

УДК 621.313.8

АКТИВНЫЕ ЛОБОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Е.Г. Коков, О.П. Муравлёв*

Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск

E-mail: polus@online.tomsk.net

*Томский политехнический университет

Разработана математическая модель магнитоэлектрической машины с использованием энергии лобовых соединений обмотки якоря, проведен анализ полученных зависимостей, определяющих поведение вентильного электродвигателя.

Ключевые слова:

Магнитоэлектрическая машина, постоянный магнит, обмотка якоря, коэффициент использования лобовых соединений.

Key words:

Magneto-electric motor, constant magnet, armature winding, activity factor.

Свойства магнитоэлектрических двигателей и их рабочие режимы подробно изучены отечественными и зарубежными исследователями в 60–70 гг. прошлого столетия, создавшими теорию данного класса электрических машин, которая в настоящее время широко используется в инженерной практике.

Как правило, проводимые теоретические исследования традиционно предполагают рассмотрение электромагнитных процессов, происходящих лишь в основном ядре машины, ограниченном активным объемом пазовой части ее якоря. При этом считается, что энергия токового слоя лобовых соединений обмотки безвозвратно расходуется только на тепловые потери.

Однако известен ряд предложений по увеличению активного объема электрической машины за счет внутреннего объема, занимаемого лобовыми соединениями, в зоне которых действует магнитное поле продленного в аксиальном или радиальном направлении индуктора. В рабочих режимах, наряду с основной ЭДС пазовой зоны обмотки якоря, будет присутствовать и ЭДС вращения, наводимая в лобовых соединениях полем возбуждения. При этом возникают все необходимые и достаточные физические взаимодействия для генерирования дополнительной электрической либо механической энергии, а следовательно, и условия,

способствующие улучшению использования внутреннего объема.

О возможности полезного использования объема лобовых соединений впервые упоминается в монографии В. А. Толвинского [1]. Однако известные научные исследования по данному вопросу принадлежат В.А. Троицкому [2, 3]. Они охватывают область изменений параметров и свойств, главным образом асинхронных короткозамкнутых электродвигателей. К другим же классам электрических машин могут быть применимы лишь общие рекомендации и методологические подходы.

Исходя из прикладной значимости совершенствования эксплуатационных показателей магнитоэлектрических машин, в частности вентильных электродвигателей, аналитически исследована возможность активизации лобовых соединений обмотки якоря без изменения теплового состояния.

Анализ преобразовательного процесса проводится на модели, описывающей классическую структуру вентильного электродвигателя и определяющей поведение реальной машины с учетом операторов «включения» электромагнитных процессов пазовой A и лобовой B структур (рисунок).

Поскольку структуры A и B обтекаются одним и тем же током, уравнение равновесия напряжения,

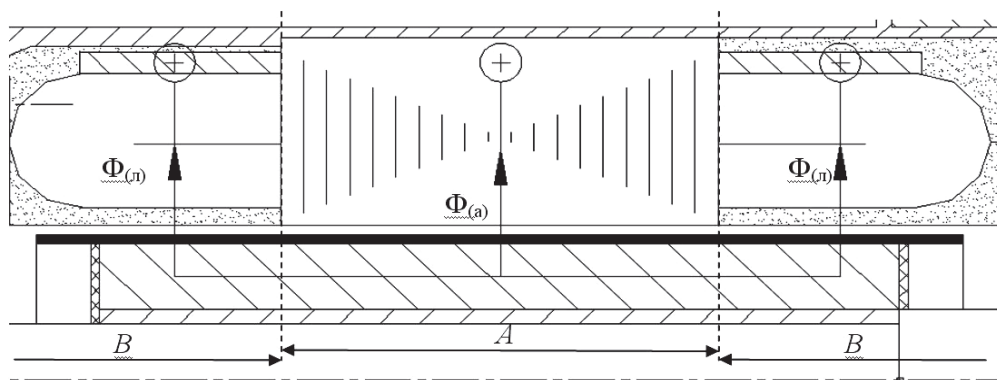


Рисунок. Модель электрической машины с активными лобовыми соединениями

подводимого к обмотке статора (якоря), в координатах статора можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\sigma 1} = & A \left[R_{s(a)} \bar{i}_{\sigma 1} + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_{\sigma 1(a)} \right] + \\ & + B \left[R_{s(n)} \bar{i}_{\sigma 1} + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_{\sigma 1(n)} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где потокоцепление структур обмотки

