СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ещин Е.К.* Моделирование электромеханических процессов многодвигательных электроприводов горных машин. – Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т, 1999. – 115 с.

2. *И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др.,* Основы теории электрических аппаратов. Учеб. Для вузов. М.: Высш шк. 1987. – 352 с.

3. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: Учеб. пособие для вузов/ Под ред. *О.Д. Гольдберга* -М.: Высш. шк., 2001. 512с.: ил.

4. Программирование и применение ЭВМ в расчётах электрических аппаратов: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электрические аппараты» / *Никитенко А.Г., Гринченко В.П., Иванченко А.Н.* - М.: Высш шк. 1990. – 231с.: ил.

Автор статьи:

Губенков
Александр Вячеславович
- аспирант каф. вычислительной
техники и информационных
технологий

УДК 622:621.313-83

А.Б. Смыков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ МАШИН

В ряде работ показана возможность анализа систем электроснабжения (СЭС) с электродвигательной нагрузкой на основе системы уравнений, описывающих СЭС как один объект [1-3].

Так в работе [2] приводится математическая модель СЭС питающейся от источника неограниченной мощности в матричной форме записи, полученная на основе уравнений Парка-Горева:

$$\left(\mathbf{E}+\mathbf{S}^{*}\mathbf{L}_{\mathrm{K}}\mathbf{S}\mathbf{L}_{\mathrm{SS}}^{-1}\right)\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{S}}=\mathbf{U}_{\mathrm{C}}-\mathbf{S}^{*}\left(\mathbf{L}_{\mathrm{K}}\mathbf{S}\mathbf{L}_{\mathrm{SR}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}}+\mathbf{R}_{\mathrm{K}}\mathbf{S}\mathbf{I}_{\mathrm{S}}\right)-\mathbf{R}_{\mathrm{S}}\mathbf{I}_{\mathrm{S}},$$
$$\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}}=-\mathbf{R}_{\mathrm{R}}\mathbf{I}_{\mathrm{R}}+\mathbf{K}_{\mathrm{R}}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}},\quad \mathbf{M}_{\text{ЭЛ}}=\mathbf{I}_{\mathrm{S}}^{**}\mathbf{K}_{\mathrm{M}}\mathbf{I}_{\mathrm{R}},\tag{1}$$

где **E** – единичная матрица, размером $3\cdot n$ элементов (n – количество электродвигателей в СЭС); **S** – матрица структуры; $\mathbf{L}_{\text{к}}=\begin{Vmatrix}\mathbf{L}_{\text{к}1} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \mathbf{L}_{\text{к}m}\end{Vmatrix}$, $\mathbf{L}_{\text{к}j}=\begin{Vmatrix}L_{\text{к}\alpha j} & 0 & 0\\ 0 & L_{\text{к}\beta j} & 0\\ 0 & 0 & L_{\text{к}\lambda j}\end{Vmatrix}$, $L_{\text{к}\alpha j}$, $L_{\text{к}\beta j}$, $L_{\text{к}\gamma j}$ – индуктивности фаз j-го участка сети; $\mathbf{R}_{\text{к}}=\begin{Vmatrix}\mathbf{R}_{\text{к}1} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \mathbf{R}_{\text{к}m}\end{Vmatrix}$, $\mathbf{R}_{\text{к}j}=\begin{Vmatrix}r_{\text{к}\alpha j} & 0 & 0\\ 0 & r_{\text{к}\beta j} & 0\\ 0 & 0 & r_{\text{к}\lambda j}\end{Vmatrix}$, $r_{\text{к}\alpha j}$, $r_{\text{к}\beta j}$, $r_{\text{к}\gamma j}$ – активные сопротивления фаз j-го участка сети, m – количество участков в СЭС; $\mathbf{L}_{\mathrm{SS}}^{-1}=\begin{Vmatrix}\mathbf{L}_{\mathrm{ss}1}^{-1} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \mathbf{L}_{\mathrm{ss}n}^{-1}\end{Vmatrix}$, $\mathbf{L}_{\mathrm{SR}}^{-1}=\begin{Vmatrix}\mathbf{L}_{\mathrm{sr}1}^{-1} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \mathbf{L}_{\mathrm{sr}n}^{-1}\end{Vmatrix}$,

