

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:

$$\left(\mathbf{E} + \mathbf{S}^* \mathbf{L}_K \mathbf{S} \mathbf{L}_{SS}^{-1} \right) \frac{d}{dt} \Psi_S = \mathbf{U}_C - \mathbf{S} \left(\mathbf{L}_K \mathbf{S} \mathbf{L}_{SR}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_R + \mathbf{R}_K \mathbf{S} \mathbf{I}_S \right) - \mathbf{R}_S \mathbf{I}_S, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_R = -\mathbf{R}_R \mathbf{I}_R + \mathbf{K}_R \Psi_R, \quad \mathbf{M}_{\mathcal{E}L} = \mathbf{I}_S^* \mathbf{K}_M \mathbf{I}_R,$$

где \mathbf{E} – единичная матрица, размером $3 \cdot n$ элементов (n – количество электродвигателей в СЭС); \mathbf{S} – мат-

рица структуры; $\mathbf{L}_K = \begin{vmatrix} \mathbf{L}_{k1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{L}_{km} \end{vmatrix}$, $\mathbf{L}_{kj} = \begin{vmatrix} L_{ka,j} & 0 & 0 \\ 0 & L_{kb,j} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kc,j} \end{vmatrix}$, $L_{ka,j}, L_{kb,j}, L_{kc,j}$ – индуктивности фаз j -го

участка сети; $\mathbf{R}_K = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{k1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{R}_{km} \end{vmatrix}$, $\mathbf{R}_{kj} = \begin{vmatrix} r_{ka,j} & 0 & 0 \\ 0 & r_{kb,j} & 0 \\ 0 & 0 & r_{kc,j} \end{vmatrix}$, $r_{ka,j}, r_{kb,j}, r_{kc,j}$ – активные сопротивления фаз j -го

участка сети, m – количество участков в СЭС; $\mathbf{L}_{SS}^{-1} = \begin{vmatrix} \mathbf{L}_{ss1}^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{L}_{ssn}^{-1} \end{vmatrix}$, $\mathbf{L}_{SR}^{-1} = \begin{vmatrix} \mathbf{L}_{sr1}^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{L}_{srn}^{-1} \end{vmatrix}$,

$$\begin{vmatrix} \mathbf{L}_{ssi}^{-1} & \mathbf{L}_{sri}^{-1} \\ \mathbf{L}_{rsi}^{-1} & \mathbf{L}_{tri}^{-1} \end{vmatrix} = \mathbf{L}_i^{-1} = \begin{vmatrix} L_{1,1,i} & L_{1,2,i} & L_{1,3,i} & \vdots & L_{1,4,i} & L_{1,5,i} & L_{1,6,i} \\ L_{2,1,i} & L_{2,2,i} & L_{2,3,i} & \vdots & L_{2,4,i} & L_{2,5,i} & L_{2,6,i} \\ L_{3,1,i} & L_{3,2,i} & L_{3,3,i} & \vdots & L_{3,4,i} & L_{3,5,i} & L_{3,6,i} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{4,1,i} & L_{4,2,i} & L_{4,3,i} & \vdots & L_{4,4,i} & L_{4,5,i} & L_{4,6,i} \\ L_{5,1,i} & L_{5,2,i} & L_{5,3,i} & \vdots & L_{5,4,i} & L_{5,5,i} & L_{5,6,i} \\ L_{6,1,i} & L_{6,2,i} & L_{6,3,i} & \vdots & L_{6,4,i} & L_{6,5,i} & L_{6,6,i} \end{vmatrix}, \quad \mathbf{L}_i^{-1} \text{ - матрица, обратная}$$

$$\mathbf{L}_i = \begin{vmatrix} L_{si} + L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & L_{si} + L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{si} + L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} \\ L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{ri} + L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{ri} + L_{Mi} & -L_{Mi}/2 \\ -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{Mi} & -L_{Mi}/2 & -L_{Mi}/2 & L_{ri} + L_{Mi} \end{vmatrix}, L_{Mi} - \text{взаимоиндуктивность}$$

