

УДК 622:621.313-83

А.Б. Смыков, И.А. Соколов

СНИЖЕНИЯ РИСКОВ ВОЗНИКОВЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ МАШИН

Процесс добычи угля подземным способом разработки сопровождается рисками, связанными с возможностью возникновения пожаров и взрывов из-за наличия в подземных выработках взрывоопасного метана. Воспламенение метана может произойти как следствие интенсивного выделения энергии при возникновении короткого замыкания (КЗ) в системе электроснабжения (СЭС) горных машин.

С целью выработки рекомендаций для построения минимально опасных СЭС и для снижения аварийности при добыче угля необходимо решение задачи моделирования динамических процессов в режимах КЗ в СЭС горных машин.

Так, в случае возникновения аварийного режима трехфазного КЗ, в каком-либо участке кабельной сети, СЭС изменяет свою структуру. Структура СЭС разбивается на две части - «до» точки КЗ (если считать от источника питания) и «после» точки КЗ. Так как режим трехфазного КЗ является симметричным, т.е. сумма токов в точке КЗ равна нулю, то системы «до» и «после» точки КЗ можно рассматривать отдельно.

Система, находящаяся «до» точки КЗ, после возникновения аварийного режима некоторое время до срабатывания защиты будет продолжать получать энергию от источника питания, а в системе «после» точки КЗ протекают процессы обмена энергией, запасенной емкостями электромеханических преобразователей и механическими передаточными устройствами горных машин, до момента возникновения режима КЗ.

После возникновения КЗ в участке СЭС, находящимся «до» точки КЗ, происходит изменение структуры и параметров системы. В системе уменьшается количество потребителей, так как часть двигателей «отсекается» точкой КЗ, и уменьшается общее сопротивление системы из-за появления точки КЗ в аварийном участке.

Аварийный участок системы представляет собой отрезок кабеля, который имеет некоторые активные и индуктивные сопротивления и жилы которого соединяются между собой в точке КЗ. С учетом того, что режим трехфазного КЗ является полностью симметричным, участок системы, где произошло трехфазное КЗ, можно описать системой трех уравнений:

$$\frac{d\psi_{k3\alpha}}{dt} = u_{k3\alpha} - r_{k3\alpha}i_{k3\alpha}, \quad \frac{d\psi_{k3\beta}}{dt} = u_{k3\beta} - r_{k3\beta}i_{k3\beta}, \quad \frac{d\psi_{k3\gamma}}{dt} = u_{k3\gamma} - r_{k3\gamma}i_{k3\gamma}, \quad (1),$$

где $\psi_{k3\alpha}$, $\psi_{k3\beta}$, $\psi_{k3\gamma}$ – потокосцепления участка аварийного кабеля; $u_{k3\alpha}$, $u_{k3\beta}$, $u_{k3\gamma}$ – составляющие напряжений на узле, к которому подсоединен аварийный участок кабеля; $i_{k3\alpha}$, $i_{k3\beta}$, $i_{k3\gamma}$ – составляющие тока КЗ; $r_{k3\alpha}$, $r_{k3\beta}$, $r_{k3\gamma}$ – сопротивления фаз аварийного участка кабеля.

Структура уравнений (1) полностью аналогична уравнениям Парка-Горева, записанным в трехфазной системе координат, что позволяет использовать их вместе с уравнениями двигателей в модели СЭС произвольной конфигурации с электродвигательной нагрузкой, питающейся от источника ограниченной мощности:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}\Psi_R &= -R_R I_R + K_R \Psi_R, \quad \frac{d}{dt}\Psi_{t1} = U_{t1} - R_{t1} I_{t1}, \\ (E + S^* L_K S L_{SS}^{-1}) \frac{d}{dt}\Psi_S + \frac{d}{dt}\Psi_{T2} &= -S^* \left(L_K S L_{SR}^{-1} \frac{d}{dt}\Psi_R + R_K S I_S \right) - R_S I_S - R_{T2} A I_S, \\ B L_{SS}^{-1} \frac{d}{dt}\Psi_S - L_{t22}^{-1} \frac{d}{dt}\Psi_{t2} &= L_{t21}^{-1} \frac{d}{dt}\Psi_{t1} - B L_{SR}^{-1} \frac{d}{dt}\Psi_R, \quad M_{sl} = I_S^{**} K_M I_R. \end{aligned} \right\}, \quad (2),$$