$$\begin{Vmatrix}\mathbf{L}_{\mathrm{ss}i}^{-1} & \mathbf{L}_{\mathrm{sr}i}^{-1}\\ \mathbf{L}_{\mathrm{rs}i}^{-1} & \mathbf{L}_{\mathrm{rr}i}^{-1}\end{Vmatrix}=\mathbf{L}_{i}^{-1}=\begin{Vmatrix}L_{1,1,i} & L_{1,2,i} & L_{1,3,i} & \vdots & L_{1,4,i} & L_{1,5,i} & L_{1,6,i}\\ L_{2,1,i} & L_{2,2,i} & L_{2,3,i} & \vdots & L_{2,4,i} & L_{2,5,i} & L_{2,6,i}\\ L_{3,1,i} & L_{3,2,i} & L_{3,3,i} & \vdots & L_{3,4,i} & L_{3,5,i} & L_{3,6,i}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ L_{4,1,i} & L_{4,2,i} & L_{4,3,i} & \vdots & L_{4,4,i} & L_{4,5,i} & L_{4,6,i}\\ L_{5,1,i} & L_{5,2,i} & L_{5,3,i} & \vdots & L_{5,4,i} & L_{5,5,i} & L_{5,6,i}\\ L_{6,1,i} & L_{6,2,i} & L_{6,3,i} & \vdots & L_{6,4,i} & L_{6,5,i} & L_{6,6,i}\end{Vmatrix},$$ $\mathbf{L}_{i}^{-1}$ - матрица, обратная

$$\mathbf{L}_i = \begin{Vmatrix} L_{si}+L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & L_{si}+L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{si}+L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} \\ L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{ri}+L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{ri}+L_{Mi} & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{ri}+L_{Mi} \end{Vmatrix},$$ $L_{M\,i}$ – взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора i-го асинхронных двигателей (АД), $L_{s\,i}$, $L_{r\,i}$, – индуктивности обмоток статора и ротора i-го АД; $\mathbf{\Psi}_S = \begin{Vmatrix} \mathbf{\Psi}_{s1} & \cdots & \mathbf{\Psi}_{sn} \end{Vmatrix}^t$, $\mathbf{\Psi}_R = \begin{Vmatrix} \mathbf{\Psi}_{r1} & \cdots & \mathbf{\Psi}_{rn} \end{Vmatrix}^t$ - потокосцепления статорных и роторных обмоток АД системы, $\mathbf{\Psi}_{si} = \begin{Vmatrix} \psi_{s\alpha i} & \psi_{s\beta i} & \psi_{s\gamma i} \end{Vmatrix}^t$, $\mathbf{\Psi}_{ri} = \begin{Vmatrix} \psi_{r\alpha i} & \psi_{r\beta i} & \psi_{r\gamma i} \end{Vmatrix}^t$, $\psi_{s\alpha\,i}$, $\psi_{s\beta\,i}$, $\psi_{s\gamma\,i}$, $\psi_{r\alpha\,i}$, $\psi_{r\beta\,i}$, $\psi_{r\gamma\,i}$ - потокосцепления обмоток потокосцепления статора и ротора обмоток i-го АД;

$\mathbf{U}_C = \begin{Vmatrix} u_{\alpha 1} & u_{\beta 1} & u_{\lambda 1} & \cdots & u_{\alpha n} & u_{\beta n} & u_{\lambda n} \end{Vmatrix}^t$; $u_{\alpha 1} = \cdots = u_{\alpha n}$, $u_{\beta 1} = \cdots = u_{\beta n}$, $u_{\lambda 1} = \cdots = u_{\lambda n}$- напряжения, подаваемые от источника неограниченной мощности; $\mathbf{I}_S = \begin{Vmatrix} \mathbf{I}_{s1} & \cdots & \mathbf{I}_{sn} \end{Vmatrix}^t$, $\mathbf{I}_R = \begin{Vmatrix} \mathbf{I}_{r1} & \cdots & \mathbf{I}_{rn} \end{Vmatrix}^t$ - токи в статорных и роторных обмотках АД, $\mathbf{I}_{si} = \begin{Vmatrix} i_{s\alpha i} & i_{s\beta i} & i_{s\gamma i} \end{Vmatrix}^t$, $\mathbf{I}_{ri} = \begin{Vmatrix} i_{r\alpha i} & i_{r\beta i} & i_{r\gamma i} \end{Vmatrix}^t$, $i_{s\alpha\,i}$, $i_{s\beta\,i}$, $i_{s\gamma\,i}$, $i_{r\alpha\,i}$, $i_{r\beta\,i}$, $i_{r\gamma\,i}$ – токи в обмотках статора и ротора i-го АД; $\mathbf{R}_S = \begin{Vmatrix} \mathbf{R}_{s1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{R}_{sn} \end{Vmatrix}$; $\mathbf{R}_R = \begin{Vmatrix} \mathbf{R}_{r1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{R}_{rn} \end{Vmatrix}$ - сопротивления статорных и роторных обмоток АД системы, $\mathbf{R}_{si} = \begin{Vmatrix} r_{si} & 0 & 0 \\ 0 & r_{si} & 0 \\ 0 & 0 & r_{si} \end{Vmatrix}$, $\mathbf{R}_{ri} = \begin{Vmatrix} r_{ri} & 0 & 0 \\ 0 & r_{ri} & 0 \\ 0 & 0 & r_{ri} \end{Vmatrix}$, $r_{s\,i}$, $r_{r\,i}$ – активные сопротивления обмоток i-го АД; $\mathbf{K}_R = \begin{Vmatrix} \mathbf{K}_{r1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{K}_{rn} \end{Vmatrix}$, $\mathbf{K}_{ri} = \dfrac{p_{пi}\omega_i}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{Vmatrix}$, $\mathbf{K}_M = \begin{Vmatrix} \mathbf{K}_{m1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{K}_{mn} \end{Vmatrix}$,