обмоток статора и ротора i -го асинхронных двигателей (АД), L_{si} , L_{ri} – индуктивности обмоток статора и ротора i -го АД; $\Psi_S = [\Psi_{s1} \dots \Psi_{sn}]^t$, $\Psi_R = [\Psi_{r1} \dots \Psi_{rn}]^t$ - потокосцепления статорных и роторных обмоток АД системы, $\Psi_{si} = [\psi_{sa_i} \ \psi_{s\beta_i} \ \psi_{sy_i}]^t$, $\Psi_{ri} = [\psi_{ra_i} \ \psi_{r\beta_i} \ \psi_{ry_i}]^t$, $\psi_{sa_i}, \psi_{s\beta_i}, \psi_{sy_i}, \psi_{ra_i}, \psi_{r\beta_i}, \psi_{ry_i}$ - потокосцепления обмоток потокосцепления статора и ротора обмоток i -го АД;

$\mathbf{U}_C = [u_{a1} \ u_{\beta 1} \ u_{\lambda 1} \ \dots \ u_{an} \ u_{\beta n} \ u_{\lambda n}]^t$; $u_{a1} = \dots = u_{an}$, $u_{\beta 1} = \dots = u_{\beta n}$, $u_{\lambda 1} = \dots = u_{\lambda n}$ - напряжения, подаваемые от источника неограниченной мощности; $\mathbf{I}_S = [\mathbf{I}_{s1} \ \dots \ \mathbf{I}_{sn}]^t$, $\mathbf{I}_R = [\mathbf{I}_{r1} \ \dots \ \mathbf{I}_{rn}]^t$ - токи в статорных и роторных обмотках АД, $\mathbf{I}_{si} = [i_{sa_i} \ i_{s\beta_i} \ i_{sy_i}]^t$, $\mathbf{I}_{ri} = [i_{ra_i} \ i_{r\beta_i} \ i_{ry_i}]^t$, $i_{sa_i}, i_{s\beta_i}, i_{sy_i}, i_{ra_i}, i_{r\beta_i}, i_{ry_i}$ – токи в обмотках

статора и ротора i -го АД; $\mathbf{R}_S = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{s1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{R}_{sn} \end{vmatrix}$, $\mathbf{R}_R = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{r1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{R}_{rn} \end{vmatrix}$ - 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_{si}, r_{ri} – активные сопротивления

обмоток i -го АД; $\mathbf{K}_R = \begin{vmatrix} \mathbf{K}_{r1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{K}_{rn} \end{vmatrix}$, $\mathbf{K}_{ri} = \frac{p_{ni}\omega_i}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$, $\mathbf{K}_M = \begin{vmatrix} \mathbf{K}_{m1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{K}_{mn} \end{vmatrix}$,

$\mathbf{K}_{mi} = -p_{ni} \frac{\sqrt{3}}{2} L_{Mi} \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$, p_{ni} – количество пар полюсов, ω_i – угловая скорость;

$\mathbf{M}_{\text{ЭЛ}} = [\mathbf{M}_{\text{ЭЛ}1} \ \dots \ \mathbf{M}_{\text{ЭЛ}n}]$ - электромагнитные моменты; $\mathbf{I}_S^{**} = \begin{vmatrix} \mathbf{I}_{s1}^* & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{I}_{sn}^* \end{vmatrix}$.

Ток для всех электродвигателей системы определяется решением уравнения $\mathbf{I} = \mathbf{L}^{-1} \Psi$, где

$$\mathbf{I} = \begin{vmatrix} \mathbf{I}_S \\ \mathbf{I}_R \end{vmatrix}, \mathbf{L}^{-1} = \begin{vmatrix} \mathbf{L}_1^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{L}_n^{-1} \end{vmatrix}, \Psi = \begin{vmatrix} \Psi_S \\ \Psi_R \end{vmatrix}.$$

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:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{tl} = \mathbf{U}_{tl} - \mathbf{R}_{tl} \mathbf{I}_{tl}, \frac{d}{dt} \Psi_{t2} = \mathbf{U}_{t2} - \mathbf{R}_{t2} \mathbf{I}_{t2}, \quad (2)$$