$$\bar{\psi}_{\sigma 1(a)} = L_{s(a)} \bar{i}_{\sigma 1} + L_{2s(a)} \hat{i}_{\sigma 1} e^{j2\gamma} + M_{m1(a)} \bar{i}_{f(a)} e^{j\gamma}, \quad (2)$$

$$\bar{\psi}_{\sigma 1(n)} = L_{s(n)} \bar{i}_{\sigma 1} + L_{2s(n)} \hat{i}_{\sigma 1} e^{j2\gamma} + M_{m1(n)} \bar{i}_{f(n)} e^{j\gamma}. \quad (3)$$

В координатах d - q ротора в синхронном (установившемся) режиме уравнения (1)–(3) принимают вид

$$\begin{aligned} \bar{U}_{s1} = \bar{U}_{\sigma 1} = & A [R_{s(a)} \bar{i}_{s1} + j\omega \bar{\psi}_{s1(a)}] + \\ & + B [R_{s(n)} \bar{i}_{s1} + j\omega \bar{\psi}_{s1(n)}]; \end{aligned}$$

$$\bar{\psi}_{s1(a)} = \bar{\psi}_{\sigma 1(a)} e^{-j\gamma} = L_{s(a)} \bar{i}_{s1} + L_{2s(a)} \hat{i}_{s1} + M_{m1(a)} \bar{i}_{f(a)}; \quad (4)$$

$$\bar{\psi}_{s1(n)} = \bar{\psi}_{\sigma 1(n)} e^{-j\gamma} = L_{s(n)} \bar{i}_{s1} + L_{2s(n)} \hat{i}_{s1} + M_{m1(n)} \bar{i}_{f(n)}. \quad (5)$$

Основываясь на уравнениях потокоцеплений (4), (5) и учитывая составляющие вектора тока по продольной и поперечной осям машины, потокоцепления пазовой и лобовой структур вентильного электродвигателя можно представить в следующем виде:

$$\bar{\psi}_{s1(a)} = \psi_{d(a)} + j\psi_{q(a)};$$

$$\bar{\psi}_{s1(n)} = \psi_{d(n)} + j\psi_{q(n)}.$$

Электромагнитный момент, действующий на валу двигателя, и мощность, потребляемая двигателем из сети, в этом случае описываются зависимостями

$$\begin{aligned} M_{\text{эл}} = & \frac{pm}{2} \text{Re}[j(A\bar{\psi}_{s1(a)} + B\bar{\psi}_{s1(n)})\hat{i}_{s1}] = \\ = & \frac{pm}{2} [(A\psi_{d(a)} + B\psi_{d(n)})i_q - (A\psi_{q(a)} + B\psi_{q(n)})i_d]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_1 = \frac{m}{2} \text{Re}[\bar{U}_{s1} \hat{i}_{s1}] = \frac{m}{2} [U_d i_d + U_q i_q]. \quad (7)$$

Поскольку

$$\bar{U}_{s1} = U_{m1} e^{j\gamma_0} = U_{m1} (\cos \gamma_0 + j \sin \gamma_0), \quad (8)$$

окончательно имеем

$$P_1 = \frac{m}{2} U_{m1} [i_d \cos \gamma_0 + i_q \sin \gamma_0]. \quad (9)$$

В уравнениях (6)–(9) m, p – число фаз и пар полюсов электрической машины; U_{m1} – амплитуда основной гармоники фазного напряжения якорной обмотки; γ_0 – угол коммутации.