$\mathbf{K}_{mi} = -p_{пi}\dfrac{\sqrt{3}}{2} L_{Mi} \begin{Vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{Vmatrix}$, $p_{п\,i}$ – количество пар полюсов, ω_i – угловая скорость;

$\mathbf{M}_{ЭЛ} = \begin{Vmatrix} M_{эл1} & \cdots & M_{элn} \end{Vmatrix}$ - электромагнитные моменты; $\mathbf{I}_S^{**} = \begin{Vmatrix} \mathbf{I}_{s1}^* & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{I}_{sn}^* \end{Vmatrix}$.

Ток для всех электродвигателей системы определяется решением уравнения $\mathbf{I} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{\Psi}$, где $\mathbf{I} = \begin{Vmatrix} \mathbf{I}_S \\ \mathbf{I}_R \end{Vmatrix}$, $\mathbf{L}^{-1} = \begin{Vmatrix} \mathbf{L}_1^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{L}_n^{-1} \end{Vmatrix}$, $\mathbf{\Psi} = \begin{Vmatrix} \mathbf{\Psi}_S \\ \mathbf{\Psi}_R \end{Vmatrix}$.

СЭС горных машин имеет характерную особенность – это питание системы от трансформаторной подстанции, т.е. от источника с ограниченной мощностью.

Трансформатор является частным случаем обобщенной электрической машины и описывается уравнениями электрического равновесия для обобщенной электрической машины [4] при условии неподвижности обмоток ротора последней. В матричной форме уравнения выглядят следующим образом:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{t1} = \mathbf{U}_{t1} - \mathbf{R}_{t1}\mathbf{I}_{t1}, \frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{t2} = \mathbf{U}_{t2} - \mathbf{R}_{t2}\mathbf{I}_{t2}, \tag{2}$$

где $\mathbf{\Psi}_{t1} = \begin{Vmatrix} \psi_{t1\alpha} & \psi_{t1\beta} & \psi_{t1\gamma} \end{Vmatrix}^{t}$; $\mathbf{\Psi}_{t2} = \begin{Vmatrix} \psi_{t2\alpha} & \psi_{t2\beta} & \psi_{t2\gamma} \end{Vmatrix}^{t}$, $\psi_{t1\alpha}$, $\psi_{t1\beta}$, $\psi_{t1\gamma}$, $\psi_{t2\alpha}$, $\psi_{t2\beta}$, $\psi_{t2\gamma}$ – потокосцепления первичной и вторичной обмоток трансформатора; $\mathbf{U}_{t1} = \begin{Vmatrix} u_{t1\alpha} & u_{t1\beta} & u_{t1\gamma} \end{Vmatrix}^{t}$, $\mathbf{U}_{t2} = \begin{Vmatrix} u_{t2\alpha} & u_{t2\beta} & u_{t2\gamma} \end{Vmatrix}^{t}$, $u_{t1\alpha}$, $u_{t1\beta}$, $u_{t1\gamma}$, $u_{t2\alpha}$, $u_{t2\beta}$, $u_{t2\gamma}$ – напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора; $\mathbf{R}_{t1} = \begin{Vmatrix} r_{t1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{t1} & 0 \\ 0 & 0 & r_{t1} \end{Vmatrix}$, $\mathbf{R}_{t2} = \begin{Vmatrix} r_{t2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{t2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{t2} \end{Vmatrix}$, r_{t1}, r_{t2} – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; $\mathbf{I}_{t1} = \begin{Vmatrix} i_{t1\alpha} & i_{t1\beta} & i_{t1\gamma} \end{Vmatrix}^{t}$, $\mathbf{I}_{t2} = \begin{Vmatrix} i_{t2\alpha} & i_{t2\beta} & i_{t2\gamma} \end{Vmatrix}^{t}$, $i_{t1\alpha}$, $i_{t1\beta}$, $i_{t1\gamma}$, $i_{t2\alpha}$, $i_{t2\beta}$, $i_{t2\gamma}$ – токи, протекающие через первичную и вторичную обмотки трансформатора.

