

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ВЕКТОР ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Обобщенная асинхронная машина показана на рисунке 1.

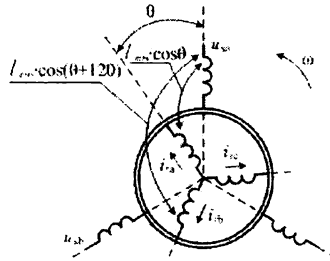


Рис. 1. Обобщённая асинхронная машина:  $r_s, l_s, l_{ms}$  – параметры статорной обмотки;  $r_r, l_r, l_{mr}$  – параметры роторной обмотки;  $l_{ms} = l_{mr} = l_m$  – коэффициенты взаимоиנדуктивности

Выполним математическое описание обобщенной синхронной машины:

$$\begin{cases} u_{sa} = i_{sa} r_s + \frac{d\psi_{sa}}{dt}; & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{sb} = i_{sb} r_s + \frac{d\psi_{sb}}{dt}; & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{sc} = i_{sc} r_s + \frac{d\psi_{sc}}{dt}; & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{ra} = i_{ra} r_r + \frac{d\psi_{ra}}{dt}; & (4) \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{rb} = i_{rb} r_r + \frac{d\psi_{rb}}{dt}; & (5) \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{rc} = i_{rc} r_r + \frac{d\psi_{rc}}{dt}; & (6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \psi_{2a} = l_r \cdot i_{sa} + l_{m12} \cdot (i_{rb} + i_{rc}) + (l_{m12} \cdot \cos(\theta)) \cdot i_{ra} + (l_{m12} \cdot \cos(\theta + 120)) \cdot i_{rb} + \\ (l_{m12} \cdot \cos(-\theta + 240)) \cdot i_{rc}; \\ \psi_{2b} = l_r \cdot i_{sb} + l_{m13} \cdot (i_{ra} + i_{rc}) + (l_{m13} \cdot \cos(\theta + 240)) \cdot i_{ra} + (l_{m13} \cdot \cos(\theta)) \cdot i_{rb} + \\ (l_{m13} \cdot \cos(\theta + 120)) \cdot i_{rc}; \\ \psi_{2c} = l_r \cdot i_{sc} + l_{m14} \cdot (i_{ra} - i_{rb}) + (l_{m14} \cdot \cos(\theta + 120)) \cdot i_{ra} + (l_{m14} \cdot \cos(\theta + 240)) \cdot i_{rb} + \\ (l_{m14} \cdot \cos(\theta)) \cdot i_{rc}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \psi_{r_a} = i_r \cdot l_{r_a} + l_{mr} \cdot (i_{r_b} + i_{r_c}) + (l_{msr} \cdot \cos(-\theta)) \cdot i_{s_a} + (l_{msr} \cdot \cos(-\theta + 120)) \cdot i_{s_b} + \\ \quad (l_{msr} \cdot \cos(-\theta + 240)) \cdot i_{s_c} \\ \psi_{r_b} = i_r \cdot l_{r_b} + l_{mr} \cdot (i_{r_a} + i_{r_c}) + (l_{msr} \cdot \cos(-\theta + 240)) \cdot i_{s_a} + (l_{msr} \cdot \cos(-\theta)) \cdot i_{s_b} + \\ \quad (l_{msr} \cdot \cos(-\theta + 120)) \cdot i_{s_c} \\ \psi_{r_c} = i_r \cdot l_{r_c} + l_{mr} \cdot (i_{r_a} + i_{r_b}) + (l_{msr} \cdot \cos(-\theta + 120)) \cdot i_{s_a} + (l_{msr} \cdot \cos(-\theta + 240)) \cdot i_{s_b} + \\ \quad (l_{msr} \cdot \cos(-\theta)) \cdot i_{s_c} \end{cases}$$

$$M_{\Sigma M} - M_c = J \frac{du}{dt}; \quad \frac{du_{\text{сром}}}{dt} = u; \quad u_{\text{сром}} = \frac{u_{\text{эл}}}{p}$$