Полагая оператор лобовой структуры $B=0$ и учитывая, что $R_{s(a)}=R_s$, $X_{d(a)}=X_d$, $X_{q(a)}=X_q$, а также $E_{m(a)}=E_{m1}$, находим известные зависимости, характеризующие составляющие тока двигателя с классической структурой (без использования активных лобовых соединений обмотки якоря):

$$I_{d(a)} = \frac{U_{m1}}{R_s} \frac{\left[\cos \gamma_0 + \frac{X_{q(a)}}{R_s} \sin \gamma_0 - \frac{X_{q(a)}}{R_s} \frac{E_{m(a)}}{U_{m1}} \right]}{\left[1 + \frac{X_{d(a)} X_{q(a)}}{R_s^2} \right]};$$

$$I_{q(a)} = \frac{U_{m1}}{R_s} \frac{\left[\sin \gamma_0 - \frac{X_{d(a)}}{R_s} \cos \gamma_0 - \frac{E_{m(a)}}{U_{m1}} \right]}{\left[1 + \frac{X_{d(a)} X_{q(a)}}{R_s^2} \right]};$$

$$M_{\text{эл}} = \frac{m}{2\Omega} [E_{m1} I_{q(a)} + (X_d - X_q) I_{d(a)} I_{q(a)}].$$

При $A=B=1$ находим аналогичные зависимости для продольного и поперечного токов при активизации лобовых соединений и их использовании наряду с пазовой структурой:

$$\begin{aligned} I_{d(a,n)} = & \frac{U_{m1}}{R_{s(a)} + R_{s(n)}} \times \\ & \times \left[\cos \gamma_0 + \frac{(X'_{q(a)} + X_{q(n)})}{(R_{s(a)} + R_{s(n)})} \times \right. \\ & \times \sin \gamma_0 - \frac{(X'_{q(a)} + X_{q(n)})}{(R_{s(a)} + R_{s(n)})} \frac{E_{m(a)}}{U_{m1}} \left(1 + \frac{E_{m(n)}}{U_{m1}} \right) \left. \right] \times \\ & \times \frac{\left[1 + \frac{(X'_{d(a)} + X_{d(n)})(X'_{q(a)} + X_{q(n)})}{(R_{s(a)} + R_{s(n)})^2} \right]}{\left[1 + \frac{(X'_{d(a)} + X_{d(n)})(X'_{q(a)} + X_{q(n)})}{(R_{s(a)} + R_{s(n)})^2} \right]}; \\ I_{q(a,n)} = & \frac{U_{m1}}{R_{s(a)} + R_{s(n)}} \times \\ & \times \left[\sin \gamma_0 - \frac{(X'_{q(a)} + X_{q(n)})}{(R_{s(a)} + R_{s(n)})} \times \right. \\ & \times \cos \gamma_0 - \frac{E_{m(a)}}{U_{m1}} \left(1 + \frac{E_{m(n)}}{U_{m1}} \right) \left. \right] \times \\ & \times \frac{\left[1 + \frac{(X'_{d(a)} + X_{d(n)})(X'_{q(a)} + X_{q(n)})}{(R_{s(a)} + R_{s(n)})^2} \right]}{\left[1 + \frac{(X'_{d(a)} + X_{d(n)})(X'_{q(a)} + X_{q(n)})}{(R_{s(a)} + R_{s(n)})^2} \right]}. \end{aligned} \quad (10)$$

Следует заметить, что поскольку якорная обмотка электрической машины представляет собой единое целое, условно состоящее из пазовой и лобовой структур, всегда выполняется равенство $R_{s(a)} + R_{s(n)} = R_s$, как в предыдущем случае.

