

МОДЕЛЬ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ, ПИТАЮЩЕЙ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

В.А. Негадаев

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово

E-mail: negadaev@rambler.ru

Предложена модель сети электроснабжения произвольной структуры, питающей асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Отмечено преимущество данной модели при использовании её в расчетной практике для поиска рациональной конфигурации сети электроснабжения с электродвигательной нагрузкой.

Ключевые слова:

Модель, сеть электроснабжения, рациональная конфигурация сети, произвольная структура, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Key words:

Model, power supply network, rational network configuration, arbitrary structure, induction motor with squirrel-cage rotor.

Известна модель асинхронного двигателя в сети электроснабжения произвольной структуры [1, 2]. Недостатком этой модели при использовании её в компьютерном моделировании является то, что для исследования режимов работы совокупности из N асинхронных двигателей необходимо рассчитывать до 2^{N-1} двигателей. При этом значительно

увеличивается время расчёта (до $\frac{2^{N-1}}{N}$ раз, $N \geq 2$).

Особенно это существенно при поиске рациональной конфигурации сети электроснабжения, когда расчёт сети производится многократно. Для поиска рациональной конфигурации сети электроснабжения известна модель магистральной структуры электроснабжения [3]. Однако в этой модели двигатель находится в составе сети электроснабжения магистральной структуры, которая не пригодна для описания двигателя в составе произвольной структуры. Поэтому создана модель сети электроснабжения произвольной структуры, позволяющая описывать любые конфигурации сети, при использовании которой увеличивается скорость расчёта совокупности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Любую конфигурацию сети с N двигателями при питании от одного источника можно представить в виде структуры, показанной на рис. 1, где N — количество двигателей в сети; s — количество уровней в сети; j — порядковый номер двигателя, $j \in [1; N]$. Нумерация двигателей производится слева направо и сверху вниз. Узел — место присоединения участков кабелей. Отрезок кабеля — участок кабеля между узлами. До N -го двигателя от трансформатора наибольшее число отрезков кабеля. Код двигателя показан в круглых скобках, а код отрезка кабеля — в квадратных. Коды состоят из s элементов.

Для определения напряжения на обмотке статора j -го двигателя в рассматриваемой сети необходимо описать путь от двигателя до трансформатора, а также определить двигатели, токи которых

участвуют в формировании падения напряжения на каждом отрезке кабеля.

Составляющие напряжения на обмотке статора j -го двигателя (в неподвижных координатных осях α, β):

$$\begin{cases} u_{\alpha j} = u_{\alpha} - \left(\sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{di_{s\alpha b}}{dt} + \sum_{a=D_j}^1 R_v \sum_{b=b_0}^{b_1} i_{s\alpha b} \right); \\ u_{\beta j} = u_{\beta} - \left(\sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{di_{s\beta b}}{dt} + \sum_{a=D_j}^1 R_v \sum_{b=b_0}^{b_1} i_{s\beta b} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{\alpha j}, u_{\beta j}$ — составляющие напряжения статора j -го двигателя; u_{α}, u_{β} — составляющие напряжения вторичной обмотки трансформатора; $i_{s\alpha b}, i_{s\beta b}$ — составляющие тока статора b -го двигателя; L_v, R_v — соответственно индуктивность и активное сопротивление отрезка кабеля с номером v ; $D_j = f_{1j} + f_{2j} + \dots + f_{sj}$ — количество отрезков кабеля от трансформатора до j -го двигателя по пути с кодом F_j ; $F_j = (f_{1j}; f_{2j}; f_{sj})$ — код j -го двигателя, каждый элемент которого показывает количество отрезков кабеля соответствующего уровня на пути от трансформатора до j -го двигателя, по которым протекает ток j -го двигателя; f_{1j} — количество отрезков кабеля 1-го уровня, по которым протекает ток j -го двигателя на пути от трансформатора до j -го двигателя; f_{2j} — количество отрезков кабеля 2-го уровня, по которым протекает ток j -го двигателя на пути от трансформатора до j -го двигателя; f_{sj} — количество отрезков кабеля s -го уровня, по которым протекает ток j -го двигателя на пути от трансформатора до j -го двигателя; $f_{sj} \in [0; 1]$; a — порядковый номер отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя (отсчитываются отрезки кабеля от трансформатора, $a \in [1; D_j]$); b — порядковый номер двигателя, ток которого протекает по a -му отрезку кабеля, $b \in [b_0; b_1]$; b_0, b_1 — начальный и конечный порядковые номера двигателей, токи которых протекают по a -му отрезку кабеля.