Из уравнений (1 – 3) выразим:

$$\underbrace{\vec{a}_1 \cdot u_{sa} + \vec{a}_2 \cdot u_{sb} + \vec{a}_3 \cdot u_{sc}}_{\vec{U}_s} = \underbrace{(\vec{a}_1 \cdot i_{sa} + \vec{a}_2 \cdot i_{sb} + \vec{a}_3 \cdot i_{sc}) \cdot r_s}_{\vec{I}_s} + \frac{d}{dt} \underbrace{(\vec{a}_1 \cdot \Psi_{sa} + \vec{a}_2 \cdot \Psi_{sb} + \vec{a}_3 \cdot \Psi_{sc})}_{\vec{\Psi}_s}$$

$$\begin{aligned} \vec{U}_s &= \vec{I}_s \cdot r_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} \\ \begin{cases} i_{sa} = \frac{I_m}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \cdot e^{-j\theta}; \\ i_{sb} = \frac{I_m}{2} (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120}) \cdot e^{-j\theta}; \\ i_{sc} = \frac{I_m}{2} (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120}) \cdot e^{-j\theta}; \\ u_{sa} = \frac{U_m}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \cdot e^{-j\theta}; \\ u_{sb} = \frac{U_m}{2} (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120}) \cdot e^{-j\theta}; \\ u_{sc} = \frac{U_m}{2} (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120}) \cdot e^{-j\theta}. \end{cases} \end{aligned}$$

Пространственный вектор напряжения определяется:

$$\begin{aligned} \vec{U}_s(t) &= \frac{2}{3} [\vec{a}_1 \cdot u_a + \vec{a}_2 \cdot u_b + \vec{a}_3 \cdot u_c] = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_m}{2} \cdot [1e^{j0} \cdot (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) + \\ &+ 1e^{j120} \cdot (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120}) + 1e^{j240} \cdot (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120})] \cdot e^{j\theta} = \\ &= \frac{U_m}{3} \cdot [ (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) + (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} \cdot e^{j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120} \cdot e^{j120}) + \\ &+ (e^{j\omega t} \cdot e^{-j120} \cdot e^{-j120} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j120} \cdot e^{-j120}) ] \cdot e^{j\theta} = \frac{U_m}{3} \cdot [ e^{j\omega t} + e^{-j\omega t} + e^{j\omega t} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j240} + \\ &+ e^{j\omega t} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-j240} ] = \frac{U_m}{3} \cdot [ 3e^{j\omega t} + e^{-j\omega t} \cdot (1 + e^{-j120} + e^{-j240}) ] \cdot e^{j\theta} = \vec{U}_s \cdot e^{j\theta} \end{aligned}$$

Обобщенный вектор потокосцепления статора имеет вид:

$$\bar{\Psi}_s(t) = \frac{2}{3} (\Psi_{sa} \cdot \bar{a}_1 + \Psi_{sb} \cdot \bar{a}_2 + \Psi_{sc} \cdot \bar{a}_3),$$

где  $\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$  – мгновенные значения потокосцеплений с фазами статорной