Для упрощения зависимости (10) рассмотрим составляющие индуктивных сопротивлений $X_{d(a)}$ и $X'_{d(a)}$, $X_{q(a)}$ и $X'_{q(a)}$, $X_{d(n)}$, $X_{q(n)}$. При $B=0$ можно записать

$$X_{d(a)} = X_{ad(a)} + X_{s(a)};$$

$$X_{q(a)} = X_{aq(a)} + X_{s(a)};$$

$$X_{s(a)} = X_{\text{эл}(a)} + X_{\text{сз}(a)} + X_{\text{злр}(a)}, \quad (11)$$

где $X_{ad(a)}$, $X_{aq(a)}$, $X_{s(a)}$, $X_{\text{эл}(a)}$, $X_{\text{сз}(a)}$, $X_{\text{злр}(a)}$ – соответственно индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям пазовой структуры электрической машины, полное индуктивное сопротивление рассеяния якорной обмотки и его слагаемые (сопротивления пазового рассеяния,

дифференциального рассеяния и рассеяния лобовых частей обмотки при $B=0$).

В случае индуктора, продленного в зону лобовых соединений обмотки якоря, при $A=B=1$

$$\begin{aligned} X'_{d(a)} + X_{d(n)} &= X_{ad(a)} + X'_{s(a)} + X_{ad(n)} + X_{s(n)}; \\ X'_{q(a)} + X_{q(n)} &= X_{aq(a)} + X'_{s(a)} + X_{aq(n)} + X_{s(n)}; \\ X'_{s(a)} &= X_{сп(a)} + X_{сз(a)}; \\ X_{s(n)} &= X_{сп(n)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $X'_{d(a)}$ и $X'_{q(a)}$ — индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям пазовой части электрической машины с продленным индуктором ($A=B=1$); $X_{ad(n)}$ и $X_{aq(n)}$ — индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям лобовых соединений обмотки якоря; $X'_{s(a)}$ — индуктивное сопротивление рассеяния пазовой структуры электрической машины при $A=B=1$; $X_{s(n)}$ — индуктивное сопротивление рассеяния лобового соединения $A=B=1$.

Анализ зависимостей (11) и (12) показывает, что $X'_{d(a)} < X_{d(a)}$ и $X'_{q(a)} < X_{q(a)}$ на величину $X_{сп(n)}$, представляющую собой индуктивное сопротивление рассеяния лобовой части обмотки якоря пазовой структуры (при $B=0$). Последнее (поскольку лобовые соединения находятся в зоне относительно большого воздушного зазора) с достаточной степенью достоверности позволяет предположить, что $X_{сп(a)}$ тождественно равно

$$X_{ad(n)} + X_{s(n)} = X_{aq(n)} + X_{s(n)} \equiv X_{сп(a)}.$$

Исходя из изложенного, примем к рассмотрению следующие соотношения, упрощающие дальнейший анализ:

$$\begin{aligned} X_{d(a)} &= (X'_{d(a)} + X_{d(n)}) = X_d; \\ X_{q(a)} &= (X'_{q(a)} + X_{q(n)}) = X_q. \end{aligned} \quad (13)$$

На основании зависимостей (13) для случая $A=B=1$ окончательно имеем

$$\begin{aligned} \dot{I}_{d(a,n)} &= \frac{U_{m1}}{R_s} \frac{\left[\cos \gamma_0 + \frac{X_q}{R_s} \sin \gamma_0 - \frac{X_q}{R_s} \frac{E_{m1}}{U_{m1}} k_n \right]}{\left[1 + \frac{X_d X_q}{R_s^2} \right]}; \\ \dot{I}_{q(a,n)} &= \frac{U_{m1}}{R_s} \frac{\left[\sin \gamma_0 + \frac{X_d}{R_s} \cos \gamma_0 - \frac{E_{m1}}{U_{m1}} k_n \right]}{\left[1 + \frac{X_d X_q}{R_s^2} \right]}, \end{aligned}$$

где $k_n = (1 + E_{m(n)}/E_{m1})$ — коэффициент, характеризующий относительное приращение ЭДС якорной обмотки.

