

**К.Н. Маренич, канд. техн. наук; С.В. Василец**

*(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПРИ ГРУППОВОМ ВЫБЕГЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

### **Постановка проблемы и ее связь с прикладными задачами**

Автоматическое защитное отключение шахтной участковой электросети, содержащей асинхронные двигатели (АД) потребителей, не может обеспечить мгновенное её обесточивание, а следовательно, не достаточно для обеспечения безопасности эксплуатации последней. После отключения напряжения в питающей сети роторы двигателей продолжают вращаться по инерции, генерируя в сеть ЭДС вращения. Последняя, во-первых, поддерживает во включенном состоянии контакторы пускателей, во-вторых, подпитывает аварийную точку участковой сети, что создаёт предпосылки развития аварийной ситуации.

Исследование процессов в участковой сети при одновременном выбеге нескольких двигателей (что, как правило, имеет место на практике), представляется актуальным, поскольку позволит получить более точное представление о факторах поддержания аварийного состояния электросети и в дальнейшем обосновать структуру и параметры эффективных средств подавления ЭДС вращения группы асинхронных двигателей в режиме свободного выбега при аварийном отключении напряжения на участке шахты.

### **Анализ исследований и публикаций**

Математическое описание процессов, происходящих при одновременном отключении как одного, так и группы двигателей, приводится в [1], однако при этом не учитывается изменение скорости вращения роторов АД различных типов и мощности с течением времени, что является существенным фактором. В [2, 3] указывается негативное влияние ЭДС вращения двигателя на электробезопасность эксплуатации участковых электросетей, однако не исследован процесс группового выбега двигателей потребителей с позиций воздействия на цепь утечки тока на землю в электросети. Он требует дополнительного изучения.

### **Постановка задачи**

Задачей данных исследований является обоснование параметров математической модели, позволяющей установить характер изменения напряжения в низковольтной трехфазной электрической сети при её отключении, обусловленного совместным действием ЭДС вращения АД разной мощности в режиме выбега.

## Основной материал и результаты исследований

Рассмотрению подлежит система, состоящая из  $n$  АД, включенных на общую сеть (рис. 1). При обосновании математической модели процесса реальные многополюсные двигатели представлены эквивалентными двухполюсными машинами. Параметры гибких кабелей не учитываются. До момента времени  $t_0$  защитного отключения сети автоматическим выключателем (АВ) все двигатели работали в номинальном режиме, электромагнитные и электромеханические переходные процессы в электросети и электроприводах завершены. При этом на двигатели потребителей участка подавалось напряжение сети, мгновенное значение которого для каждой фазы равно:

$$u_s = U_{smax} \sin(\omega_f t + \alpha), \quad (1)$$

где  $\omega_f = 2\pi f$  – круговая частота напряжения сети.

При условии отключения в момент времени  $t_0$  контакторов  $KM_1-KM_n$  напряжения на зажимах отдельных АД (рис. 2) определяются параметрами и условиями выбега каждого отдельного двигателя [1].

Однако реально после отключения АВ контакторы  $KM_1-KM_n$  пускателей остаются во включенном состоянии, что обуславливает электрическую связь находящихся в режиме выбега двигателей  $M_1-M_n$ . При этом имеет место принудительное уравнивание напряжений на зажимах всех АД, вследствие чего между отдельными двигателями протекают уравнивательные токи, алгебраическая сумма которых равна нулю.

Результирующий вектор напряжения в сети:

$$\bar{u}_{s1} = \bar{u}_{s2} = \dots = \bar{u}_{si} = \dots = \bar{u}_{sn} = \bar{u}_s. \quad (2)$$

Известно, что оператор Лапласа  $p$ , характеризующий изменение напряжения в сети в режиме группового выбега двигателей, может быть определен из выражения [1]:

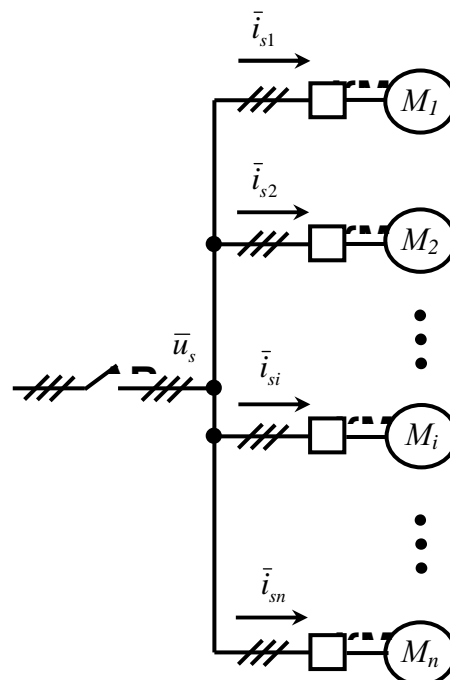


Рис.1. Схема электромеханического комплекса участка шахты

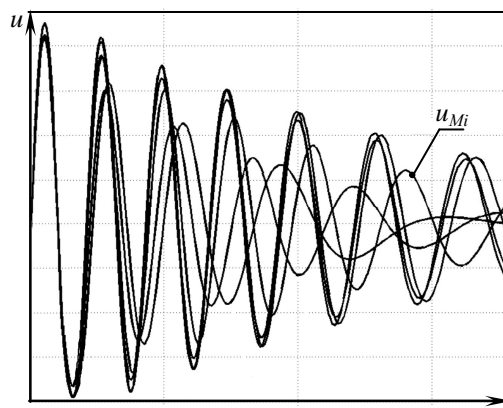


Рис.2. Диаграммы ЭДС вращения двигателей разомкнутой сети

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n a_i p_{oi}}{\sum_{i=1}^n a_i}, \quad (3)$$

где  $a_i$  – коэффициент, определяемый из соотношения:

$$a_i \approx \frac{1}{j\omega_f R_{ri}}, \quad (4)$$

$R_{ri}$  – сопротивление ротора  $i$ -го двигателя, приведенное к статору.

Величина  $p_{oi}$  характеризует затухание тока в роторе  $i$ -го двигателя:

$$p_{oi} = -R_{ri}/L_{ri} + j\omega_i, \quad (5)$$

$L_{ri}$  – полная индуктивность ротора  $i$ -го двигателя.

$\omega_i$  – частота вращения ротора  $i$ -го двигателя

Тогда в отношении  $p$  справедливо выражение:

$$p = -\frac{\sum_{i=1}^n L_{ri}^{-1}}{\sum_{i=1}^n R_{ri}^{-1}} + j \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i R_{ri}^{-1}}{\sum_{i=1}^n R_{ri}^{-1}} = p_1 + jp_2, \quad (6)$$

где  $p_1 = Re(p)$ ,  $p_2 = Im(p)$ .

Таким образом, переменное напряжение в участковой сети при групповом выбеге АД характеризуется постоянной времени  $(-1/p_1)$  и скоростью изменения  $p_2$ . Поскольку  $p_2 = \varphi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , а частоты вращения роторов с течением времени изменяются, то  $p_2$  – функция времени:  $p_2 = p_2(t)$ . Следовательно,  $p_2(t)$  является модулирующим сигналом для частоты колебаний напряжения  $\bar{u}_s$ .

Вектор напряжения, амплитуда которого уменьшается по экспоненциальному закону, учитывая частотную модуляцию, определяется соотношением:

$$\bar{u}_s = kU_{s\max} \exp\left[p_1 t + j \int_0^t p_2(t) dt\right] = f(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n), \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, равный 0,83 при номинальной нагрузке, 0,95 при холостом ходе [3].

Из (7) следует, что вектор  $\bar{u}_s$  определяется, помимо параметров схем замещения АД, частотами вращения роторов при выбеге. При определении  $\omega_i(t)$  необходимо учитывать, что уравнительные токи  $\bar{i}_{si}$ , протекающие в статорных обмотках двигателей при совместном выбеге, обуславливают

наличие электромагнитных моментов в машинах, что влияет на интенсивность замедления роторов во времени. В зависимости от направления вектора тока данные моменты в разных машинах могут иметь различный знак, соответствующий двигательному или генераторному режиму конкретного двигателя.