Согласно первому и второму закону Кирхгофа условия сопряжения модели трансформатора (2) с уравнениями модели СЭС (1):

$$\mathbf{U}_{C} + \mathbf{U}_{T2} = 0, \; \mathbf{I}_{T2} = \mathbf{A}\mathbf{I}_{S},$$

где $\mathbf{U}_{T2} = \begin{Vmatrix} \mathbf{U}_{t2} & \cdots & \mathbf{U}_{t2} \end{Vmatrix}^{t}$; $\mathbf{I}_{T2} = \begin{Vmatrix} \mathbf{I}_{t2} & \cdots & \mathbf{I}_{t2} \end{Vmatrix}^{t}$; $\mathbf{A} = \begin{Vmatrix} \mathbf{E} & \cdots & \mathbf{E} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{E} & \cdots & \mathbf{E} \end{Vmatrix}$ - матрица сопряжения.

Учитывая условия сопряжения модели трансформатора (2) с уравнениями модели СЭС (1), подставим уравнение вторичной обмотки трансформатора в уравнение статорной цепи АД системы:

$$\left(\mathbf{E} + \mathbf{S}^{*}\mathbf{L}_{K}\mathbf{S}\mathbf{L}_{SS}^{-1}\right)\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{S} + \frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{T2} = -\mathbf{S}^{*}\left(\mathbf{L}_{K}\mathbf{S}\mathbf{L}_{SR}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{R} + \mathbf{R}_{K}\mathbf{S}\mathbf{I}_{S}\right) - \mathbf{R}_{S}\mathbf{I}_{S} - \mathbf{R}_{T2}\mathbf{A}\mathbf{I}_{S},$$

где $\mathbf{\Psi}_{T2} = \begin{Vmatrix} \mathbf{\Psi}_{t2} & \cdots & \mathbf{\Psi}_{t2} \end{Vmatrix}^{t}$; $\mathbf{R}_{T2} = \begin{Vmatrix} \mathbf{R}_{t2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{R}_{t2} \end{Vmatrix}$.

Ток в обмотках трансформатора, как и для любой электрической машины, определяется решением уравнения:

$$\mathbf{I}_{t} = \mathbf{L}_{t}^{-1}\mathbf{\Psi}_{t}, \tag{3}$$

где $\mathbf{\Psi}_{t} = \begin{Vmatrix} \mathbf{\Psi}_{t1} \\ \mathbf{\Psi}_{t2} \end{Vmatrix}$; $\mathbf{I}_{t} = \begin{Vmatrix} \mathbf{I}_{t1} \\ \mathbf{I}_{t2} \end{Vmatrix}$;