где $\Psi_S = [\Psi_{s1} \dots \Psi_{sn}]^t$, $\Psi_R = [\Psi_{r1} \dots \Psi_{rn}]^t$ - векторы¹ потокосцеплений статоров и роторов двигателей 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 статора и ротора i -го АД, n – количество двигателей в СЭС; $I_S = [I_{s1} \dots I_{sn}]^t$, $I_R = [I_{r1} \dots I_{rn}]^t$,

¹ Векторы в тексте приведены в транспонированном виде, на что указывает индекс t

$$\mathbf{I}_{si} = \left\| i_{sai} \ i_{s\beta i} \ i_{s\gamma i} \right\|^t, \mathbf{I}_{ri} = \left\| i_{rui} \ i_{r\beta i} \ i_{r\gamma i} \right\|^t, i_{sa i}, i_{s\beta i}, i_{s\gamma i}, i_{ra i}, i_{r\beta i}, i_{r\gamma i} - \text{токи в обмотках } i\text{-го АД}; \mathbf{R}_S = \left\| \mathbf{R}_{s1} \cdots \mathbf{R}_{sn} \right\|^d,$$

$\mathbf{R}_R = \left\| \mathbf{R}_{r1} \cdots \mathbf{R}_{rn} \right\|^d$ - диагональные² матрицы активных сопротивлений обмоток статора и ротора заполненные, $\mathbf{R}_{si} = \left\| r_{si} \ r_{si} \ r_{si} \right\|^d$, $\mathbf{R}_{ri} = \left\| r_{ri} \ r_{ri} \ r_{ri} \right\|^d$, r_{si} , r_{ri} - активные сопротивления обмоток статора и ротора i -го АД;

$$\mathbf{K}_R = \left\| \mathbf{K}_{r1} \cdots \mathbf{K}_{rn} \right\|^d, \mathbf{K}_{ri} = \frac{p_{ni}\omega_i}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \mathbf{K}_M = \left\| \mathbf{K}_{m1} \cdots \mathbf{K}_{mn} \right\|^d, \mathbf{K}_{mi} = -p_{ni} \frac{\sqrt{3}}{2} L_{Mi} \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix},$$

p_{ni} - количество пар полюсов, ω_i - угловая скорость; $\mathbf{L}_{ss}^{-1} = \left\| \mathbf{L}_{ss1}^{-1} \cdots \mathbf{L}_{ssn}^{-1} \right\|^d$, $\mathbf{L}_{sr}^{-1} = \left\| \mathbf{L}_{sr1}^{-1} \cdots \mathbf{L}_{srn}^{-1} \right\|^d$,

$$\mathbf{L}_i^{-1} = \begin{vmatrix} \mathbf{L}_{ssi}^{-1} & \mathbf{L}_{sri}^{-1} \\ \mathbf{L}_{rsi}^{-1} & \mathbf{L}_{pri}^{-1} \end{vmatrix} - \text{матрица, обратная матрице}$$

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

L_{Mi} - взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора i -го АД, L_{si} , L_{ri} - индуктивности обмоток i -го АД; $\mathbf{M}_{ЭЛ} = \left\| \mathbf{M}_{эл1} \cdots \mathbf{M}_{элn} \right\|^t$ - электромагнитные моменты; $\mathbf{I}_S^{**} = \left\| \mathbf{I}_{s1}^* \cdots \mathbf{I}_{sn}^* \right\|^d$ - диагональная матрица, содержащая транспонированные вектора токов статоров двигателей; \mathbf{E} - единичная матрица, размером $3 \cdot n$ элементов; $\mathbf{R}_K = \left\| \mathbf{R}_{kl} \cdots \mathbf{R}_{km} \right\|^d$, $\mathbf{R}_{kj} = \left\| r_{ka j} \ r_{k\beta j} \ r_{k\gamma j} \right\|^d$, $r_{ka j}$, $r_{k\beta j}$, $r_{k\gamma j}$ - активные сопротивления фаз j -го участка сети, m - количество участков в СЭС; $\mathbf{L}_K = \left\| \mathbf{L}_{kl} \cdots \mathbf{L}_{km} \right\|^d$, $\mathbf{L}_{kj} = \left\| L_{ka j} \ L_{k\beta j} \ L_{k\gamma j} \right\|^d$, $L_{ka j}$, $L_{k\beta j}$, $L_{k\gamma j}$ - индуктивности фаз j -го участка сети; $\mathbf{B} = \left\| \mathbf{E}_1 \ \mathbf{E}_2 \ \cdots \ \mathbf{E}_n \right\|$; $\Psi_{t1} = \left\| \psi_{t1\alpha} \ \psi_{t1\beta} \ \psi_{t1\gamma} \right\|^t$, $\Psi_{T2} = \left\| \Psi_{t2} \cdots \Psi_{tn} \right\|^t$

