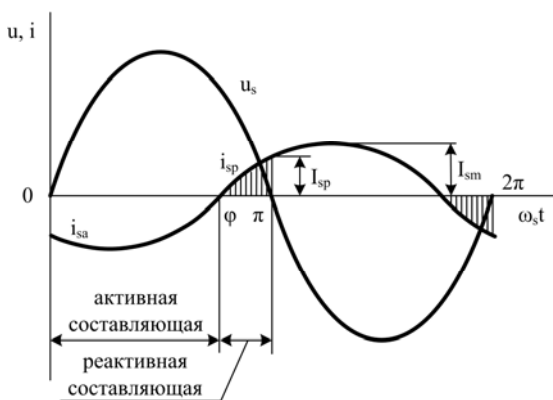


Рис. 6. Векторные диаграммы асинхронной машины в генераторном режиме, $s < 0$, $\varphi > \pi/2$

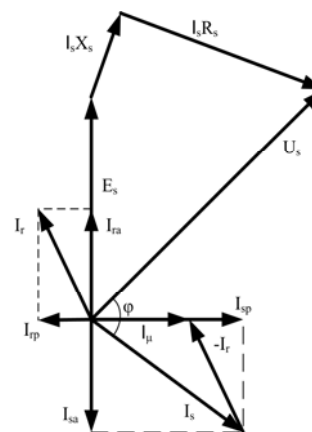


Рис. 7. Диаграммы напряжения и тока асинхронной машины в генераторном режиме, $s < 0$

Возможность поддержания реактивного тока i_{sp} на данной частоте путем подпитки АМ от КС обеспечивает надежное возбуждение ее в генераторном режиме и, следовательно, устойчивое торможение ТЭП, которое осуществляется путем изменения отношения между ω_s и ω_r . Устанавливается $\omega_s < \omega_r$, т.е. $s < 0$. При этом $E_s > U_s$ и АМ генерирует ток в КС или в тормозной резистор R_Q в течение φ , а на интервале $[\pi - \varphi]$ АМ подпитывается от КС. Изменением величины скольжения s и величины тока подпитки путем ШИМ, регулируют ЭДС АМ, а следовательно и мощность торможения на данной скорости.

Выводы и направления дальнейших исследований. Получены уравнения описывающие характеристики обобщенного асинхронного двигателя. Установлено прямое соответствие обобщенных параметров трехфазной и двухфазной асинхронной машины. Проведенный анализ характеристик двигателей в различных режимах работы показал целесообразность применения двухфазных асинхронных двигателей для тяговых приводов.

Список литературы

1. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления / [Синчук И.О., Чернышев А.А., Пасько О.В., Киба И.И., Ключка А.С., Мельник О.Е.]. – Кременчуг: Вид. ПП Щербатых О.В., 2008. – 88 с.
2. Синчук О.Н. Контактно-аккумуляторный шахтный электровоз с тяговым электротехническим комплексом: IGBT-инвертор-асинхронный электрический двигатель / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Д.А. Шокарев, Е.И. Скапа, Ф.И. Караманиц // Науковий журнал. Вісник СХУ ім. В.Даля – №4 (158) – часть 1.
3. Шаповал В.Г. К вопросу анализа импульсных способов функционирования форм кривых тока и напряжения питания 2-х и 3-х фазных тяговых двигателей / В.Г. Шаповал, И.О. Синчук, В.О. Черная // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. Зб. наукових праць. – Кременчуг: КДПУ ім. М.Остроградського – 2008 – Часть 1, №3 (50) – С. 79-82.
4. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М. – Л., «Госэнергоиздат», 1963, 744 с.
5. Шидловский А.К., Козлов А.В., Комаров Н.С., Москаленко Г.А. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью. К., «Наукова думка», 1993. - 272 с.

Рукопис подано до редакції 02.02.12

УДК 621.3.016.4:620.9

В.М. СУРТАСВ, В.В. СУРТАСВ, Ю.Г. ОСАДЧУК, кандидати техн. наук, доценти,
Д.В. БАТРАКОВ, викладач, О.В. ГЕРАСИМЧУК, канд. техн. наук, доц.,
О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТУРБОМЕХАНІЗМІВ В ЕНЕРГОЄМНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

Проведено аналіз стану енергоефективності при роботі турбомеханізмів в енергоємних технологіях гірничо-металургійного комплексу, наведені проблемні питання в даному аспекті досліджень. Окреслені основні шляхи підвищення ефективності використання електричної енергії в технологічних процесах гірничо-металургійного комплексу, зокрема в роботі турбомеханізмів.

Проблема і її зв'язок з науковими та практичними задачами. Ресурсо- та енергозбереження в енергоємних технологіях гірничого та металургійного комплексу пов'язані з проблемою технологічних втрат електричної енергії в електричних мережах, частка яких в Україні визначається як «надзвичайно висока» і складає в середньому 3,1-3,6 млрд. кВт·год на рік, або приблизно 22-25 %, від загального обсягу електричної енергії, що виробляється, а також технологічних втрат електричної енергії в процесах її споживання, з кількісними характеристиками споживання електричної енергії безпосередньо технологічними об'єктами та якістю перетворення її параметрів в системах живлення та управління [1-5]. Таким чином значне підвищення енергетичної ефективності у гірничо-металургійному комплексі Кривбасу за рахунок раціонального використання електричної енергії є актуальною науково-практичною задачею в наш час.

Аналіз досліджень та публікацій. Специфічні умови формування енергобалансу з підвищеними рівнями всіх складових потужності (активної, реактивної та ін.) обумовлені [1, 5-8]:

неефективним регулюванням турбомеханізмів (до 95 % насосних, компресорних, вентиляторних та ін. пристроїв цього класу обладнано нерегульованим електроприводом);