$$\mathbf{L}_{t}^{-1} = \begin{Vmatrix} L_{t1,1}^{-1} & L_{t1,2}^{-1} & L_{t1,3}^{-1} & \vdots & L_{t1,4}^{-1} & L_{t1,5}^{-1} & L_{t1,6}^{-1} \\ L_{t2,1}^{-1} & L_{t2,2}^{-1} & L_{t2,3}^{-1} & \vdots & L_{t2,4}^{-1} & L_{t2,5}^{-1} & L_{t2,6}^{-1} \\ L_{t3,1}^{-1} & L_{t3,2}^{-1} & L_{t3,3}^{-1} & \vdots & L_{t3,4}^{-1} & L_{t3,5}^{-1} & L_{t3,6}^{-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{t4,1}^{-1} & L_{t4,2}^{-1} & L_{t4,3}^{-1} & \vdots & L_{t4,4}^{-1} & L_{t4,5}^{-1} & L_{t4,6}^{-1} \\ L_{t5,1}^{-1} & L_{t5,2}^{-1} & L_{t5,3}^{-1} & \vdots & L_{t5,4}^{-1} & L_{t5,5}^{-1} & L_{t5,6}^{-1} \\ L_{t6,1}^{-1} & L_{t6,2}^{-1} & L_{t6,3}^{-1} & \vdots & L_{t6,4}^{-1} & L_{t6,5}^{-1} & L_{t6,6}^{-1} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \mathbf{L}_{t1}^{-1} \\ \mathbf{L}_{t2}^{-1} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \mathbf{L}_{t11}^{-1} & \mathbf{L}_{t12}^{-1} \\ \mathbf{L}_{t21}^{-1} & \mathbf{L}_{t22}^{-1} \end{Vmatrix}$$

- матрица, обратная матрице индуктивностей обмоток трансформатора,

$$\mathbf{L}_{t} = \begin{Vmatrix} L_{t1} + L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 \\ -L_{tM}/2 & L_{t1} + L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 \\ -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{t1} + L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{tM} \\ L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{t2} + L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 \\ -L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{t2} + L_{tM} & -L_{tM}/2 \\ -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 & -L_{tM}/2 & L_{t2} + L_{tM} \end{Vmatrix},$$

L_{t1}, L_{t2} – индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора, L_{tM} – взаимоиндуктивность трансформатора.

Продифференцируем (3):

$$\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{\mathrm{t}} = \mathbf{L}_{\mathrm{t}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t}},$$

производную тока, протекающего через вторичную обмотку трансформатора, можно определить из уравнения:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{\mathrm{t2}} = \mathbf{L}_{\mathrm{t2}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t}}, \text{или } \frac{d}{dt}\mathbf{I}_{\mathrm{t2}} = \mathbf{L}_{\mathrm{t21}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t1}} + \mathbf{L}_{\mathrm{t22}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t2}}. \quad (4)$$

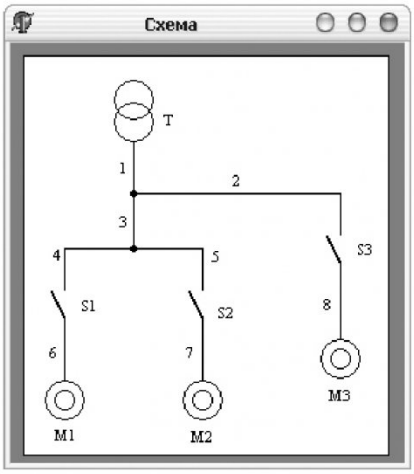

Рис. 1. Принципиальная схема СЭС

Так как ток, протекающий во вторичной обмотке трансформатора, равен сумме токов двигателей, без учета токов утечки и емкостных токов, то производная тока вторичной обмотки трансформатора:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{\mathrm{t2}} = \mathbf{B}\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{\mathrm{S}},\ \mathbf{B}\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{\mathrm{S}} = \mathbf{B}\mathbf{L}_{\mathrm{SS}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{S}} + \mathbf{B}\mathbf{L}_{\mathrm{SR}}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}},$$

где $\mathbf{B} = \left\| \mathbf{E}_1 \quad \mathbf{E}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{E}_n \right\|$ - матрица сопряжения.

Подставим (5) в (4):

$$\mathbf{B}\mathbf{L}_{\mathrm{SS}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{S}} - \mathbf{L}_{\mathrm{t22}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t2}} = \mathbf{L}_{\mathrm{t21}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t1}} - \mathbf{B}\mathbf{L}_{\mathrm{SR}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}}.$$