- размер вектора n элементов, $\Psi_{t2} = \left\| \psi_{t2\alpha} \ \psi_{t2\beta} \ \psi_{t2\gamma} \right\|^t$, $\psi_{t1\alpha}$, $\psi_{t1\beta}$, $\psi_{t1\gamma}$, $\psi_{t2\alpha}$, $\psi_{t2\beta}$, $\psi_{t2\gamma}$ - потокосцепления первичной и вторичной обмоток трансформатора; $\mathbf{U}_{t1} = \left\| u_{t1\alpha} \ u_{t1\beta} \ u_{t1\gamma} \right\|^t$, $u_{t1\alpha}$, $u_{t1\beta}$, $u_{t1\gamma}$ - напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора; $\mathbf{I}_{t1} = \left\| i_{t1\alpha} \ i_{t1\beta} \ i_{t1\gamma} \right\|^t$, $i_{t1\alpha}$, $i_{t1\beta}$, $i_{t1\gamma}$ - токи, протекающие через первичную обмотку трансформатора; $\mathbf{R}_{t1} = \left\| r_{t1} \ r_{t1} \ r_{t1} \right\|^d$, $\mathbf{R}_{T2} = \left\| \mathbf{R}_{t2} \cdots \mathbf{R}_{tn} \right\|^d$ - размер матрицы n на n элементов, $\mathbf{R}_{t2} = \left\| r_{t2} \ r_{t2} \ r_{t2} \right\|^d$, r_{t1} , r_{t2} - активные сопротивления обмоток трансформатора;

$$\mathbf{L}_t^{-1} = \begin{vmatrix} \mathbf{L}_{t1}^{-1} \\ \mathbf{L}_{t2}^{-1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{L}_{t11}^{-1} & \mathbf{L}_{t12}^{-1} \\ \mathbf{L}_{t21}^{-1} & \mathbf{L}_{t22}^{-1} \end{vmatrix} - \text{матрица, обратная матрице}$$

$$\mathbf{L}_t = \begin{vmatrix} L_{t1} + L_{tM} - L_{tM}/2 - L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 - L_{tM}/2 \\ -L_{tM}/2 L_{t1} + L_{tM} - L_{tM}/2 - L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 \\ -L_{tM}/2 - L_{tM}/2 L_{t1} + L_{tM} - L_{tM}/2 - L_{tM}/2 & L_{tM} & \\ L_{tM} & -L_{tM}/2 - L_{tM}/2 L_{t2} + L_{tM} - L_{tM}/2 - L_{tM}/2 & \\ -L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 - L_{tM}/2 L_{t2} + L_{tM} - L_{tM}/2 \\ -L_{tM}/2 - L_{tM}/2 & L_{tM} & -L_{tM}/2 - L_{tM}/2 L_{t2} + L_{tM} \end{vmatrix},$$

L_{t1} , L_{t2} - индуктивности трансформатора, L_{tM} - взаимоиндуктивность трансформатора.

² Далее по тексту введено обозначение диагональных матриц в виде индекса d

Ток для всех электродвигателей системы определяется связью: $\mathbf{I} = \mathbf{L}^{-1}\Psi$, где $\mathbf{I} = [\mathbf{I}_1 \cdots \mathbf{I}_n]^t$, $\mathbf{I}_i = [\mathbf{I}_{si} \mathbf{I}_{ri}]^t$, $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1^{-1} \cdots \mathbf{L}_n^{-1}]^d$, $\Psi = [\Psi_1 \cdots \Psi_n]^t$ $\Psi_i = [\Psi_{si} \Psi_{ri}]^t$.