где $\Psi_{t1} = \begin{vmatrix} \psi_{t1\alpha} & \psi_{t1\beta} & \psi_{t1\gamma} \end{vmatrix}^t$; $\Psi_{t2} = \begin{vmatrix} \psi_{t2\alpha} & \psi_{t2\beta} & \psi_{t2\gamma} \end{vmatrix}^t$, $\psi_{t1\alpha}, \psi_{t1\beta}, \psi_{t1\gamma}, \psi_{t2\alpha}, \psi_{t2\beta}, \psi_{t2\gamma}$ – 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):

$$\mathbf{U}_C + \mathbf{U}_{T2} = 0, \quad \mathbf{I}_{T2} = \mathbf{A}\mathbf{I}_S,$$

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:

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

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

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

$$\mathbf{I}_t = \mathbf{L}_t^{-1} \Psi_t, \quad (3)$$

где $\Psi_t = \begin{vmatrix} \Psi_{t1} \\ \Psi_{t2} \end{vmatrix}$; $\mathbf{I}_t = \begin{vmatrix} \mathbf{I}_{t1} \\ \mathbf{I}_{t2} \end{vmatrix}$;

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

- 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):

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_t = \mathbf{L}_t^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_t,$$

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

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

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:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_{t2} = \mathbf{B} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_S, \quad \mathbf{B} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_S = \mathbf{BL}_{SS}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_S + \mathbf{BL}_{SR} \frac{d}{dt} \Psi_R,$$

где $\mathbf{B} = [\mathbf{E}_1 \quad \mathbf{E}_2 \quad \dots \quad \mathbf{E}_n]$ - матрица сопряжения.

Подставим (5) в (4):

$$\mathbf{BL}_{SS}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_S - \mathbf{L}_{t22}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_{t2} = \mathbf{L}_{t21}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_{t1} - \mathbf{BL}_{SR}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_R.$$

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

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_R &= -\mathbf{R}_R \mathbf{I}_R + \mathbf{K}_R \Psi_R, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{t1} &= \mathbf{U}_{t1} - \mathbf{R}_{t1} \mathbf{I}_{t1}, \\ (\mathbf{E} + \mathbf{S}^* \mathbf{L}_K \mathbf{S} \mathbf{L}_{SS}^{-1}) \frac{d}{dt} \Psi_S + \frac{d}{dt} \Psi_{t2} &= -\mathbf{S}^* \left(\mathbf{L}_K \mathbf{S} \mathbf{L}_{SR}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_R + \mathbf{R}_K \mathbf{S} \mathbf{I}_S \right) - \mathbf{R}_S \mathbf{I}_S - \mathbf{R}_{t2} \mathbf{A} \mathbf{I}_S, \\ \mathbf{BL}_{SS}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_S - \mathbf{L}_{t22}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_{t2} &= \mathbf{L}_{t21}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_{t1} - \mathbf{BL}_{SR}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_R, \\ \mathbf{M}_{\text{эл}} &= \mathbf{I}_S^T \mathbf{K}_M \mathbf{I}_R. \end{aligned} \right\}$$

Таблица 1

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

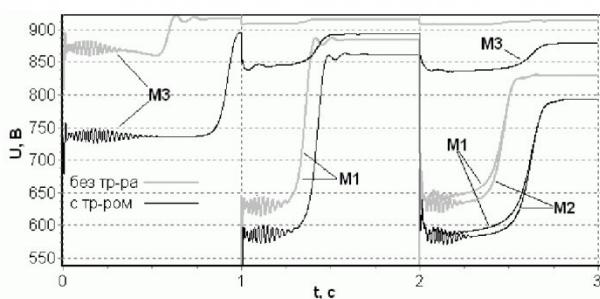


Рис. 2. Изменение амплитуды напряжения на обмотках статоров АД

формируемыми токами запускаемых двигателей, пуск очередного двигателя оказывает влияние на электромеханические характеристики уже работающих в этой системе электродвигателей. Это видно на рис.