В итоге, получаем систему уравнений, описывающих СЭС произвольной конфигурации, питающуюся от источника ограниченной мощности с электродвигательной нагрузкой:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}} = -\mathbf{R}_{\mathrm{R}}\mathbf{I}_{\mathrm{R}} + \mathbf{K}_{\mathrm{R}}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}},\\
&\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t1}} = \mathbf{U}_{\mathrm{t1}} - \mathbf{R}_{\mathrm{t1}}\mathbf{I}_{\mathrm{t1}},\\
&\left(\mathbf{E} + \mathbf{S}^{*}\mathbf{L}_{\mathrm{K}}\mathbf{S}\mathbf{L}_{\mathrm{SS}}^{-1}\right)\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{S}} + \frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{T2}} = -\mathbf{S}^{*}\left(\mathbf{L}_{\mathrm{K}}\mathbf{S}\mathbf{L}_{\mathrm{SR}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}} + \mathbf{R}_{\mathrm{K}}\mathbf{S}\mathbf{I}_{\mathrm{S}}\right) - \mathbf{R}_{\mathrm{S}}\mathbf{I}_{\mathrm{S}} - \mathbf{R}_{\mathrm{T2}}\mathbf{A}\mathbf{I}_{\mathrm{S}},\\
&\mathbf{B}\mathbf{L}_{\mathrm{SS}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{S}} - \mathbf{L}_{\mathrm{t22}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t2}} = \mathbf{L}_{\mathrm{t21}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{t1}} - \mathbf{B}\mathbf{L}_{\mathrm{SR}}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{\Psi}_{\mathrm{R}},\\
&\mathbf{M}_{\text{эл}} = \mathbf{I}_{\mathrm{S}}^{'}\mathbf{K}_{\mathrm{M}}\mathbf{I}_{\mathrm{R}}.
\end{aligned}\right\}$$

Таблица 1

№	1	2	3	4	5
I_p, А	321	162	159	81	81
S, *мм*^{2}	120	35	35	16	16
l, км	0,1	0,1	0,5	0,2	0,1
$R_{уд}$, Ом/км	0,153	0,539	0,52	1,2	1,2
$X_{уд}$, Ом/км	0,06	0,084	0,064	0,09	0,09

На рис. 2-5 – приведены результаты, полученные с использованием вышеописанной модели. Моделировались переходные процессы в СЭС, показанной на рис. 1, где источником питания является трансформаторная подстанция ТСВП-1000/6/1,2 (Т), потребителями – асинхронные электродвигатели АВР280L4 (М1) АВР280L4 (М2) ДКВ355LВ4 (М3). Параметры кабельных линий СЭС приведены в табл. 1.

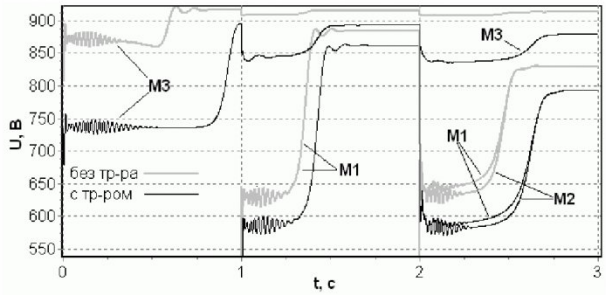

Рис. 2. Изменение амплитуды напряжения на обмотках статоров АД

В первом эксперименте моделировался последовательный пуск АД в системе, питающейся от источника бесконечной мощности (структура системы аналогична структуре на рис. 1 без трансформатора), результаты показаны на рис. 2-5 серым цветом, во втором – с учетом трансформаторной подстанции, результаты показаны черным цветом.

Анализируя полученные характеристики, можно отметить следующее. При пуске АД в сети наблюдается просадка напряжения (рис. 2). Из-за падения напряжений на участках сети, формируемых токами запускаемых двигателей, пуск очередного двигателя оказывает влияние на электромеханические характеристики уже работающих в этой системе электродвигателей. Это видно на рис.

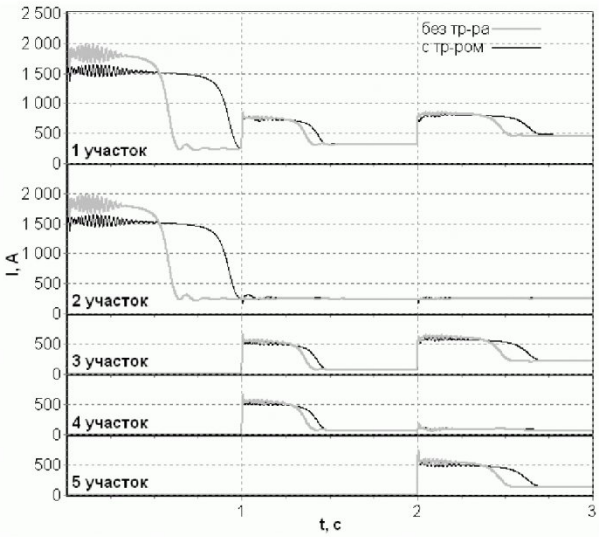

Рис. 3. Изменения амплитудных значений токов, протекающих в кабельных участках сети