Рассмотрим алгоритм расчёта составляющих напряжения статора j -го двигателя $u_{\alpha j}, u_{\beta j}$.

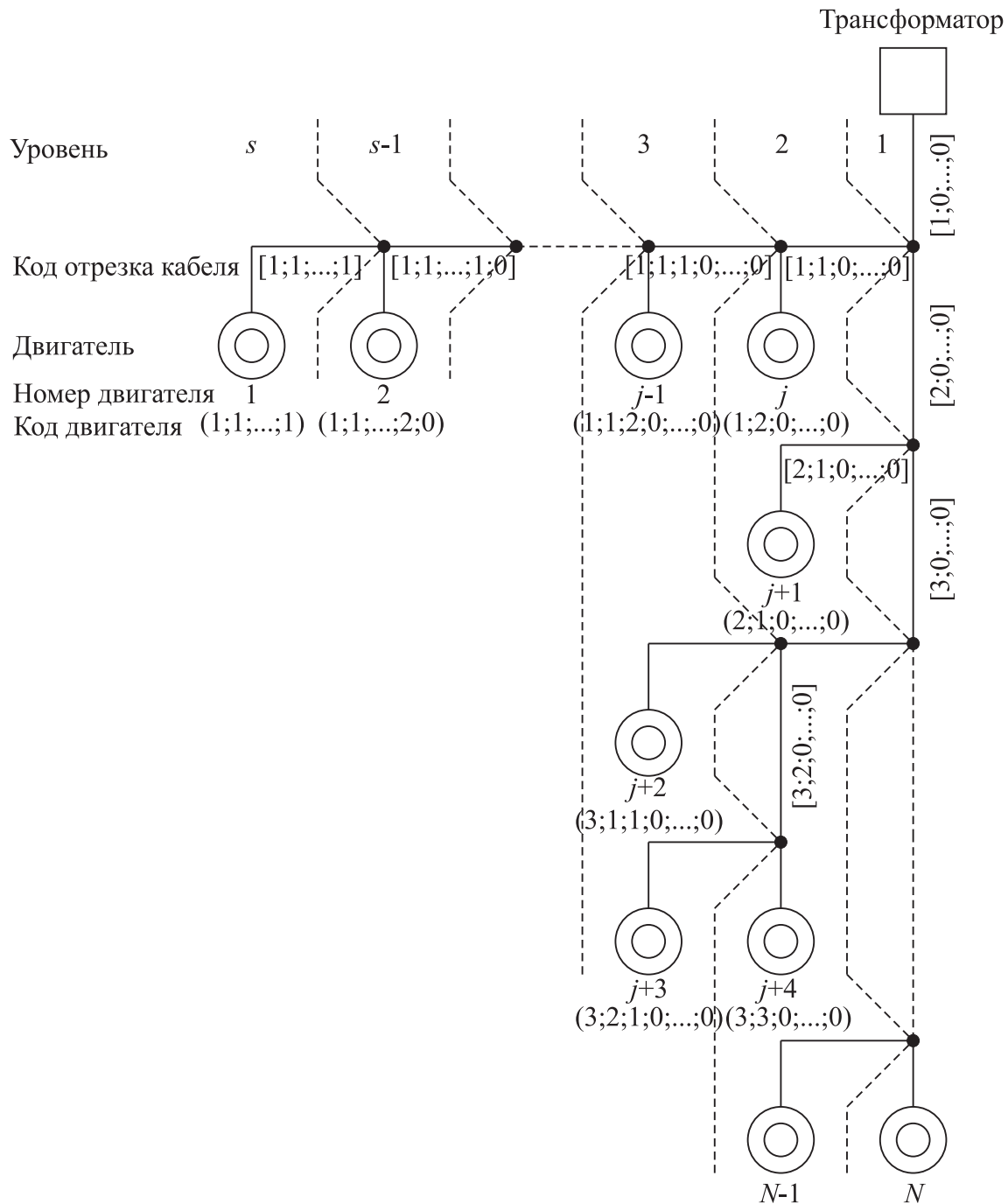


Рис. 1. Структура сети электроснабжения с электродвигательной нагрузкой

Сначала заданную конфигурацию сети электроснабжения необходимо представить в виде структуры, изображенной на рис. 1. Для этого нужно в качестве последнего N -го двигателя выбрать двигатель, до которого от трансформатора наибольшее число отрезков кабеля. После этого двигателям присваиваются порядковые номера j слева направо и сверху вниз. После составления структуры сети электроснабжения определяются следующие параметры: N – количество двигателей в сети; s – количество уровней в сети; M_j – номер уровня j -го двигателя, $j \in [1; N]$; F_j – код j -го двигателя, $j \in [1; N]$.

Вышеперечисленных параметров достаточно, чтобы рассчитать следующие дополнительные параметры сети: $f_{\max} = \max(f_{ij})$ – максимальное количество отрезков кабеля i -го уровня из всех кодов F_j , $i \in [1; s]$, $j \in [1; N]$; $f_{1,N}$ – количество отрезков кабеля первого уровня, по которым протекает ток N -го двигателя, $f_{1,N} = f_{\max}$; D_j – количество отрезков кабеля от трансформатора до j -го двигателя по пути с кодом F_j , $D_j = f_{1,j} + f_{2,j} + \dots + f_{s,j}$.