$$\begin{aligned} M_{эл} &= \frac{pm}{2\omega} [X_d \dot{I}_d \dot{I}_{q(a,n)} + k_n E_{m1} \dot{I}_{q(a,n)} - X_q \dot{I}_d \dot{I}_{q(a,n)}] = \\ &= \frac{m}{2\Omega} [k_n E_{m1} I_{q(a,n)} + (X_d - X_q) I_d I_{q(a,n)}]. \end{aligned}$$

Воспользовавшись системой базовых величин, в качестве которых можно принять $U_6 = U_{m1}$, $R_6 = R_s$, $\Omega_6 = \Omega_{0(a)}$, $I_6 = U_6/R_6$, $\Psi_6 = U_6/(p\Omega_6)$, $P_6 = U_6 I_6 (m/2)$,

$M_6 = P_6/\Omega_6$, и полагая $X_d/X_q = \varepsilon$, представленные выше зависимости могут быть приведены к относительному виду, более удобному для последующего анализа.

Для случая $A=1$ и $B=0$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{d(1)} = \dot{i}_{d(a)} &= \frac{[(\varepsilon \cos \gamma_0 + \tau_0 \nu \sin \gamma_0) - \tau_0 \nu^2]}{[\varepsilon + (\tau_0 \nu)^2]}; \\ \dot{i}_{q(1)} = \dot{i}_{q(a)} &= \frac{\varepsilon[(\sin \gamma_0 - \tau_0 \nu \cos \gamma_0) - \nu]}{[\varepsilon + (\tau_0 \nu)^2]}; \\ \psi_{d(1)} = \psi_{d(a)} &= (\tau_0 \dot{i}_{d(a)} + 1); \\ \psi_{q(1)} = \psi_{q(a)} &= \frac{(\tau_0 \dot{i}_{q(a)})}{\varepsilon}; \\ q_{1(1)} = q_{1(a)} &= (\dot{i}_{d(a)} \cos \gamma_0 + \dot{i}_{q(a)} \sin \gamma_0); \\ \mu_{1(1)} = \mu_{(a)} &= [\dot{i}_{q(a)} + \dot{i}_{q(a)} \dot{i}_{d(a)} \tau_0 (\varepsilon - 1) / \varepsilon]; \\ q_{2(1)} = q_{2(a)} &= \mu_{(a)} \nu; \\ \Delta q_{(1)} = \Delta q_{Cu(a)} &= (q_{1(a)} - q_{2(a)}); \\ \eta_{(1)} = \eta_{(a)} &= q_{2(1)} / q_{1(1)} = q_{2(a)} / q_{1(a)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для случая $A=1$ и $B=1$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{d(2)} = \dot{i}_{d(a,n)} &= \frac{[(\varepsilon \cos \gamma_0 + \tau_0 \nu \sin \gamma_0) - k_n \tau_0 \nu^2]}{[\varepsilon + (\tau_0 \nu)^2]}; \\ \dot{i}_{q(2)} = \dot{i}_{q(a,n)} &= \frac{\varepsilon[(\sin \gamma_0 - \tau_0 \nu \cos \gamma_0) - k_n \nu]}{[\varepsilon + (\tau_0 \nu)^2]}; \\ \psi_{d(2)} = \psi_{d(a,n)} &= (\tau_0 \dot{i}_{d(a,n)} + k_n); \\ \psi_{q(2)} = \psi_{q(a,n)} &= \frac{(\tau_0 \dot{i}_{q(a,n)})}{\varepsilon}; \\ q_{1(2)} = q_{1(a,n)} &= (\dot{i}_{d(a,n)} \cos \gamma_0 + \dot{i}_{q(a,n)} \sin \gamma_0); \\ \mu_{1(2)} = \mu_{(a,n)} &= [k_n \dot{i}_{q(a,n)} + \dot{i}_{q(a,n)} \dot{i}_{d(a,n)} \tau_0 (\varepsilon - 1) / \varepsilon]; \\ q_{2(2)} = q_{2(a,n)} &= \mu_{(a,n)} \nu; \\ \Delta q_{(2)} = \Delta q_{Cu(a,n)} &= (q_{1(a,n)} - q_{2(a,n)}); \\ \eta_{(2)} = \eta_{(a,n)} &= q_{2(2)} / q_{1(2)} = q_{2(a,n)} / q_{1(a,n)}. \end{aligned} \quad (15)$$