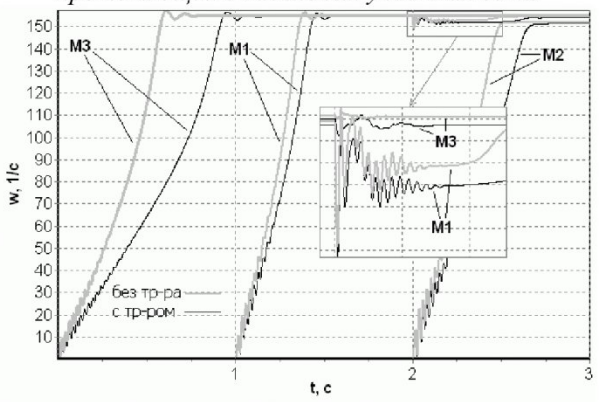

Рис. 4. Изменение угловой скорости вращения роторов АД

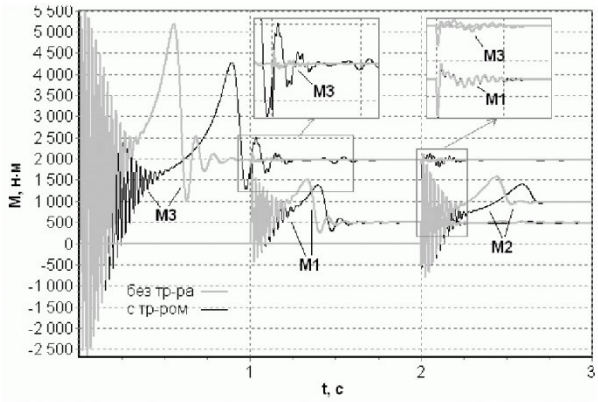

Рис. 5. Изменение электромагнитных моментов АД

2, при пуске двигателя М1 токи этого двигателя формируют падения напряжения на общих участках сети уже с работающим двигателем М3, вследствие чего на обмотках последнего происходит снижение напряжения на 5% от номинального (рис. 2), это оказывает незначительное влияние на электромагнитный момент и скорость двигателя М1 (рис. 4, 5). Похожая ситуация возникает при пуске двигателя М2 с электродвигателями М1, М3 (рис. 2). Вследствие падения напряжения на обмотки двигателя М1 подается низкое напряжение, это объясняется наличием у двигателя М1 большего количества общих протяженных участков сети (1, 3) с двигателем М2, чем у М3 с М2 (1). Последнее значительней сказывается на характеристиках М1 при пуске М2, это хорошо видно на рис. 4, 5, где в момент пука М2 двигатель М1 развивает тормозной момент (-540 Нм), который далее принимает характер затухающих колебаний, что ведет к резкому падению скорости на 4% от номинальной, которое длится до достижения двигателем М2 номинальной скорости.

Другие результаты получаются при учете мощности источника питания. Если учитывать параметры последнего, то из рис. 2. видно, что при пуске очередного электродвигателя в сети происходит значительная просадка напряжения за счет дополнительного падения на сопротивлениях обмоток трансформаторной подстанции, которое, в отличие от предыдущего эксперимента, может достигать до 11% от номинального значения. Также пусковые токи и моменты электродвигателей, в сравнении с предыдущим экспериментом, имеют более низкие значения (рис. 5.), что особенно заметно на двигателях большой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ещин Е.К.* Моделирование электромеханических процессов многодвигательных электроприводов горных машин. – Кемерово: КузГТУ, 1999. – 115 с.

2. *Смыков А.Б.* О форме записи имитационной математической модели сети электроснабжения произвольной структуры с электродвигательной нагрузкой // Вестн. КузГТУ. – 2001. – № 6. – С. 21-24.

3. *Соколов И.А., Смыков А.Б.* Имитационная математическая модель сети электроснабжения произвольной структуры с электродвигательной нагрузкой // Вестн. КузГТУ. – 2001. – № 2. – С. 77-81.

4. *Ковач К., Рац И.* Переходные процесс в машинах переменного тока. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Автор статьи:

Смыков
Анатолий Борисович
- канд. техн. наук, ст преп. каф.
вычислительной техники и
информационных технологий