Для дальнейших расчетов необходимо определить значения еще трех параметров: T_{aj} – код a -го отрезка кабеля, состоящий из s элементов, каждый

элемент которого показывает количество отрезков кабеля соответствующего уровня до a -го отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя, $T_{a,j}=[T_{1,a,j}; T_{2,a,j}; \dots; T_{s,a,j}]$; $T_{1,a,j}$ – количество отрезков кабеля 1-го уровня от трансформатора до a -го отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя, $T_{1,a,j} \in [1; f_{1,N}]; T_{2,a,j}$ – количество отрезков кабеля 2-го уровня от трансформатора до a -го отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя, $T_{2,a,j} \in [1; f_{2,N}]; T_{s,a,j}$ – количество отрезков кабеля s -го уровня от трансформатора до a -го отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя, $T_{s,a,j} \in [0; 1]; M_{a,j}$ – номер уровня a -го отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя; v – номер a -го отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя,

$$v = t_{1,a,j} f_{1,N}^{f_{1,N}-1} + t_{2,a,j} f_{1,N}^{f_{1,N}-2} + \dots + t_{(f_{1,N}-1)a,j} f_{1,N} + t_{1,N,a,j}.$$

Расчет кодов отрезков кабеля $T_{a,j}$ начинается с отрезка кабеля, который присоединен непосредственно к j -му двигателю, поэтому параметрам a и $M_{a,j}$ сначала присваиваются следующие значения: $a=D_j$, $M_{a,j}=M_j$.