Для математического моделирования переходного процесса, имеющего место при групповом выбеге АД, необходимо составить систему уравнений, в которую, помимо (7), должны войти уравнения для каждого из  $n$  двигателей.

Необходимые соотношения могут быть определены из анализа схемы замещения асинхронной машины в переходных процессах (рис. 3) [1]. Уравнения процессов в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$  ( $\omega_k = 0$ ) для АД с короткозамкнутым ротором ( $\bar{u}_r = 0$ ), учитывая скольжение  $s$  (обозначения переменных приняты согласно [1]) – следующие:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + \frac{R_s}{L'_s} \bar{\Psi}_s - k_r \frac{R_s}{L'_s} \bar{\Psi}_r; \\ 0 = \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} - k_s \frac{R_r}{|s|L'_r} \bar{\Psi}_s + \left( \frac{R_r}{|s|L'_r} - j\omega \right) \bar{\Psi}_r. \end{cases} \quad (8)$$

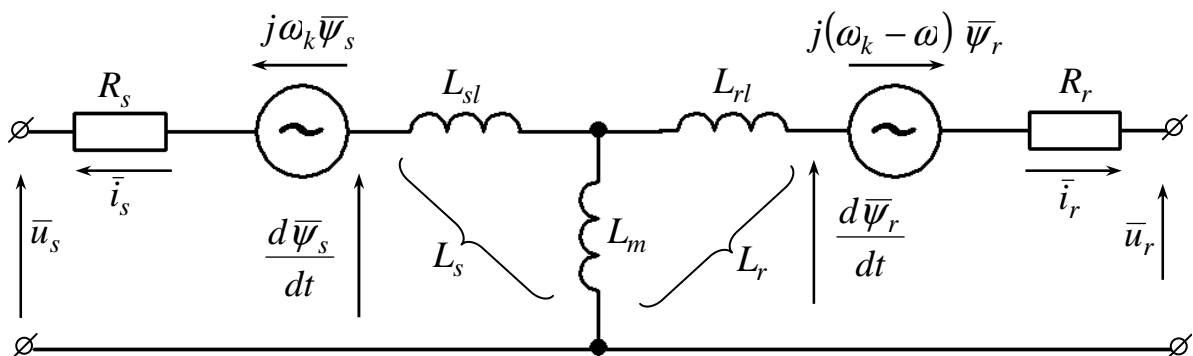


Рис.3. Схема замещения асинхронной машины в переходных режимах

Уравнения моментов АД представляются соотношениями:

$$\begin{cases} M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s L'_r} \bar{\Psi}_r \times \bar{\Psi}_s; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_{mex}. \end{cases} \quad (9)$$

Скольжение двигателя, электрически связанного с другими АД, в режиме выбега определяется выражением:

$$s_i = (p_2 - \omega_i) / p_2. \quad (10)$$

Раскладывая векторы по осям  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\bar{u}_s = u_{s\alpha} + ju_{s\beta}, \bar{\Psi}_s = \Psi_{s\alpha} + j\Psi_{s\beta}, \bar{\Psi}_r = \Psi_{r\alpha} + j\Psi_{r\beta}, \quad (11)$$

полагая

$$\frac{R_s}{L'_s} = k_1, k_r \frac{R_s}{L'_s} = k_2, k_s \frac{R_r}{L'_r} = k_3, \frac{R_r}{L'_r} = k_4, -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s L'_r} = k_5 \quad (12)$$

и приводя уравнения к явной форме Коши с учетом (9), можно записать:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - k_1\Psi_{s\alpha} + k_2\Psi_{r\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - k_1\Psi_{s\beta} + k_2\Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{k_3}{|s|}\Psi_{s\alpha} - \frac{k_4}{|s|}\Psi_{r\alpha} - \omega\Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{k_3}{|s|}\Psi_{s\beta} + \omega\Psi_{r\alpha} - \frac{k_4}{|s|}\Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_{\text{мех}}); \\ M = k_5 \operatorname{Im}\{\bar{\Psi}_r \cdot \bar{\Psi}_s\} \operatorname{sign}(s). \end{cases} \quad (13)$$