В уравнениях (14) и (15) с целью упрощения последующих записей индексы 1 и 2 присвоены характеристикам электрических машин рассматриваемых случаев.

Из относительных зависимостей (14) и (15) следует

$$\begin{aligned} q_{1n(1)} = 1; \mu_{n(1)} &= \left[\sin \gamma_0 + \frac{\tau_0 (\varepsilon - 1)}{2\varepsilon} \sin 2\gamma_0 \right]; \\ v_{0(1)} &= \frac{\sin \gamma_0}{(1 + \tau_0 \cos \gamma_0)}; \\ q_{1n(2)} = 1; \mu_{n(2)} &= \left[k_n \sin \gamma_0 + \frac{\tau_0 (\varepsilon - 1)}{2\varepsilon} \sin 2\gamma_0 \right]; \\ v_{0(2)} &= \frac{\sin \gamma_0}{(k_n + \tau_0 \cos \gamma_0)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $q_{1n(1)}$, $q_{1n(2)}$, $\mu_{n(1)}$, $\mu_{n(2)}$, $v_{0(1)}$, $v_{0(2)}$ — относительные значения пусковой мощности, пускового момента и частоты вращения идеального холостого хода для каждого из вариантов.

Из соотношений (16) следует, что при равных мощностях потребления из сети питания ($q_{1(1)}=q_{1(2)}$) электрическая машина с активными лобовыми соединениями в неявнополюсной конструкции ($\varepsilon=1$) развивает в k_n раз больший пусковой момент, чем классический прототип, имеющий структуру $A=1$, $B=0$, поскольку возникающая в данном случае добавочная ЭДС вращения в лобовых соединениях от магнитного потока полюсов продленного индуктора приводит к тождественным изменениям силовых соотношений в электрической машине.

При $\varepsilon \neq 1$ и $\gamma_0 \geq \pi/2$ возникающие реактивные свойства вентильного двигателя, не зависящие в данном случае от k_n , приводят к направленному снижению эффекта от использования лобовых соединений тем больше, чем больше ε отличается от 1.

Данное обстоятельство следует иметь в виду при реализации конкретных конструкций электрических машин. Также очевидно, что наибольший эффект при использовании объема лобовых соединений возникает в машинах, имеющих гладкий либо полый (диэлектрический) якорь, вся обмотка которого, включая лобовые части, может быть размещена в основном магнитном поле продленного индуктора [4], что благоприятствует возникновению условий наибольшего возрастания коэффициента k_n .

Подобные электрические машины вследствие значительного воздушного зазора характеризуются также практически равными индуктивными сопротивлениями по их продольной и поперечной оси.

Исходя из изложенного, в дальнейшем рассмотрим подробно лишь свойства электрических машин неявнополюсного типа ($\varepsilon=1$) с гладким либо диэлектрическим якорем. В данном случае при $A=1$ и $B=0$

$$\begin{aligned} i_{d(1)} &= \frac{[(\cos \gamma_0 + \tau_0 v \sin \gamma_0) - \tau_0 v^2]}{[1 + (\tau_0 v)^2]}; \\ i_{q(1)} &= \frac{[(\cos \gamma_0 - \tau_0 v \sin \gamma_0) - \tau_0 v^2]}{[1 + (\tau_0 v)^2]}; \\ q_{1(1)} &= (i_{d(1)} \cos \gamma_0 + i_{q(1)} \sin \gamma_0) = \\ &= \frac{[1 - v(\sin \gamma_0 + \tau_0 v \cos \gamma_0)]}{[1 + (\tau_0 v)^2]}; \\ \mu_{(1)} &= i_{q(1)} v; \\ q_{2(1)} &= \mu_{(1)} v; \\ \Delta q_{(1)} &= \Delta q_{cu(1)} = (q_{1(1)} - q_{2(1)}); \\ \eta_{(1)} &= q_{2(1)} / q_{1(1)}, \end{aligned} \quad (17)$$

