

Цепенюк М.И.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА СИНХРОННОГО ВРАЩЕНИЯ ПОДЪЁМА СТРЕЛЫ РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Многолетний опыт эксплуатации роторных экскаваторов на предприятиях горно-добывающей промышленности показал, что одним из слабых звеньев в данных машинах есть механизм подъёма стрелы роторного колеса (рис.1). Он часто выходит из строя из-за поломки механического синхронного вала 6 и элементов редукторов 2. Это приводит к многодневным простоям экскаваторов, что существенно отражается на производительности горно-рудных комплексов.

Поломка синхронного механического вала возникает в результате действия на него больших крутящих моментов. Но так как привод механизма строго симметричен относительно продольной оси стрелы, то действующие на синхронный вал крутящие моменты могут возникать по двум основным причинам. Первая – неодинаковые механические характеристики приводных электродвигателей, вторая – разные по величине моменты сопротивления, действующие на приводные барабаны и, соответственно, роторы двигателей. Проанализируем влияние на работу привода механизма каждого из указанных факторов в отдельности.

Если статические механические характеристики электродвигателей неодинаковые, то при равных моментах нагрузки они будут иметь разные скорости вращения роторов. Но так как схема привода механически замкнута, то в данном случае происходит выравнивание скоростей роторов двигателей за счёт перераспределения усилий в системе. Элементами, при помощи которых осуществляется перераспределение усилий, являются пары зубчатых зацеплений 4-5 и механический синхронный вал.

В качестве приводных двигателей в механизме подъёма стрелы роторных экскаваторов используются асинхронные машины с фазным ротором (например, для экскаватора СРс 2400/6600 – двигатели SH 250). Так как все четыре двигателя механизма одинаковые, то можно ожидать незначительное различие их статических механических характеристик, что, соответственно, может привести к незначительным дополнительным усилиям в синхронном вале.

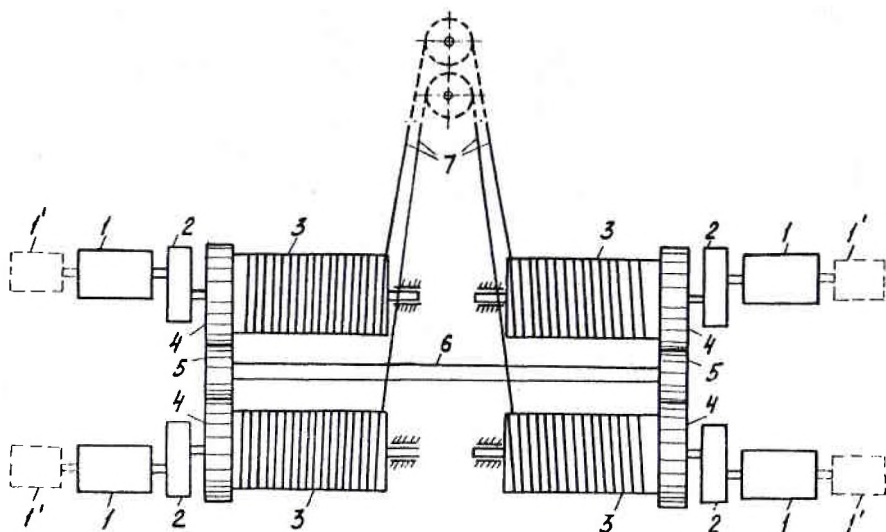


Рис. 1. Упрощённая кинематическая схема механизма подъёма стрелы роторного экскаватора СРс 2400/6600 (сплошные линии). Пунктирными линиями показаны элементы усовершенствования механизма системой уравнивающего электрического вала. Обозначения: 1-приводные двигатели; 2-редукторы; 3-барабаны; 4-венцовые шестерни; 5-паразитные шестерни; 6-механический синхронный вал; 7-канаты; 1'-уравнивательные двигатели электрического вала.

Учитывая изложенное, приходим к выводу, что основной причиной поломки синхронного вала есть разные моменты нагрузки, которые действуют на роторы приводных двигателей. Так как устранение разницы между величинами данных моментов связано с определёнными трудностями, то целесообразно для выравнивания скоростей вращения роторов приводных двигателей при разных моментах нагрузки вместо механического синхронного вала использовать электрическую синхронизацию, например, систему синхронного вращения с уравнивающим электрическим валом. Эта система есть наиболее простая и экономичная. Она образуется дополнительным оборудованием основных приводных двигателей асинхронными двигателями с контактными кольцами. При этом роторы основных и дополнительных (уравнивательных) двигателей соединены попарно между собой механически,

а обмотки роторов всех уравнильных двигателей – электрически. Дополнительные электродвигатели служат в данной системе для выравнивания нагрузки основных двигателей, а, следовательно, скоростей вращения роторов.