В системе уравнений (1) матрицей \mathbf{S} описывается структура СЭС, которая имеет m – строк, определяется количеством участков сети, и n столбцов – количеством двигателей в СЭС. Содержимое матрицы формируется по следующим правилам, если i -й двигатель получает питание через j -й участок сети, то элемент $S_{j,i}$ будет содержать единичную подматрицу \mathbf{E} размером 3×3 .

После возникновения КЗ структура системы, образовавшейся «до» точки КЗ, описывается, руководствуясь правилами для обычной системы произвольной конфигурации, но целью сохранения структуры уравнений для описания аварийного участка кабеля в матрице \mathbf{S} выделяется дополнительный столбец и в схему вводится фиктивный кабель нулевой длины, который соединяет узел с аварийным участком.

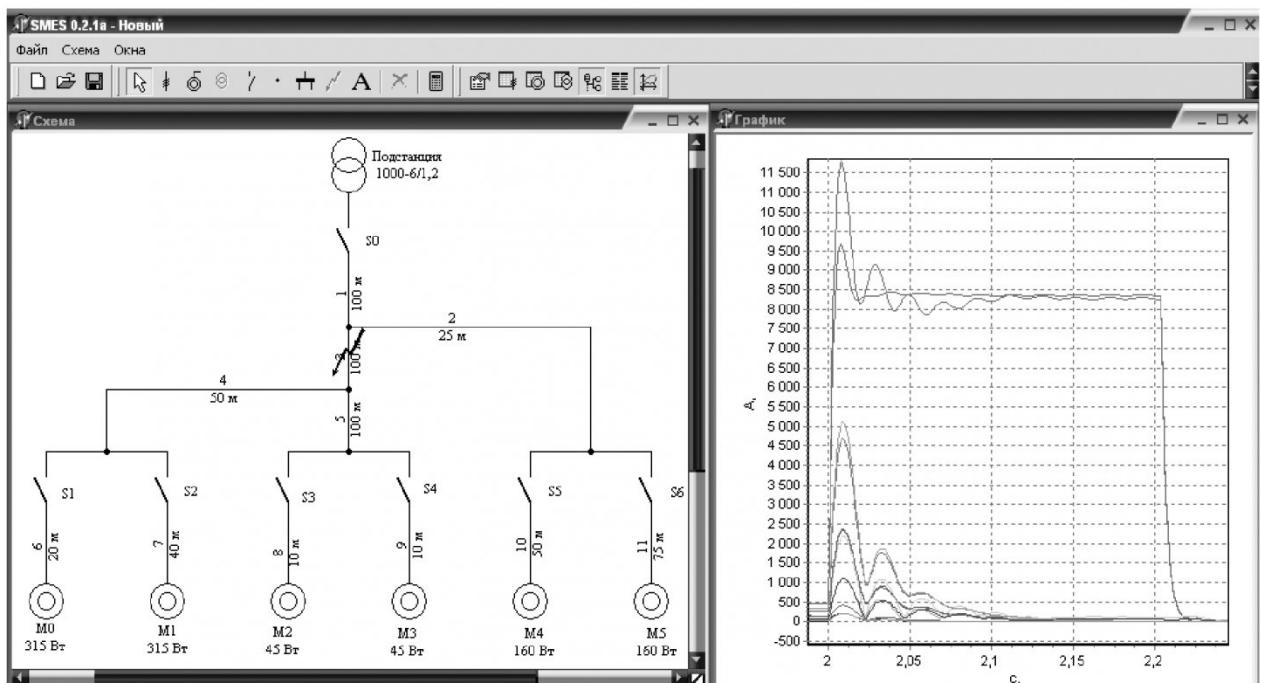
Для определения характеристик процессов в системе «до» точки КЗ после возникновения аварийного режима КЗ используется система уравнений (1).