Находим код a -го отрезка кабеля $T_{a,j}$ и номер уровня a -го отрезка кабеля $M_{a,j}$ из следующих выражений.

$$T_{a,j} = [t_{1,a,j}; t_{2,a,j}; \dots; t_{s,a,j}],$$

где

$$t_{1,a,j} = f_{1,j}; t_{2,a,j} = f_{2,j}; \dots; t_{(M_{a,j}-1)a,j} = f_{(M_{a,j}-1)j};$$

$$t_{M_{a,j}a,j} = a - \sum_{i=1}^{M_{a,j}-1} t_{i,a,j}; t_{(M_{a,j}+1)a,j} = 0; \dots; t_{sa,j} = 0.$$

Для последующих значений a ($a \in [D_j-1; 1]$):

$$t_{1,a,j} = t_{1,(a+1),j}; t_{2,a,j} = t_{2,(a+1),j}; \dots; t_{(M_{(a+1),j}-1)a,j} =$$

$$= t_{(M_{(a+1),j}-1),(a+1),j};$$

$$t_{(M_{(a+1),j})a,j} = a - \sum_{i=1}^{M_{(a+1),j}-1} t_{i,(a+1),j};$$

$$t_{(M_{(a+1),j}+1)a,j} = 0; \dots; t_{sa,j} = 0.$$

$$\text{Если } \sum_{i=1}^{M_{(a+1),j}-1} t_{i,a,j} = \sum_{i=1}^{M_{(a+1),j}} t_{i,a,j}, \text{ то } M_{a,j} = M_{(a+1),j} - 1.$$

$$\text{Если } \sum_{i=1}^{M_{(a+1),j}-1} t_{i,a,j} \neq \sum_{i=1}^{M_{(a+1),j}} t_{i,a,j}, \text{ то } M_{a,j} = M_{(a+1),j}.$$

Если $a=1$, то $t_{1,a,j}=1$, $M_{a,j}=1$.

Определяем номер a -го отрезка кабеля:

$$v = t_{1,a,j} f_{1,N}^{f_{1,N}-1} + t_{2,a,j} f_{1,N}^{f_{1,N}-2} + \dots + t_{(f_{1,N}-1)a,j} f_{1,N} + t_{1,N,a,j}.$$

Найдя номер отрезка кабеля v , задаем активное сопротивление R_v и индуктивность L_v a -го отрезка кабеля на пути от трансформатора до j -го двигателя.

В зависимости от a рассчитываем далее следующие элементы системы уравнений (1):

$$\sum_{b=b_0}^{b_1} i_{s\alpha b} \text{ и } \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{di_{s\alpha b}}{dt}.$$

Для этого вводим вспомогательный массив q_z , $z \in [1; N]$.

Всем элементам массива присваиваем наибольшее значение: $q_z=N$.

Решаем систему относительно b_0 :

$$\begin{cases} z \in [1; N]; \\ \text{если } [t_{1,a,j}; t_{2,a,j}; \dots; t_{(M_{a,j})a,j}] = \\ \quad = (f_{1,z}; f_{2,z}; \dots; f_{(M_{a,j})z}), \\ \text{то } q_z = z; b_0 = \min q_z. \end{cases}$$

Всем элементам массива присваиваем наименьшее значение: $q_z=1$.

Решаем систему относительно b_1 :

$$\begin{cases} z \in [1; N]; \\ \text{если } M_{a,j} = 1, \\ \text{то } b_1 = N; \\ \text{если } M_{a,j} \geq 2u[t_{1,a,j}; t_{2,a,j}; \dots; t_{(M_{a,j}-1)a,j}] = \\ \quad = (f_{1,z}; f_{2,z}; \dots; f_{(M_{a,j}-1)z}), \\ \text{то } q_z = z; b_1 = \max q_z. \end{cases}$$

Для примера на рис. 2 показана сеть электропитания с шестью двигателями. Рассмотрим алгоритм расчета составляющих напряжения на обмотке статора 3-го двигателя. Параметры сети: $N=6$, $s=3$, $j=3$, $M_j=M_3=2$. Коды двигателей: $F_1=(1;1;1)$, $F_2=(1;2;1)$, $F_3=(1;3;0)$, $F_4=(2;1;0)$, $F_5=(3;1;0)$, $F_6=(4;0;0)$.