Для правильного подбора уравнильных электродвигателей необходимо произвести статический расчёт, а также исследование механизма при неустановившихся режимах работы. Последняя задача – более сложна, поэтому целью настоящего исследования является создание математической модели механизма синхронного вращения подъёма стрелы роторного экскаватора с уравнильным электрическим валом (УЭВ).

Система уравнений, описывающих переходные процессы в механизме синхронного вращения с ЭУВ, состоит из уравнений электродвигателей и структурных уравнений, отражающих электрическую связь машин в системе.

Уравнения асинхронного электродвигателя запишем в фазных координатах с учетом насыщения магнитной цепи [1]

$$\dot{\psi}_S = U_S - r_S i_S; \dot{\psi}_R = U_R - r_R i_R; \quad (1,2)$$

$$\dot{\Psi}_S = G_S \dot{\psi}_S + G_R \dot{\psi}_R + G_O; \Psi_R = G_{SR} \Psi_S; \quad (3,4)$$

$$i_S = \alpha_S (\psi_S - \Psi_S); i_R = \alpha_R (\psi_R - \Psi_R), \quad (5,6)$$

где $h(h = \psi_S, \psi_R, \Psi_S, \Psi_R, U_S, U_R, i_S, i_R) = \text{colon}(h_A, h_B)$; $\psi_j, \Psi_j, U_j, i_j (j = S, R)$ – матрицы-столбцы соответственно полных и рабочих потокосцеплений, напряжений, токов фаз статора ($j=S$) и ротора ($j=R$); r_S, r_R – сопротивления обмоток статора и ротора; α_S, α_R – величины, обратные к индуктивностям рассеивания соответствующих обмоток; G_S, G_R – матрицы связи рабочих потокосцеплений фаз статора с полными потокосцеплениями фаз статора и ротора; G_O – матрица-столбец э.д.с. вращения фаз статора; G_{SR} – матрица связи рабочих потокосцеплений фаз статора и ротора.

Матрицы G_S, G_R, G_O и G_{SR} имеют вид

$$G_S = \alpha_S G^*; G_R = \alpha_R G^* G_{RS}; G_O = \alpha_R G^* \dot{G}_{RS} \psi_R; G^* = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} T + g_A & g_{AB} \\ g_{BA} & T + g_B \end{bmatrix};$$

$$G_{RS} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin\left(\phi_y + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\phi_y \\ \sin\phi_y & -\sin\left(\phi_y - \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix}; G_{SR} = \begin{bmatrix} -\sin\left(\phi_y - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\phi_y \\ -\sin\phi_y & \sin\left(\phi_y + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix};$$

где $g_A = b\Psi_{SA}(2\Psi_{SA} + \Psi_{SB})$; $g_{AB} = b\Psi_{SA}(\Psi_{SA} + 2\Psi_{SB})$;

$g_{BA} = b\Psi_{SB}(2\Psi_{SA} + \Psi_{SB})$; $g_B = b\Psi_{SB}(\Psi_{SA} + 2\Psi_{SB})$.

Здесь

$$b = \frac{2}{3}(R-T)\frac{1}{\Psi_m^2}; \quad T = \frac{1}{\tau + \frac{3}{2}(\alpha_S + \alpha_R)}; \quad R = \frac{1}{\rho + \frac{3}{2}(\alpha_S + \alpha_R)}.$$

Величины τ и ρ определяются по кривой намагничивания машины

$$i_m = i_m(\Psi_m): \quad \tau = \frac{i_m}{\Psi_m}; \quad \rho = \frac{di_m}{d\Psi_m}.$$

Рабочее потокоцепление определяем по формуле

$$\Psi_m = 2\sqrt{\frac{1}{3}(\Psi_{SA}^2 + \Psi_{SA}\Psi_{SB} + \Psi_{SB}^2)}.$$

Угол поворота ротора двигателя получаем из уравнений движения

$$\dot{\omega}_y = \frac{P}{J_a}(M_a - M_l); \quad \dot{\phi}_y = \omega_y, \quad (7,8)$$

где ω_y , ϕ_y - скорость вращения ротора в эл.рад./с и угол поворота в эл.рад.; P - число пар магнитных полюсов; J_a - момент инерции ротора; M_a , M_l - электромагнитный момент двигателя и момент нагрузки. Между скоростями вращения ротора ω_y (в эл. рад./с) и ω_R (в рад./с) существует взаимосвязь: $\omega_y = P \cdot \omega_R$.

Момент двигателя определяем по формуле

$$M_\delta = 2\alpha_R P \left[\Psi_{SB} \left(\psi_{RA} \sin \left(\phi_e + \frac{2}{3}\pi \right) - \psi_{RB} \sin \phi_e \right) - \Psi_{SA} \left(\psi_{RA} \sin \phi_e - \psi_{RB} \sin \left(\phi_e - \frac{2}{3}\pi \right) \right) \right].$$

Уравнения (1)-(6), (7)-(9) в дальнейшем используются для описания переходных процессов как в основных, так и в уравнительных двигателях, ибо в исследуемой системе они однотипны. При этом каждой величине уравнений присваивается порядковый индекс, отвечающий одноименному двигателю, Конструктивное исполнение двигателей и их различие по мощности отражается в коэффициентах уравнений.