а при $A=1$ и $B=1$

$$\begin{aligned} i_{d(2)} &= \frac{[(\cos \gamma_0 + \tau_0 v \sin \gamma_0) - k_n \tau_0 v^2]}{[1 + (\tau_0 v)^2]}; \\ i_{q(2)} &= \frac{[(\sin \gamma_0 + \tau_0 v \cos \gamma_0) - k_n v]}{[1 + (\tau_0 v)^2]}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{1(2)} &= (i_{d(2)} \cos \gamma_0 + i_{q(2)} \sin \gamma_0) = \\ &= \frac{[1 - k_n v(\sin \gamma_0 + \tau_0 v \cos \gamma_0)]}{[1 + (\tau_0 v)^2]}; \\ \mu_{(2)} &= k_n i_{q(2)} v; \\ q_{2(2)} &= \mu_{(2)} v; \\ \Delta q_{(2)} &= (q_{1(2)} - q_{2(2)}); \\ \eta_{(2)} &= q_{2(2)} / q_{1(2)}. \end{aligned} \quad (18)$$

Из выражений (17) и (18) можно установить, что в точке пересечения механических характеристик $\mu_{(1)}=f(v)$ и $\mu_{(2)}=f(v)$, в которой соблюдается равенство развиваемых электромагнитных моментов и полезных мощностей $q_{2(1)}=q_{2(2)}$,

$$v = v_{(1,2)} = \frac{\sin \gamma_0}{[(k_n + 1) + \tau_0 \cos \gamma_0]}.$$

Электрические же потери в машине с активными лобовыми соединениями ($A=B=1$), например при нейтральной коммутации фазных обмоток ($\gamma_0=\pi/2$), в $(k_n)^2$ меньше, а КПД в k_n раз больше, чем в машине традиционного (классического) исполнения ($A=1$, $B=0$):

$$\frac{\Delta q_{(2)}}{\Delta q_{(1)}} = \frac{(1 - k_n v_{(1,2)})^2}{(1 - v_{(1,2)})^2} = \frac{1}{k_n^2}; \quad \frac{\eta_{(2)}}{\eta_{(1)}} = \frac{(1 - v_{(1,2)})}{(1 - k_n v_{(1,2)})} = k_n.$$

В общем случае в исследуемой точке пересечения механических характеристик ($v=v_{(1,2)}$)

$$\begin{aligned} \frac{\Delta q_{(2)}}{\Delta q_{(1)}} &= \frac{(1 - 2k_n v_{(1,2)} \sin \gamma_0 + k_n^2 v_{(1,2)}^2)}{(1 - 2v_{(1,2)} \sin \gamma_0 + v_{(1,2)}^2)}; \\ \frac{\eta_{(2)}}{\eta_{(1)}} &= \left[\frac{q_{2(2)}}{q_{2(1)}} \cdot \frac{q_{1(1)}}{q_{1(2)}} \right] = \frac{q_{1(1)}}{q_{1(2)}} = \\ &= \frac{[1 - v_{(1,2)}(\sin \gamma_0 + \tau_0 v_{(1,2)} \cos \gamma_0)]}{[1 - k_n v_{(1,2)}(\sin \gamma_0 + \tau_0 v_{(1,2)} \cos \gamma_0)]}. \end{aligned}$$

Отмеченные факторы характеризуют новые свойства электрической машины, возникающие при активном режиме работы ее лобовых соединений.