Далее рассчитываем дополнительные параметры сети: $f_{1,N}=f_{1,6}=4$, $D_j=D_3=4$.

Параметры отрезков кабелей от трансформатора до 3-го двигателя, рассчитанные по вышеприведенному алгоритму, приведены в таблице. При заданных значениях R_v и L_v по уравнениям (1) находят составляющие напряжения статора $u_{s\alpha 3}$, $u_{s\beta 3}$.

Состояние j -го двигателя, работающего в одиночном варианте, описывается совокупностью дифференциальных и алгебраических связей [4]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{s\alpha j}}{dt} = u_{s\alpha j} - R_{sj} i_{s\alpha j}; \\ i_{s\alpha j} = \frac{\psi_{s\alpha j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj} \psi_{r\alpha j}}{L'_{rj}}; \\ \frac{d\psi_{s\beta j}}{dt} = u_{s\beta j} - R_{sj} i_{s\beta j}; \\ i_{s\beta j} = \frac{\psi_{s\beta j}}{L'_{sj}} - \frac{k_{rj} \psi_{r\beta j}}{L'_{rj}}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha j}}{dt} = -R_{rj} i_{r\alpha j} - p_j \omega_j \psi_{r\beta j}; \\ i_{r\alpha j} = \frac{\psi_{r\alpha j}}{L'_{rj}} - \frac{k_{sj} \psi_{s\alpha j}}{L'_{sj}}; \\ \frac{d\psi_{r\beta j}}{dt} = -R_{rj} i_{r\beta j} + p_j \omega_j \psi_{r\alpha j}; \\ i_{r\beta j} = \frac{\psi_{r\beta j}}{L'_{rj}} - \frac{k_{sj} \psi_{s\beta j}}{L'_{sj}}, \end{cases} \quad (2)$$

где параметры, начинающиеся с R и с индексами s, r – активные сопротивления обмоток статоров и роторов асинхронных двигателей; p_j – число пар полюсов; ω_j – угловая скорость вращения ротора; ψ_s, ψ_r и i_s, i_r с индексами α, β – составляющие потокоцеплений и токов статора и ротора по осям неподвижной системы координат; k, L' с индексами sj, rj – коэффициенты электромагнитной связи и переходные индуктивности двигателей.

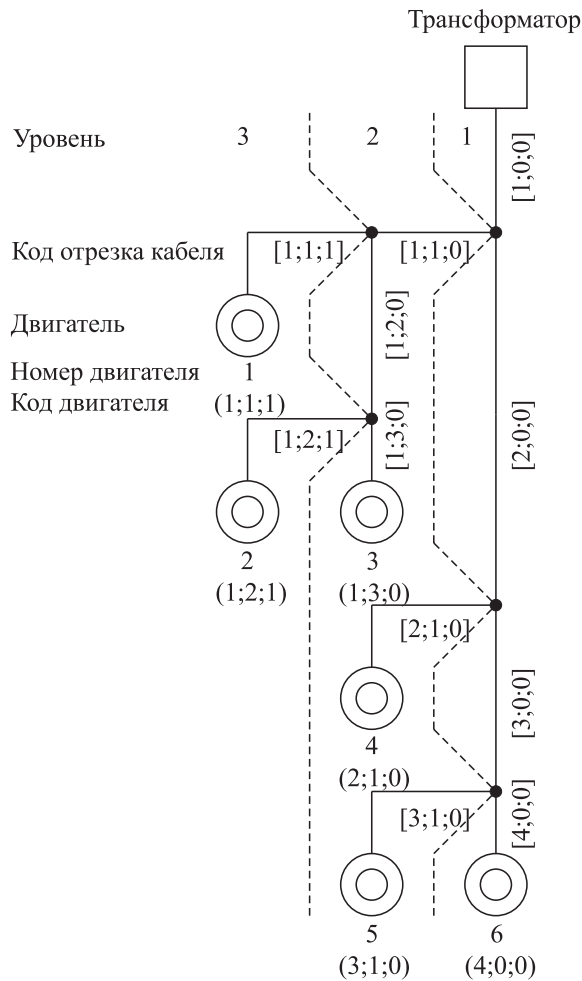


Рис. 2. Сеть электроснабжения с шестью двигателями

Таблица.

