

Пространственный вектор потокосцепления ротора АД

$$\begin{aligned}
 \left| \begin{array}{l} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{array} \right| &= \left| \begin{array}{l} l_r \cdot i_{ra} \\ l_r \cdot i_{rb} \\ l_r \cdot i_{rc} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} l_{mr} \cdot (i_{rb} + i_{rc}) \\ l_{mr} \cdot (i_{ra} + i_{rc}) \\ l_{mr} \cdot (i_{ra} + i_{rb}) \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} l_{msr} \cdot [i_{sa} \cdot \cos \theta + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sc} \cdot \cos(\theta - 240)] \\ l_{msr} \cdot [i_{sa} \cdot \cos(\theta - 240) + i_{sb} \cdot \cos \theta + i_{sc} \cdot \cos(\theta - 120)] \\ l_{msr} \cdot [i_{sa} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 240) + i_{sc} \cdot \cos \theta] \end{array} \right| \\
 \psi_r & \quad \psi_{lr} & & \psi_{lmsr}
 \end{aligned}$$

$$\psi_r = \frac{2}{3} \cdot (\psi_{ra} \cdot a_1 + \psi_{rb} \cdot a_2 + \psi_{rc} \cdot a_3)$$

$$\boxed{\psi_r = \psi_{lr} + \psi_{lmr} + \psi_{lmsr}}$$

$$\begin{aligned}
\psi_{lr} &= \frac{2}{3} \cdot l_r \cdot [i_{ra} \cdot a_1 + i_{rb} \cdot a_2 + i_{rc} \cdot a_3] = \frac{2}{3} \cdot l_r \cdot \left[\frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1 + e^{-j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1) \cdot \frac{1}{2} \cdot e^{j0} + \right. \\
&+ \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot e^{j120}) \cdot \frac{1}{2} \cdot e^{j120} + \left. \frac{I_{mr}}{2} \cdot (e^{j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot e^{j240}) \cdot \frac{1}{2} \cdot e^{j240} \right] = \\
&= \frac{1}{3} \cdot l_r \cdot I_{mr} \cdot \left[\begin{array}{l} e^{j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1 \cdot e^{j0} \\ + e^{j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1 \cdot e^{j(-120+120)} \\ + e^{j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1 \cdot e^{j(-240+240)} \end{array} \right. + \left. \begin{array}{l} e^{-j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1 \cdot e^{j0} \\ + e^{-j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1 \cdot e^{j(120+120)} \\ + e^{-j(\alpha - \varphi_{ir})} \cdot 1 \cdot e^{j(240+240)} \end{array} \right] = l_r \cdot \left(\frac{I_{mr}}{2} \cdot 1 \cdot e^{-j\varphi_{ir}} \right) \cdot e^{j\alpha} = l_r \cdot I_r
\end{aligned}$$

$$\psi_{lmr} = \frac{2}{3} \cdot l_{mr} \cdot [(i_{rb} + i_{rc}) \cdot a_1 + (i_{ra} + i_{rc}) \cdot a_2 + (i_{ra} + i_{rb}) \cdot a_3] = -\frac{2}{3} \cdot l_{mr} \cdot [i_{ra} \cdot a_1 + i_{rb} \cdot a_2 + i_{rc} \cdot a_3] = -l_{mr} \cdot I_r$$

$= -i_{ra} \qquad \qquad = -i_{rb} \qquad \qquad = -i_{rc}$

где $i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} = 0$ - соединение статорной обмотки 

$$\Psi_{lmsr} = \frac{2}{3} \cdot [A_r + B_r + C_r]$$

$$A_r = a_1 \cdot l_{msr} \cdot [i_{sa} \cdot \cos\theta + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sc} \cdot \cos(\theta - 240)] =$$

$$= (1 \cdot e^{j0}) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot 1) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} + e^{-j\theta}) + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j120}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120}) + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j240}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240}) \right]$$