Система уравнений (13) связывает скорость вращения двигателя  $\omega$  с вектором напряжения на статоре  $\bar{u}_s$  при свободном выбеге. В общем случае для  $i$ -го двигателя решение системы (13) выражается в виде функциональной зависимости:

$$\omega_i = F_i(\bar{u}_s). \quad (14)$$

Для анализа одновременного выбега  $n$ -двигателей необходимо составить обобщенную систему уравнений, включающую зависимость (14) для каждого двигателя, подключенного к общей сети, и уравнение (7), связывающее вектор напряжения в сети со скоростями вращения роторов всех двигателей:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = f(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n); \\ \omega_1 = F_1(\bar{u}_s); \\ \omega_2 = F_2(\bar{u}_s); \\ \vdots \\ \omega_n = F_n(\bar{u}_s). \end{cases} \quad (15)$$

При заданных начальных условиях система (15) может быть решена численными методами с использованием средств вычислительной техники.

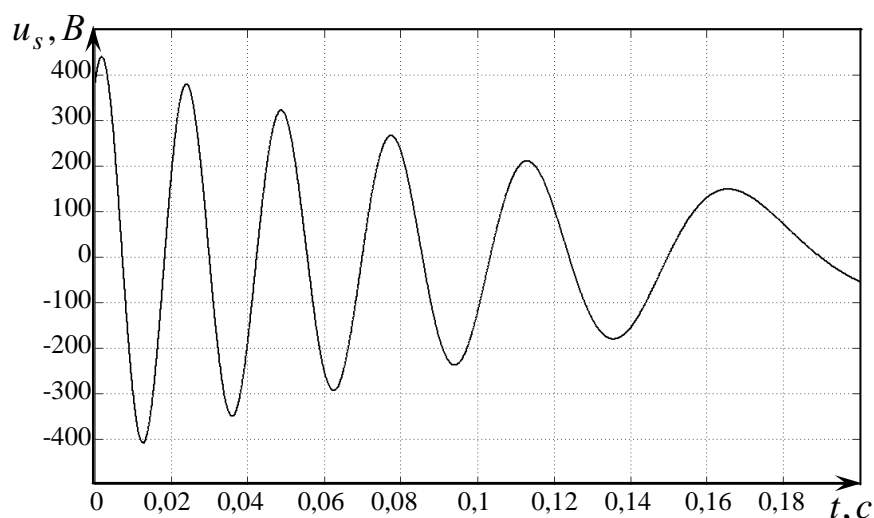


Рис.4. Расчетная диаграмма изменения напряжения в сети при выбеге двух АД мощностью 200 кВт и 30 кВт

В частности, для случая одновременного выбега двух номинально нагруженных двигателей мощностью 200 кВт и 30 кВт соответственно система (15) была решена численным методом для временного интервала  $0 \div 0,2$  с (рис. 4).

Анализ полученных

аналитических зависимостей, а также сравнение диаграмм изменения напряжений на зажимах двигателей при независимом (рис. 2) и групповом (рис. 4) выбеге АД позволили установить следующее. При независимом выбеге (все контакторы КМ отключены) напряжения на зажимах каждого двигателя определяются лишь параметрами схемы замещения и условиями выбега каждого АД в отдельности. В режиме группового выбега (АВ отключен, все контакторы КМ включены) напряжение в общей части электрической сети определяется совокупностью свойств и параметров состояния всех АД и может быть определено вследствие решения системы (15).

### Выводы и направления дальнейших исследований

Обобщенная математическая модель позволяет установить характер изменения напряжения, обусловленного совокупным действием ЭДС вращения нескольких АД, находящихся в режиме выбега, в низковольтной электрической сети.

С целью повышения точности результатов моделирования в ходе дальнейших исследований целесообразно учесть параметры гибких кабелей, соединяющих элементы рассматриваемой электротехнической системы.

### Список литературы

1. Ковач К.П., Рац. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
2. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
3. Римап Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт. – М.: Недра, 1977. – 206 с.