Однолинейная расчетная схема n-приводной системы ЭУВ представлена на рис. 2. Здесь нечетными индексами обозначены уравнительные двигатели, четными - основные.

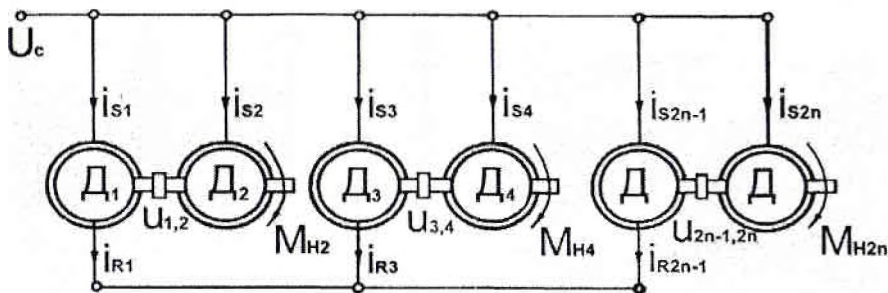


Рис. 2.

Структурные уравнения системы запишем непосредственно на основании схемы:

$$U_{sj} = U_c; U_{Rk} = U_R^*; U_{Rl} = 0; \sum_{k=1}^{2n-1} i_{Rk} = 0; \quad (10,11,12,13)$$

$$j=1,2,\dots,2n; k=1,3,\dots,2n-1; l=2,4,\dots,2n,$$

где U_c – матрица–столбец напряжений сети; U_R^* – матрица–столбец полюсных напряжений группового узла, образованного соединением обмоток роторов уравнительных машин.

На основании схемы рис. 2 можно записать

$$\frac{\omega_k}{P_k} = U_{k,k+1} \frac{\omega_{k+1}}{P_{k+1}}; k=1,3,\dots,2n-1, \quad (14)$$

где $U_{k,k+1}$ – передаточное число механической передачи между соответствующим уравнительным и основным двигателями.

Учитывая выражение (14), уравнение движения каждой отдельной приводной группы представим в виде

$$\dot{\omega}_{dl} = \frac{P_l}{J_{dl-1} \cdot U_{l-1,l}^2 + J_{dl}} (U_{Ml,l} \cdot M_{Ml} + M_{Hl} - M). \quad (15)$$

Уравнения (10)-(13), (15) совместно с $2n$ уравнениями (1)-(6), (9) и n уравнениями (8) образуют исходную систему уравнения ЭУВ. Численное интегрирование дифференциальных уравнений в таком виде затруднено, так как в уравнении (2) для уравнительных машин является неизвестным напряжение цепи ротора, т. е. величина U_R^* .

Решая совместно уравнения (2)-(4), (6), (11), (13), определим неизвестное напряжение по формуле [2]

$$U_R^* = \dot{\psi}_{R2n-1} + r_{R2n-1} \cdot i_{R2n-1}, \quad (16)$$

где

$$\dot{\psi}_{R2n-1} = Z^{-1} \left[Y + \sum_{k=1}^{2n-3} Z_k (r_{Rk} \cdot i_{Rk} - r_{R2n-1} \cdot i_{R2n-1}) \right]; \quad Z = \sum_{k=1}^{2n-1} Z_k; \quad Z_k = \alpha_{Rk} \cdot (1 - G_{SRk} \cdot G_{Rk});$$

$$Y = \sum_{k=1}^{2n-1} \alpha_{Rk} \left[G_{SRk} \left(G_{Sk} \cdot \dot{\psi}_{Sk} + G_{Ok} \right) + \dot{G}_{SRk} \cdot \dot{\psi}_{Sk} \right]; \quad k=1, 3, \dots, 2n-1.$$

Выражения (16), (10)-(12), (15) совместно с $2n$ уравнениями (1), (3)-(6), (9), $2n-1$ уравнениями (2) и n уравнениями (8) образуют математическую модель n -приводной системы ЭУВ. Уравнения модели представленные в нормальной форме Коши, поэтому их интегрирование численными методами на ЭВМ не представляет затруднений. Интегрируя данную систему уравнений при разных начальных условиях и параметрах системы, можно исследовать влияние электромагнитных переходных процессов на динамику механизмов синхронного вращения подъема стрелы роторного экскаватора с уравнительным электрическим валом.

Литература

1. Чабан В.И. Дифференциальные уравнения насыщенной неявнополюсной машины в физических координатах. – Известия вузов. Электромеханика, 1977, №4.
2. Чабан В.И., Цепенюк М.И. Математическая модель уравнительного электрического вала. - Электричество, 1981, №2, с.87-89.