$$= \frac{I_{ms}}{4} \cdot (1 \cdot e^{j0}) \cdot l_{msr} \times$$

$$\times \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & 1 & + & e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & 1 & + & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & 1 & + & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & 1 & + & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & 1 \\ \hline + & e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & \cdot & e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \\ \hline + & e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & \cdot & e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} & \cdot & e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \\ \hline & = 0 & & = 3 & & = 3 & & = 0 & & & & & & = 0 \end{array} \right]$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot (I_{ms} \cdot \frac{1}{2} \cdot e^{-j\varphi_s}) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot (1 \cdot e^{j0})$$

$$\begin{aligned}
A_r &= a_1 \cdot l_{msr} \cdot \left[i_{sa} \cdot \cos\theta + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sc} \cdot \cos(\theta - 240) \right] = \\
&= (1 \cdot e^{j0}) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} + e^{-j\theta}) + \right. \\
&\quad + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j120}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120}) + \\
&\quad \left. + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j240}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240}) \right] = \\
&\quad \left[\begin{array}{c} i_{sa} \qquad \qquad \qquad \cos\theta \\ i_{sb} \qquad \qquad \qquad \cos(\theta - 120) \\ i_{sc} \qquad \qquad \qquad \cos(\theta - 240) \end{array} \right] =
\end{aligned}$$

$$= \frac{I_{ms}}{4} \cdot \left(\boxed{1} \cdot e^{j0} \right) \cdot l_{msr} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\begin{array}{c} \begin{array}{c} \circ \\ + \end{array} \begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{c} e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ \cdot \end{array} \begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ e^{-j(120+120)} \\ \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \\ e^{-j(240+240)} \\ \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \end{array} \begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{c} + \\ + \\ + \\ + \end{array} \begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{c} e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ \cdot \end{array} \begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ e^{j(-120+120)} \\ \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \\ e^{j(-240+240)} \\ \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \boxed{\varnothing} \end{array} \begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{c} + \\ + \\ + \\ + \end{array} \end{array} \right] \\ & \qquad \qquad \qquad = 0 \qquad \qquad \qquad = 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_r &= a_1 \cdot l_{msr} \cdot \left[i_{sa} \cdot \cos\theta + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sc} \cdot \cos(\theta - 240) \right] = \\
&= (1 \cdot e^{j0}) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} + e^{-j\theta}) + \right. \\
&\quad + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j120}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120}) + \\
&\quad \left. + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j240}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240}) \right] = \\
&\quad \left[\begin{array}{c} i_{sa} \cos\theta \\ i_{sb} \cos(\theta - 120) \\ i_{sc} \cos(\theta - 240) \end{array} \right] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} 1 \\ e^{j(120-120)} \\ e^{j(240-240)} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} 1 \\ e^{j(120+120)} \\ e^{j(240+240)} \end{array} \right] + \begin{array}{c} \bigcirc \\ \bigcirc \\ \end{array} \\
& \qquad \qquad \qquad = 3 \qquad \qquad \qquad = 0
\end{aligned}$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(I_{ms} \cdot \begin{array}{c} \boxed{\times} \\ 1 \cdot e^{-j\varphi_{is}} \\ \boxed{\times} \end{array} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot \left(\begin{array}{c} \boxed{\times} \\ 1 \cdot e^{j0} \end{array} \right)$$