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 АВР280Л4 (М1) АВР280Л4 (М2) ДКВ355ЛБ4 (М3). Параметры кабельных линий СЭС приведены в табл. 1.

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,

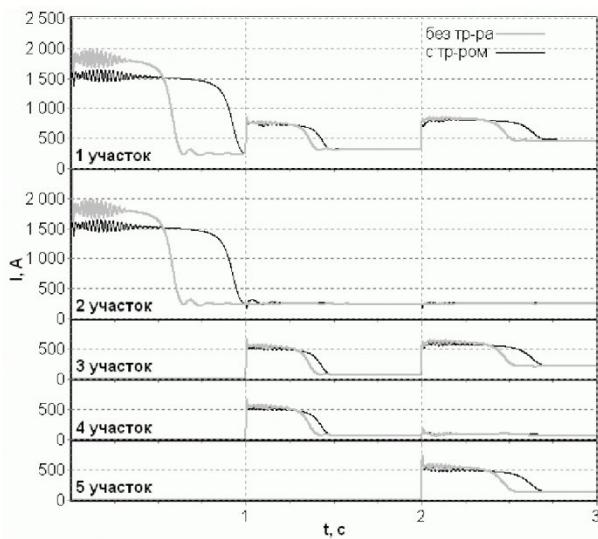


Рис. 3. Изменения амплитудных значений токов, протекающих в кабельных участках сети

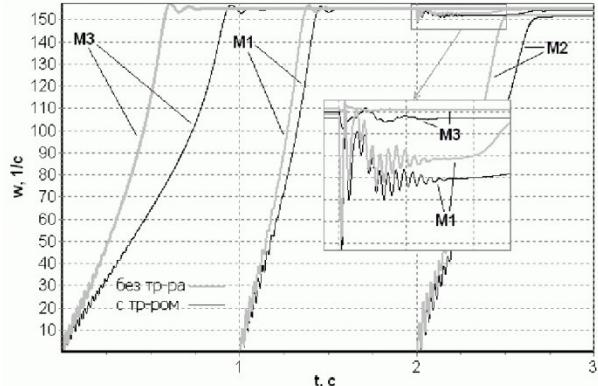


Рис. 4. Изменение угловой скорости вращения роторов АД

на 4% от номинальной, которое длится до достижения двигателем M2 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 процессы 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

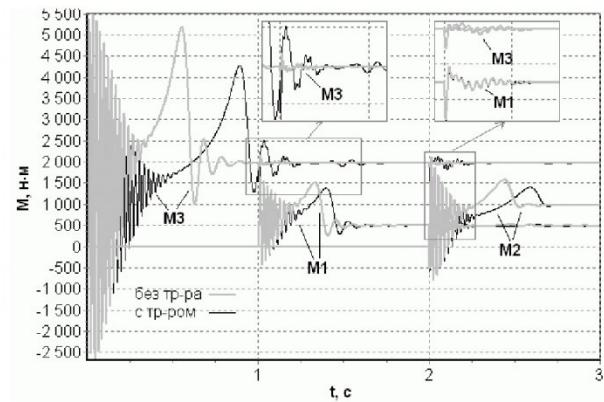


Рис. 5. Изменение электромагнитных моментов АД

2, при пуске двигателя M1 токи этого двигателя формируют падения напряжения на общих участках сети уже с работающим двигателем M3, вследствие чего на обмотках последнего происходит снижение напряжения на 5% от номинального (рис. 2), это оказывает незначительное влияние на электромагнитный момент и скорость двигателя M1 (рис. 4, 5). Похожая ситуация возникает при пуске двигателя M2 с электродвигателями M1, M3 (рис. 2). Вследствие падения напряжения на обмотки двигателя M1 подается низкое напряжение, это объясняется наличием у двигателя M1 большего количества общих протяженных участков сети (1, 3) с двигателем M2, чем у M3 с M2 (1). Последнее значительно сказывается на характеристиках M1 при пуске M2, это хорошо видно на рис. 4, 5, где в момент пуска M2 двигатель M1 развивает тормозной момент (-540 Нм), который далее принимает характер затухающих колебаний, что ведет к резкому падению скорости