a	$T_{a,3}$	$M_{a,3}$	v	R_v	L_v	b_0	b_1
4	[1;3;0]	2	112	R_{112}	L_{112}	3	3
3	[1;2;0]	2	96	R_{96}	L_{96}	2	3
2	[1;1;0]	2	80	R_{80}	L_{80}	1	3
1	[1;0;0]	1	64	R_{64}	L_{64}	1	6

Продифференцируем второе и четвертое выражения системы (2):

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha j}}{dt} = \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\psi_{s\alpha j}}{dt} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} (-R_{rj} i_{r\alpha j} - p_j \omega_j \psi_{r\beta j}); \\ \frac{di_{s\beta j}}{dt} = \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\psi_{s\beta j}}{dt} - \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} (-R_{rj} i_{r\beta j} + p_j \omega_j \psi_{r\alpha j}). \end{cases} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получаем:

$$\begin{cases} u_{s\alpha j} = u_\alpha - \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{1}{L'_{sb}} \frac{d\psi_{s\alpha b}}{dt} + \\ + \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{k_{rb}}{L'_{sb}} (-R_{rb} i_{r\alpha b} - p_b \omega_b \psi_{r\beta b}) - \\ - \sum_{a=D_j}^1 R_v \sum_{b=b_0}^{b_1} i_{s\alpha b}; \\ u_{s\beta j} = u_\beta - \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{1}{L'_{sb}} \frac{d\psi_{s\beta b}}{dt} + \\ + \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{k_{rb}}{L'_{sb}} (-R_{rb} i_{r\beta b} + p_b \omega_b \psi_{r\alpha b}) - \\ - \sum_{a=D_j}^1 R_v \sum_{b=b_0}^{b_1} i_{s\beta b}. \end{cases} \quad (4)$$

Объединяя (2) и (4), находим искомую математическую модель для j -го двигателя в сети электропитания произвольной структуры:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{s\alpha j}}{dt} + \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{1}{L'_{sb}} \frac{d\psi_{s\alpha b}}{dt} = \\ = u_\alpha + \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{k_{rb}}{L'_{sb}} (-R_{rb} i_{r\alpha b} - p_b \omega_b \psi_{r\beta b}) - \\ - \sum_{a=D_j}^1 R_v \sum_{b=b_0}^{b_1} i_{s\alpha b} - R_{sj} i_{s\alpha j}; \\ \frac{d\psi_{s\beta j}}{dt} + \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{1}{L'_{sb}} \frac{d\psi_{s\beta b}}{dt} = \\ = u_\beta + \sum_{a=D_j}^1 L_v \sum_{b=b_0}^{b_1} \frac{k_{rb}}{L'_{sb}} (-R_{rb} i_{r\beta b} + p_b \omega_b \psi_{r\alpha b}) - \\ - \sum_{a=D_j}^1 R_v \sum_{b=b_0}^{b_1} i_{s\beta b} - R_{sj} i_{s\beta j}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha j}}{dt} = -R_{rj} i_{r\alpha j} - p_j \omega_j \psi_{r\beta j}; \\ \frac{d\psi_{r\beta j}}{dt} = -R_{rj} i_{r\beta j} + p_j \omega_j \psi_{r\alpha j}. \end{cases}$$

Таким образом, на основе использования структуры на рис. 1 возможно описание состояния электрохимической системы при преобразовании электрической энергии в форму, удобную для поиска рациональной конфигурации сети электропитания, питающей асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ешин Е.К. Модель асинхронного электродвигателя в сети электроснабжения произвольной структуры // Вестн. КузГТУ. – 2001. – № 1. – С. 77–81.
2. Ешин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т, 2003. – 247 с.
3. Негадаев В.А. Модель магистральной структуры электроснабжения для исследования режимов работы совокупности асинхронных двигателей // Вестн. КузГТУ. – 2009. – № 1. – С. 36–43.
4. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Поступила 26.08.2012 г.