обмотки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{sa} = \underbrace{i_{sa} \cdot l_s}_{\bar{\Psi}_{ls}} + \underbrace{l_{ms} \cdot (i_{sb} + i_{sc})}_{\bar{\Psi}_{lms}} + \underbrace{l_{mrs} \cdot [i_{ra} \cdot \cos \theta + i_{rb} \cdot \cos(\theta + 120) + i_{rc} \cdot \cos(\theta + 240)]}_{\bar{\Psi}_{lmrs}} \\ \Psi_{sb} = \underbrace{i_{sb} \cdot l_s}_{\bar{\Psi}_{ls}} + \underbrace{l_{ms} \cdot (i_{sa} + i_{sc})}_{\bar{\Psi}_{lms}} + \underbrace{l_{mrs} \cdot [i_{ra} \cdot \cos(\theta + 240) + i_{rb} \cdot \cos \theta + i_{rc} \cdot \cos(\theta + 120)]}_{\bar{\Psi}_{lmrs}} \\ \Psi_{sc} = \underbrace{i_{sc} \cdot l_s}_{\bar{\Psi}_{ls}} + \underbrace{l_{ms} \cdot (i_{sa} + i_{sb})}_{\bar{\Psi}_{lms}} + \underbrace{l_{mrs} \cdot [i_{ra} \cdot \cos(\theta + 120) + i_{rb} \cdot \cos(\theta + 240) + i_{rc} \cdot \cos \theta]}_{\bar{\Psi}_{lmrs}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{sa} = I_{ms} \cdot \cos(\omega t - \varphi_{is}) = \frac{I_{ms}}{2} \cdot [e^{j \omega t} + e^{-j \omega t}] \cdot e^{j \varphi_{is}}; \\ i_{sb} = I_{ms} \cdot \cos(\omega t - 120 - \varphi_{is}) = \frac{I_{ms}}{2} \cdot [e^{j(\omega t - 120)} + e^{-j(\omega t - 120)}] \cdot e^{j \varphi_{is}}; \\ i_{sc} = I_{ms} \cdot \cos(\omega t - 240 - \varphi_{is}) = \frac{I_{ms}}{2} \cdot [e^{j(\omega t - 240)} + e^{-j(\omega t - 240)}] \cdot e^{j \varphi_{is}}. \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{ls}(t) &= l_s \cdot (i_{sa} \cdot e^{j0} + i_{sb} \cdot e^{j120} + i_{sc} \cdot e^{j240}) = \frac{I_{ms}}{2} \cdot l_s \cdot [e^{j \omega t} + e^{-j \omega t} + e^{j(\omega t - 120)} \cdot e^{j120} + \\ &+ e^{j(\omega t - 120)} \cdot e^{j120} + e^{j(\omega t - 240)} \cdot e^{j240} + e^{j(\omega t - 240)} \cdot e^{j240}] \cdot e^{j \varphi_{is}} = \frac{I_{ms}}{2} \cdot l_s \cdot [e^{j \omega t} + e^{-j \omega t} + \\ &+ e^{j \omega t} \cdot e^{-j120} \cdot e^{j120} + e^{-j \omega t} \cdot e^{j120} \cdot e^{j120} + e^{j \omega t} \cdot e^{-j240} \cdot e^{j240} + e^{-j \omega t} \cdot e^{j240} \cdot e^{j240}] \cdot e^{j \varphi_{is}} = \\ &= \frac{I_{ms}}{2} \cdot l_s \cdot [3e^{j \omega t} + e^{-j \omega t} \cdot (1 + e^{j120} + e^{j240})] \cdot e^{j \varphi_{is}} = \frac{3}{2} \cdot \bar{I}_s \cdot l_s \cdot e^{j \omega t} \cdot e^{j \varphi_{is}} = I_{ms} \cdot e^{j \varphi_{is}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{lms}(t) &= l_{ms} \cdot [(i_{sb} + i_{sc}) \cdot e^{j0} + (i_{sa} + i_{sc}) \cdot e^{j120} + (i_{sa} + i_{sb}) \cdot e^{j240}] \cdot e^{j \varphi_{is}} = \\ &= -l_{ms} \cdot [i_{sa} \cdot e^{j0} + i_{sb} \cdot e^{j120} + i_{sc} \cdot e^{j240}] \cdot e^{j \varphi_{is}} = -\frac{3}{2} \cdot \bar{I}_s \cdot l_{ms} \cdot e^{j \omega t} \cdot e^{j \varphi_{is}}, \end{aligned}$$

(см. вывод для  $\bar{\Psi}_{ls}(t)$ ).

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{lmrs}(t) &= l_{mrs} \cdot [(i_{ra} \cdot \cos u + i_{rb} \cdot \cos(u + 120) + i_{rc} \cdot \cos(u + 240)) \cdot e^{j0} + \\ &+ (i_{ra} \cdot \cos(u + 240) + i_{rb} \cdot \cos u + i_{rc} \cdot \cos(u + 120)) \cdot e^{j120} + \\ &+ (i_{ra} \cdot \cos(u + 120) + i_{rb} \cdot \cos(u + 240) + i_{rc} \cdot \cos u) \cdot e^{j240}]. \end{aligned}$$

Первое слагаемое обозначим А, следующее – В, последнее – С. Слагаемое А:

$$\begin{aligned} i_{ra} \cdot \cos u &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j \omega t} + e^{-j \omega t}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j u} + e^{-j u}) \cdot e^{j \varphi_{is}} = \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j \omega t} \cdot e^{j u} + e^{j \omega t} \cdot e^{-j u} + \\ &+ e^{-j \omega t} \cdot e^{j u} + e^{-j \omega t} \cdot e^{-j u}) \cdot e^{j \varphi_{is}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_{rb} \cdot \cos(u + 120) &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(u_t-120)} + e^{-j(u_t-120)}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j(u+120)} + e^{-j(u+120)}) \cdot e^{j\omega t} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} + \\
&+ e^{j u_t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120}) \cdot e^{j\omega t} = \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{j u} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 240} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240} + \\
&+ e^{j u_t} \cdot e^{-j u}) \cdot e^{j\omega t} \\
i_{rc} \cdot \cos(u + 240) &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(u_t-240)} + e^{-j(u_t-240)}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j(u+240)} + e^{-j(u+240)}) \cdot e^{j\omega t} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{-j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{-j 120} + \\
&+ e^{j u_t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 120}) \cdot e^{j\omega t} = \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{j u} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 240} + \\
&+ e^{j u_t} \cdot e^{-j u}) \cdot e^{j\omega t} \\
A &= \frac{I_{mr}}{4} \cdot [3 \cdot e^{j u_t} \cdot e^{j u} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot (1 + e^{j 240} + e^{-j 240}) + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot (1 + e^{j 240} + e^{-j 240}) + \infty \\
&+ 3 \cdot e^{-j u_t} \cdot e^{-j u}] \cdot e^{j\omega t} = \frac{3}{4} \cdot I_{mr} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{j u} + e^{-j u_t} \cdot e^{-j u}) \cdot e^{j\omega t}
\end{aligned}$$