Выводы

1. Активизация объема лобовых соединений приводит в рамках рассмотрения одной и той же электрической машины при прочих равных условиях (равенство электромагнитных моментов и развиваемых структурами мощностей) к возрастанию пускового момента и КПД машины в k_n раз, а также снижению потерь в ее обмотках в $(k_n)^2$ раз, что, безусловно, благоприятствует улучшению ее теплового состояния и возможности генерации дополнительной мощности.
2. Из анализа зависимостей выявлено, что при нейтральной коммутации фазных обмоток ($\gamma_0=\pi/2$) использование объема лобовых соединений при-

водит к пропорциональному увеличению электромагнитного момента и мощности. Отличие же коммутации от нейтральной ($\gamma_0 > \pi/2$) при неизменном значении γ_0 способствует дальнейше-

му улучшению показателей и характеристик электрической машины вследствие более благоприятного фазового взаимодействия электромагнитных полей якоря и индуктора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толвинский В.А. Электрические машины постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 468 с.
2. Троицкий В.А. Магнитодиэлектрики в конструкции электрических машин. – Ташкент: Наука УзССР, 1965. – 209 с.
3. Троицкий В.А., Ролик А.И., Яковлев А.И. Магнитодиэлектрики в силовой электротехнике. – Киев: Техника, 1983. – 207 с.
4. Магнитное поле и ЭДС малоинерционных магнитоэлектрических машин / Е.Г. Коков, А.С. Жибинов, Э.Р. Гейнц, Г.С. Цехмestрюк // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 158–161.

Поступила 09.01.2013 г.

УДК 62-83-523

ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев, А.Д. Брагин

Томский политехнический университет
E-mail: OGIZ@yandex.ru

Рассмотрены принципы обеспечения живучести асинхронного электропривода с частотным преобразователем и резервным полумостом с устранением отказов силовых ключей. Приведены результаты моделирования процессов в электроприводе с алгоритмами восстановления работоспособности при переключении структуры преобразователя. Выполнена оценка эффективности алгоритмов восстановления работоспособности без отключения и с отключением фазных токов асинхронного двигателя.

Ключевые слова:

Живучесть асинхронного электропривода, отказ элементов преобразователя частоты, резервирование элементов электропривода.

Key words:

Fault-tolerant induction motor drive, faults of the inverter, backup of the electric drive.

Аварийное состояние исполнительных электроприводов (ЭП) промышленных объектов опасных производств может привести к нарушению безопасной эксплуатации оборудования и значительным экономическим потерям в ядерной, военной, химической, строительной, металлургической и транспортной отраслях.

Свойство объекта или системы сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов определяется термином «живучесть». Для вышеперечисленных областей применения асинхронного двигателя (АД) задача обеспечения свойства живучести становится определяющей. Из теории живучести технических систем известно, что свойством живучести обладают только избыточные системы, а избыточность в технических системах достигается через резервирование. Различают пять видов резервирования: структурное, функциональное, информационное, нагрузочное и временное, которые могут быть применены в электроприводе отдельно или в определенных комбинациях.

Известные устройства и способы обеспечения живучести ЭП переменного тока на основе АД рассмотрены в работе [1]. Построение асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести рассмотрено в работах [2, 3] для случая формирования избыточности АД с применением функционального резервирования за счет формирования кругового вращающегося поля в аварийном двухфазном режиме трехфазного двигателя. Такой подход позволяет обеспечить живучесть без дополнительных аппаратных затрат, однако он ограничен в применении, так как не позволяет полностью восстановить работоспособность электропривода во всем диапазоне нагрузок и частот вращения.

В статье предложен способ обеспечения свойства живучести АД за счет микроконтроллерного управления электроприводом с реализацией алгоритма восстановления работоспособности на основе резервных элементов, позволяющий полностью восстановить работоспособность ЭП, выполненного по схеме со связанными и развязанными фазами двигателя (с независимым формированием фазных токов преобразователя частоты), при вне-