При этом, матрицы с параметрами системы изменяются следующим образом:

$\Psi_S = [\Psi_{s1} \cdots \Psi_{sn} \Psi_{k3}]^t$, $\mathbf{I}_S = [\mathbf{I}_{s1} \cdots \mathbf{I}_{sn} \mathbf{I}_{k3}]^t$, $\mathbf{L}_{SS}^{-1} = [\mathbf{L}_{ss1}^{-1} \cdots \mathbf{L}_{ssn}^{-1} \mathbf{L}_{k3}^{-1}]^d$, $\mathbf{R}_S = [\mathbf{R}_{s1} \cdots \mathbf{R}_{sn} \mathbf{R}_{k3}]^d$, - в матрицах последние элементы являются параметрами точки КЗ, где $\Psi_{k3} = [\psi_{k3\alpha} \psi_{k3\beta} \psi_{k3\gamma}]^t$; $\mathbf{I}_{k3} = [i_{k3\alpha} i_{k3\beta} i_{k3\gamma}]^t$; $\mathbf{L}_{k3}^{-1} = [1/L_{kk3\alpha} 1/L_{kk3\beta} 1/L_{kk3\gamma}]^d$; $L_{k3\alpha}, L_{k3\beta}, L_{k3\gamma}$ – индуктивности фаз аварийного участка кабеля; $\mathbf{R}_{k3} = [r_{k3\alpha} r_{k3\beta} r_{k3\gamma}]^d$; $r_{k3\alpha}, r_{k3\beta}, r_{k3\gamma}$ – активные сопротивления фаз аварийного участка кабеля; $\Psi_R = [\Psi_{r1} \cdots \Psi_{rn} 0]^t$, $\mathbf{I}_R = [\mathbf{I}_{r1} \cdots \mathbf{I}_{rn} 0]^t$, $\mathbf{L}_{SR}^{-1} = [\mathbf{L}_{sr1}^{-1} \cdots \mathbf{L}_{srn}^{-1} 0]^d$, $\mathbf{R}_R = [\mathbf{R}_{r1} \cdots \mathbf{R}_{rn} 0]^d$ - в матрицах последние элементы принадлежат точке КЗ и равны нулю; $\mathbf{L}_K = [\mathbf{L}_{k1} \cdots \mathbf{L}_{km} 0]^d$, $\mathbf{R}_K = [\mathbf{R}_{k1} \cdots \mathbf{R}_{km} 0]^d$, где в матрицах последний элемент - ноль, так как используется фиктивный кабель нулевой длины.

Ток с потокосцеплением в аварийном участке кабеля связан зависимостью: $\mathbf{I}_{k3} = \mathbf{L}_{k3}^{-1}\Psi_{k3}$.

При возникновении КЗ, в начальный момент времени, из-за наличия в системе индуктивностей, в цепях протекают токи, равные токам до момента возникновения. Отсюда, для начальных условий расчета характеристик процессов, протекающих в аварийном режиме в поврежденном участке кабеля, берем



Токи в участках СЭС при возникновении трехфазного КЗ

Таблица

Зависимость значений ударных токов КЗ при удалении точки КЗ

№	Минимальное удаление		Максимальное удаление		№	Минимальное удаление		Максимальное удаление	
	I _{уд} , A	I _{уст} , A	I _{уд} , A	I _{уст} , A		I _{уд} , A	I _{уст} , A	I _{уд} , A	I _{уст} , A
1	13225	10028	10858	8875	7	12725	7240	11391	6683
2	15618	8869	14634	8504	8	12448	6508	12097	6371
3	13134	8876	10737	7742	9	12457	6498	12106	6364
4	11151	7744	10171	7240	10	15798	8502	12726	7394
5	15599	7737	12243	6523	11	15815	8498	11596	6877
6	12680	7249	11981	6954					

мгновенные значения токов, протекающих в последний момент времени до возникновения КЗ, которые определяются как сумма токов двигателей, которые питались через аварийный участок: $\mathbf{I}_{\text{кз}}^0 = \sum \mathbf{I}_S$.