I_s

$$\begin{aligned}
B_r &= a_2 \cdot l_{msr} \cdot [i_{sa} \cdot \cos(\theta - 240) + i_{sb} \cdot \cos \theta + i_{sc} \cdot \cos(\theta - 120)] = \\
&= (1 \cdot e^{j120}) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot 1) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240}) + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j120}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} + e^{-j\theta}) + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j240}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120}) \right] = \\
&= \frac{I_{ms}}{4} \cdot (1 \cdot e^{j120}) \cdot l_{msr} \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\times \left[\begin{array}{c} e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \cdot e^{-j240} \\ e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \cdot e^{-j120} \\ e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \cdot e^{-j(240+120)} \end{array} + \begin{array}{c} e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \cdot e^{j240} \\ e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \cdot e^{-j120} \\ e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \cdot e^{-j(240-120)} \end{array} + \begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \cdot e^{-j240} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \cdot e^{j120} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \cdot e^{j(240-120)} \end{array} + \begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \cdot e^{j240} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \cdot e^{j120} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} \cdot e^{j(240+120)} \end{array} \right] = \\
&= 0 + 3 \cdot e^{-j120} + 3 \cdot e^{j120} + 0
\end{aligned}$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(I_{ms} \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j120} \cdot e^{-j120}) \cdot e^{-j\varphi_s} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot (1 \cdot e^{j120} \cdot e^{j120}) =$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(\frac{I_s}{2} \cdot 1 \cdot e^{-j\varphi_s} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot 1 \cdot e^{j240}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{I_{ms}}{4} \cdot (1 \cdot e^{j120}) \cdot l_{msr} \times \\
\bigcirc & \times \left[\begin{array}{c} e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \end{array} \cdot \begin{array}{c} e^{-j240} \\ e^{-j120} \\ e^{-j(240+120)} \\ = 0 \end{array} + \begin{array}{c} e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \end{array} \cdot \begin{array}{c} e^{j240} \\ e^{-j120} \\ e^{-j(240-120)} \\ = 3 \cdot e^{-j120} \end{array} + \end{array}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\overline{B}_r &= \overline{a}_2 \cdot l_{msr} \cdot \left[i_{sa} \cdot \cos(\theta - 240) + i_{sb} \cdot \cos\theta + i_{sc} \cdot \cos(\theta - 120) \right] = \\
&= \left(1 \cdot e^{j120} \right) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240} \right) + \right. \\
&\quad \left. i_{sa} \cos(\theta - 240) \right. \\
&+ \frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j120} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} + e^{-j\theta} \right) + \\
&\quad \left. i_{sb} \cos\theta \right. \\
&+ \left. \frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j240} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120} \right) \right] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \end{array} \cdot \left[\begin{array}{c} e^{-j240} \\ e^{j120} \\ e^{j(240-120)} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \end{array} \cdot \left[\begin{array}{c} e^{j240} \\ e^{j120} \\ e^{j(240+120)} \end{array} \right] + \begin{array}{c} \bigcirc \\ \bigcirc \\ \bigcirc \end{array} \right] = \\
& = 3 \cdot e^{j120} \qquad \qquad \qquad = 0
\end{aligned}$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(I_{ms} \cdot \left[\begin{array}{c} 1 \\ e^{j120} \\ e^{-j120} \end{array} \right] \cdot e^{-j\varphi_{is}} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot \left(1 \cdot e^{j120} \cdot e^{j120} \right) =$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(I_s \cdot 1 \cdot e^{-j\varphi_{is}} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot 1 \cdot e^{j240}$$

$$C_r = a_3 \cdot l_{msr} \cdot [i_{sa} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 240) + i_{sc} \cdot \cos\theta] =$$

$$= (1 \cdot e^{j240}) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot 1) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120}) + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j120}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240}) + \frac{I_{ms}}{2} \cdot (e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j240}) \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \right] =$$

$$= \frac{I_{ms}}{4} \cdot (1 \cdot e^{j240}) \cdot l_{msr} \times$$

$$\times \left[\begin{array}{l} | e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{-j120} | + | e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{j120} | + | e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{-j120} | + | e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{j120} | \\ + | e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{-j(120+240)} | + | e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{j(-120+240)} | + | e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{j(120-240)} | + | e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{j(120+240)} | \\ + | e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{-j240} | + | e^{j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{-j240} | + | e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{j240} | + | e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{j240} | \end{array} \right] =$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(I_{ms} \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{j240} \cdot e^{-j240}) \cdot e^{-j\varphi_s} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot (1 \cdot e^{j240} \cdot e^{-j120}) =$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(\frac{I_s}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot e^{-j\varphi_s} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_s)} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot 1 \cdot e^{j120}$$

$$\begin{aligned}
\overline{C}_r &= \overline{a}_3 \cdot l_{msr} \cdot \left[i_{sa} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 240) + i_{sc} \cdot \cos\theta \right] = \\
&= \left(1 \cdot e^{j240} \right) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120} \right) + \right. \\
&\quad \left. i_{sa} \cos(\theta - 120) \right. \\
&+ \frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j120} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240} \right) + \\
&\quad \left. i_{sb} \cos(\theta - 240) \right. \\
&+ \left. \frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j240} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} + e^{-j\theta} \right) \right] =
\end{aligned}$$

$$= \frac{I_{ms}}{4} \cdot (1 \cdot e^{j240}) \cdot l_{msr} \times$$

$$\times \left[\begin{array}{l} | e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{-j120} | + | e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{j120} | + \\ \text{O} + | e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{-j(120+240)} | + | e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{j(-120+240)} | + \\ \text{O} + | e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} | \cdot | e^{-j240} | + | e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} | \cdot | e^{-j240} | + \end{array} \right]$$