УДК 621.3.064;621.316.94

ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИЯХ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

А.Г. Гарганеев, Н.А. Михневич*, Д.В. Нестеров**, А.В. Федоров*

Томский политехнический университет

*Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики, г. Томск

**ООО «Электромашина», г. Кемерово

E-mail: garganeev@rambler.ru; fedorov.06@mail.ru*; ndv74@rambler.ru**

Представлен анализ коммутационных перенапряжений, изложена физика явлений при коммутации трансформаторов и электродвигателей с помощью вакуумных выключателей. Представлены результаты моделирования режимов коммутации, расчетов и выбора защитных цепей для шахтного высоковольтного трансформатора мощностью 1 МВт.

Ключевые слова:

Трансформатор, коммутация, перенапряжение, ограничитель, импульс, вакуумный выключатель.

Key words:

Transformer, switching, overvoltage, limiter, pulse, vacuum circuit breaker.

Надежность работы шахтного электрооборудования обеспечивается в первую очередь прочностью электрической изоляции, находящейся в условиях агрессивной среды, высокой влажности, запыленности и механических воздействий. Ввиду жестких требований, предъявляемых к габаритам шахтного электрооборудования, его изоляция, как правило, не способна выдерживать перенапряжения при их многократных повторениях [1].

Перенапряжения, возникающие на клеммах трансформаторов и электрических машин при коммутации их обмоток, могут достигать больших величин, что приводит не только к выходу из строя дорогостоящего оборудования, но и к возможному появлению потенциала на его корпусе, представляющего большую опасность для человека.

Для защиты от коммутационных перенапряжений шахтных кабельных сетей, трансформаторов и электрических машин применяются нелинейные ограничители напряжений, RC -цепи, разрядники, или их комбинации [1–3].

Согласно первому закону коммутации, ток i в отключаемой индуктивной цепи непосредственно после коммутации остается неизменным. Согласно закону электромагнитной индукции для поддержания тока i в индуктивной цепи с индуктивностью L на размыкаемых контактах создается разность потенциалов (ЭДС) $E = -L(di/dt)$ и ЭДС тем больше, чем меньше время коммутации dt . Отсюда следует, что даже при малых значениях тока,

например, холостого хода мощных трансформаторов с большой индуктивностью обмоток, при коммутациях на клеммах могут возникать опасные перенапряжения.

Основная «физика» явлений, возникающих при коммутациях нагрузок индуктивного характера — электродвигателей и трансформаторов, в принципе, одинакова [2, 4]. Особенности этих явлений заключаются в различиях параметров и режимов, а также связаны с конструкцией и принципом действия коммутатора. Так, в случае отключения трансформатора анализ переходного процесса усложняется переходом волны из обмотки в обмотку через емкостную связь между ними. При этом на характер переходных процессов влияют также собственные емкости обмоток относительно «земли», а также межвитковые емкости. При большой скорости спада тока i перенапряжения несколько ограничиваются входной емкостью C обмотки. Освобождаемая при этом магнитная энергия контура переходит в электрическую энергию конденсатора C , а коэффициент перенапряжения K можно приблизительно оценить по выражению [1]

$$K = i \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

При отключении шахтных трансформаторов перенапряжения могут достигать десятикратных значений, так как входные емкости у них на 1–2 порядка ниже, чем у трансформаторов класса