Для расчетов определяем начальные значения потокосцеплений в аварийном участке кабеле:

$$\Psi_{\text{кз}}^0 = \mathbf{L}_{\text{кз}} \mathbf{I}_{\text{кз}}^0, \text{ где } \mathbf{L}_{\text{кз}} = \left\| L_{\text{ккз}\alpha} \ L_{\text{ккз}\beta} \ L_{\text{ккз}\gamma} \right\|^d.$$

При возникновении трехфазного КЗ от общей СЭС точкой КЗ «отсекается» часть системы. Если эту часть рассматривать отдельно как самостоятельную систему, то ее структура аналогична СЭС произвольной конфигурации с электродвигательной нагрузкой, питающейся от источника неограниченной мощности, при условии, что напряжение на зажимах источника равно нулю. Отсюда, характеристики процессов, протекающих в системе, находящейся «после» точки КЗ, можно описать с помощью системы:

$$\left. \begin{aligned} & \left(\mathbf{E} + \mathbf{S}^* \mathbf{L}_K \mathbf{S} \mathbf{L}_{SS}^{-1} \right) \frac{d}{dt} \Psi_S = \mathbf{U}_C - \mathbf{S}^* \left(\mathbf{L}_K \mathbf{S} \mathbf{L}_{SR}^{-1} \frac{d}{dt} \Psi_R + \mathbf{R}_K \mathbf{S} \mathbf{I}_S \right) - \mathbf{R}_S \mathbf{I}_S, \\ & \frac{d}{dt} \Psi_R = -\mathbf{R}_R \mathbf{I}_R + \mathbf{K}_R \Psi_R, \quad \mathbf{M}_{\text{эл}} = \mathbf{I}_S^* \mathbf{K}_M \mathbf{I}_R, \end{aligned} \right\}, (3).$$

Структура системы «после» точки КЗ описывается стандартным образом.

Матрицы параметров системы уравнений (3) изменяются следующим образом:

$$\mathbf{U}_C = \left\| 0 \ 0 \ 0 \cdots 0 \ 0 \ 0 \right\|^t, \quad \mathbf{L}_K = \left\| \mathbf{L}_{\text{ккз}} \ \mathbf{L}_{k1} \cdots \mathbf{L}_{km} \right\|^d, \quad \mathbf{R}_K = \left\| \mathbf{R}_{\text{ккз}} \ \mathbf{R}_{k1} \cdots \mathbf{R}_{km} \right\|^d.$$

На рисунке приведены результаты моделирования трехфазного КЗ в третьем участке СЭС с источником питания – трансформаторная подстанция ТСВП-1000/6/1,2, с потребителями – асинхронными электродвигатели ДКВ355LB4 (M0, M1), ДКВ45 (M2, M3) и АВР280L4 (M4, M5). Результаты получены при помощи системы моделирования SMES³, в которой реализована вышеописанная математическая модель, алгоритмы синтеза схем и моделирования процессов в СЭС до и после возникновения режима КЗ.

Ниже приведена таблица значений установившихся ударных токов КЗ, при возникновении трехфазного КЗ в различных участках СЭС, показанной на рисунке, в случаях минимального и максимально го удаления точки КЗ от источника питания в пределах участка.

Из таблицы видны нелинейные зависимости значений ударных токов КЗ при удалении точки КЗ, что объясняется появлением в системе «до» точки КЗ новых электродвигателей, подпитывающих аварийный участок. Из таблицы можно выявить наиболее опасные участки системы, так для системы, приведенной на рисунке, наиболее опасными участками, с максимальным значением ударного тока КЗ, являются участки 2, 5, 10, 11. Значения ударного тока КЗ зависят не только от параметров СЭС, но и от количества двигателей подпитывающих точку КЗ, от их характеристик, в том числе и от характеристик нагрузки двигателей. Так, при одинаковых параметрах участков 8 и 9, в результате моделирования получены различные значения токов КЗ из-за наличия у двигателей, с одинаковыми характеристиками, разной нагрузки. Таким образом, как видно из результатов, наиболее опасные участки СЭС можно выявить только при анализе динамических характеристик переходных процессов.

□ Авторы статьи:

Смыков Анатолий Борисович – канд. техн. наук, доц. каф. вычислительной техники и информационных технологий	Соколов Игорь Александрович – канд. техн. наук, доц. каф. вычислительной техники и информационных технологий
--	--

³ Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610266. Система моделирования аварийных режимов в шахтных участковых сетях электроснабжения (Система моделирования SMES)