$= 0$
 $= 3 \cdot e^{-j240}$

$$\begin{aligned}
\overline{C}_r &= \overline{a}_3 \cdot l_{msr} \cdot \left[i_{sa} \cdot \cos(\theta - 120) + i_{sb} \cdot \cos(\theta - 240) + i_{sc} \cdot \cos\theta \right] = \\
&= \left(1 \cdot e^{j240} \right) \cdot l_{msr} \cdot \left[\frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot 1 \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} \cdot e^{-j120} + e^{-j\theta} \cdot e^{j120} \right) + \right. \\
&\quad \left. i_{sa} \cos(\theta - 120) \right. \\
&+ \frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j120} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j120} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} \cdot e^{-j240} + e^{-j\theta} \cdot e^{j240} \right) + \\
&\quad \left. i_{sb} \cos(\theta - 240) \right. \\
&+ \left. \frac{I_{ms}}{2} \cdot \left(e^{j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j240} + e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j240} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(e^{j\theta} + e^{-j\theta} \right) \right] = \\
&\quad \left. i_{sc} \cos\theta \right] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} e^{-j120} \\ e^{j(120-240)} \\ e^{j240} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \\ e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{-j\theta} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} e^{j120} \\ e^{j(120+240)} \\ e^{j240} \end{array} \right] + \begin{array}{c} \bigcirc \\ \bigcirc \\ \bigcirc \end{array} \\
& = 3 \cdot e^{-j120} \qquad \qquad \qquad = 0
\end{aligned}$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(I_{ms} \cdot \left(1 \cdot e^{j240} \cdot e^{-j240} \right) \cdot e^{-j\varphi_{is}} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot \left(1 \cdot e^{j240} \cdot e^{-j120} \right) =$$

$$= \frac{3}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot \left(I_{ms} \cdot 1 \cdot e^{-j\varphi_{is}} \right) \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \right] \cdot 1 \cdot e^{j120}$$

I_s

$$\begin{aligned} \psi_{lmsr} &= \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{9}{4} \cdot (l_{msr} \cdot e^{-j\theta}) \cdot I_s + \left(\frac{3}{4} \cdot l_{msr} \cdot I_{ms} \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_{is})} \cdot e^{j\theta} \right) \cdot \left(\underset{=0}{\cancel{1} \cdot \cancel{e}^{j0} + \cancel{1} \cdot \cancel{e}^{j240} + \cancel{1} \cdot \cancel{e}^{j120}} \right) \right] = \\ &= \left(\frac{3}{2} \cdot l_{msr} \cdot e^{-j\theta} \right) \cdot I_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_r &= \frac{2}{3} \cdot (\psi_{ra} \cdot a_1 + \psi_{rb} \cdot a_2 + \psi_{rc} \cdot a_3) = \psi_{lr} + \psi_{lmr} + \psi_{lmsr} = l_r \cdot I_r + (-l_{mr} \cdot I_r) + \left(\frac{3}{2} \cdot l_{msr} \cdot e^{-j\theta} \right) \cdot I_s = \\ &= \left(\underset{L_r}{\cancel{l_r} - \cancel{l_{mr}}} \right) \cdot I_r + \left(\left(\frac{3}{2} \cdot l_{msr} \right) \cdot e^{-j\theta} \right) \cdot I_s = L_r \cdot I_r + (L_m \cdot e^{-j\theta}) \cdot I_s \end{aligned}$$

$$\boxed{\psi_r = L_r \cdot I_r + (L_m \cdot e^{-j\theta}) \cdot I_s}$$