Слагаемое В:

$$\begin{aligned}
i_{ra} \cdot \cos(u + 240) \cdot e^{j 120} &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j u_t} + e^{-j u_t}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j(u+240)} + e^{-j(u+240)}) \cdot e^{j 120} \cdot e^{j\omega t} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 240} \cdot e^{j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 240} \cdot e^{j 120} + \\
&+ e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{j 120}) \cdot e^{j\omega t} = \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{j u} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} + \\
&+ e^{-j u_t} \cdot e^{j u}) \cdot e^{j\omega t} \\
i_{rb} \cdot \cos u \cdot e^{j 120} &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(u_t-120)} + e^{-j(u_t-120)}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j u} + e^{-j u}) \cdot e^{j 120} \cdot e^{j\omega t} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} + e^{j u_t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240} + e^{j u_t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} + \\
&+ e^{j u_t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 120}) \cdot e^{j\omega t} = \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u_t} \cdot e^{j u} + e^{-j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240} + e^{-j u_t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240} + \\
&+ e^{j u_t} \cdot e^{-j u}) \cdot e^{j\omega t}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_{rc} \cdot \cos(u + 120) \cdot e^{j 120} &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(u t - 240)} + e^{-j(u t - 240)}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j(u + 120)} + e^{-j(u + 120)}) \cdot e^{j 120} \cdot e^{j \varphi r} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j 120} + e^{j u t} \cdot e^{j 240} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j 120} + \\
&\quad + e^{-j u t} \cdot e^{j 240} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j 120} + e^{-j u t} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j 120}) \cdot e^{j \varphi r} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{j u} + e^{j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 240} + e^{-j u t} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} + e^{-j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240}) \cdot e^{j \varphi r}, \\
B &= \frac{I_{mr}}{4} \cdot [3 \cdot e^{j u t} \cdot e^{j u} + e^{j u t} \cdot e^{-j u} \cdot (1 + e^{-j 120} + e^{-j 240}) + e^{-j u t} \cdot e^{j u} \cdot (1 + e^{j 240} + e^{j 120}) + \\
&\quad + e^{-j u t} \cdot e^{-j u} \cdot (e^{-j 120} + e^{-j 240} + e^{j 240})] \cdot e^{j \varphi r} = \frac{3}{4} \cdot I_{mr} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{j u} + e^{-j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240}) \cdot e^{j \varphi r}.
\end{aligned}$$

Слагаемое С:

$$\begin{aligned}
i_{ra} \cdot \cos(u + 120) \cdot e^{j 240} &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j u t} + e^{-j u t}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j(u + 120)} + e^{-j(u + 120)}) \cdot e^{j 240} \cdot e^{j \varphi r} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j 240} + e^{j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j 240} + e^{-j u t} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j 240} + \\
&\quad + e^{-j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j 240}) \cdot e^{j \varphi r} = \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{j u} + e^{j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} + e^{-j u t} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 120} + \\
&\quad + e^{-j u t} \cdot e^{-j u}) \cdot e^{j \varphi r}, \\
i_{rb} \cdot \cos(u + 240) \cdot e^{j 240} &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(u t - 120)} + e^{-j(u t - 120)}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j(u + 240)} + e^{-j(u + 240)}) \cdot e^{j 240} \cdot e^{j \varphi r} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 240} \cdot e^{j 240} + e^{j u t} \cdot e^{-j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{j 240} + \\
&\quad + e^{-j u t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 240} \cdot e^{j 240} + e^{-j u t} \cdot e^{j 120} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{j 240}) \cdot e^{j \varphi r} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{j u} + e^{j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{-j 120} + e^{-j u t} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 240} + e^{-j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 120}) \cdot e^{j \varphi r}, \\
i_{rc} \cdot \cos u \cdot e^{j 240} &= \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(u t - 240)} + e^{-j(u t - 240)}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j u} + e^{-j u}) \cdot e^{j 240} \cdot e^{j \varphi r} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 240} + e^{j u t} \cdot e^{-j 240} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240} + \\
&\quad + e^{-j u t} \cdot e^{j 240} \cdot e^{j u} \cdot e^{j 240} + e^{-j u t} \cdot e^{j 240} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 240}) \cdot e^{j \varphi r} = \\
&= \frac{I_{mr}}{4} \cdot (e^{j u t} \cdot e^{j u} + e^{-j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 120} + e^{-j u t} \cdot e^{-j u} \cdot e^{j 120} + e^{j u t} \cdot e^{-j u}) \cdot e^{j \varphi r},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C &= \frac{I_{mr}}{4} \cdot [3 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{ju} + e^{j\omega t} \cdot e^{-ju} \cdot (1 + e^{j120} + e^{-j120}) + e^{-j\omega t} \cdot e^{ju} \cdot (1 + e^{j240} + e^{j120}) + \\
&+ e^{-j\omega t} \cdot e^{-ju} \cdot (e^{j120} + e^{j120} + e^{j120})] \cdot e^{j\varphi_r} = \frac{3}{4} \cdot I_{mr} \cdot (e^{j\omega t} \cdot e^{ju} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-ju} \cdot e^{j120}) \cdot e^{j\varphi_r} \\
A+B+C &= \frac{3}{4} \cdot I_{mr} \cdot (e^{j\omega t} \cdot e^{ju} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-ju} + e^{j\omega t} \cdot e^{ju} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-ju} \cdot e^{j240} + e^{j\omega t} \cdot e^{ju} + \\
&+ e^{-j\omega t} \cdot e^{-ju} \cdot e^{j120}) \cdot e^{j\varphi_r} = \frac{3}{4} \cdot I_{mr} \cdot (3 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{ju} + e^{-j\omega t} \cdot e^{-ju} \cdot (1 + e^{j240} + e^{j120})) = \\
&= \frac{9}{4} \cdot I_{mr} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{ju} \cdot e^{j\varphi_r},
\end{aligned}$$

$$\boxed{\bar{\Psi}_{lmrs}(t) = \frac{9}{4} \cdot \bar{I}_r \cdot l_{mrs} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{ju}}$$

$$\begin{aligned}
\bar{\Psi}_s(t) &= \frac{2}{3} \cdot (\Psi_{sa} \cdot \bar{a}_1 + \Psi_{sb} \cdot \bar{a}_2 + \Psi_{sc} \cdot \bar{a}_3) = \frac{2}{3} \cdot (\bar{\Psi}_{ls}(t) + \bar{\Psi}_{lms}(t) + \bar{\Psi}_{lmrs}(t)) = \\
&= \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{3}{2} \cdot \bar{I}_s \cdot l_s \cdot e^{j\omega t} - \frac{3}{2} \cdot \bar{I}_s \cdot l_{ms} \cdot e^{j\omega t} + \frac{9}{4} \cdot \bar{I}_r \cdot l_{mrs} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{ju} \right) = \\
&= (l_s - l_{ms}) \cdot \bar{I}_s \cdot e^{j\omega t} + \frac{3}{2} \cdot \bar{I}_r \cdot l_{mrs} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{ju} = \\
&= [(l_s - l_{ms}) \cdot \bar{I}_s + \frac{3}{2} \cdot \bar{I}_r \cdot l_{mrs} \cdot e^{ju}] \cdot e^{j\omega t}.
\end{aligned}$$

Обозначим  $l_s - l_{ms} = L_s$ ;  $\frac{3}{2} \cdot l_{mrs} = L_m$ ; получим:

$$\bar{\Psi}_s(t) = [L_s \cdot \bar{I}_s + (L_m \cdot e^{ju}) \cdot \bar{I}_r] \cdot e^{j\omega t} = \bar{\Psi}_s \cdot e^{j\omega t},$$

где  $\bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{I}_s + (L_m \cdot e^{ju}) \cdot \bar{I}_r$  – обобщенный вектор потокосцепления статора [1].

### Библиографический список

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Пер. с нем. М.Л.: Госэнергоиздат, 1963. 735 с.: ил.