

УДК 622.232.72

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

Гуляев В.Г. докт. тех. наук, проф.,

Сивокобыленко В.Ф. докт. тех. наук, проф., Жуков К.В. аспирант,
Донецкий государственный технический университет*Разработана математическая модель двухдвигательного привода исполнительных органов очистного комбайна**The mathematical model of a two-motor drive of the working tools of a cutting shearer is developed.*

На современном этапе и в будущем целесообразно применение лучших серийных очистных комбайнов (ОК) с повышенными показателями надежности и адаптивности [1]. Одним из основных способов повышения надежности ОК является снижение их динамической нагруженности и, прежде всего, электромеханической подсистемы привода исполнительных органов (ППО). Для выявления закономерностей формирования динамической нагруженности в ППО наряду с экспериментальными методами применяется имитационное математическое моделирование. Сотрудниками кафедры «Горные машины» ДонГТУ разработаны адекватные математические модели (ММ) ОК, в основном для исследования «установившихся» рабочих режимов на основе линеаризованных динамических моделей электродвигателя и моделей трансмиссии с линейными характеристиками [2,3].

Для приводных двигателей ОК по ГОСТ 16565-71 за номинальный режим работы принят повторно-кратковременный с частыми пусками (S4 условно) с ПВ 60%, с числом включений до 120 в час при коэффициенте инерции до 2,5. В структуре эксплуатационных спектров нагруженности комбайнов большое значение имеют переходные процессы – при разрушении резцами крепких включений, пусковые режимы и опрокиды двигателей, сопровождающиеся формированием высоких динамических нагрузок в ППО. Поэтому актуальна разработка соответствующей адекватной в главном ММ для изучения динамических процессов в ППО. В данной работе рассматривается формирование имитационной ММ ППО для двухдвигатель-

ного комбайна с механически связанными (или не связанными) двигателями.

ММ электромеханической системы ППО ОК соответствует расчетной схеме с пятью сосредоточенными массами (рис. 1).

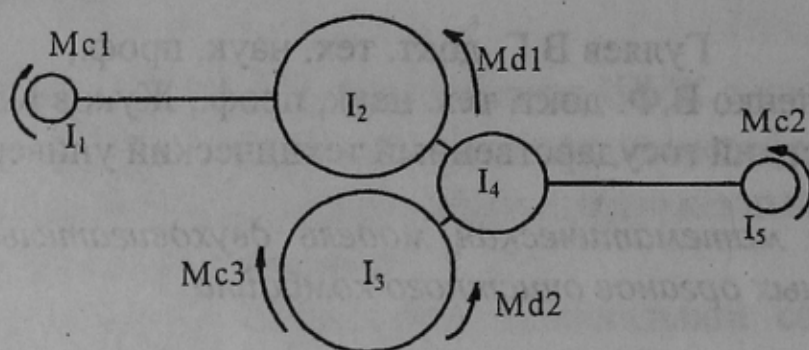


Рис. 1 Расчетная схема ППО двухдвигательного комбайна

На рис. 1 обозначены:

I_1, I_5 - приведенные к двигателю моменты инерции исполнительных органов (ИО);

I_2, I_3 - моменты инерции роторов электродвигателей (ЭД) и части трансмиссии;

I_4 - момент инерции элементов жесткой связи между ЭД.

Сосредоточенные массы соединены упруго - демпфирующими кусочно-линейными связями (рис. 2), что позволяет учитывать возможность «раскрытия» зазоров между элементами трансмиссии.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

k, n - индексы масс, соответственно, от которой и к которой передается энергия, $k, n=1...5$;

φ_k, φ_n - угловые координаты масс k и n ;

M_{kn} - упруго-демпфирующий момент на участке kn :

$$M_{kn} = \begin{cases} C_{kn}(\varphi_k - \varphi_n) + \beta_{kn}(\omega_k - \omega_n), & \text{если } (\varphi_k - \varphi_n) > 0; \\ 0, & \text{если } 0 \geq (\varphi_k - \varphi_n) \geq -\delta_{kn}; \\ C_{kn}(\varphi_k - \varphi_n + \delta_{kn}) + \beta_{kn}(\omega_k - \omega_n), & \text{если } -\delta_{kn} > (\varphi_k - \varphi_n); \end{cases} \quad (1)$$

δ_{kn} - приведенная величина зазора на участке kn ;

ω_k, ω_n - угловые скорости масс k и n ;

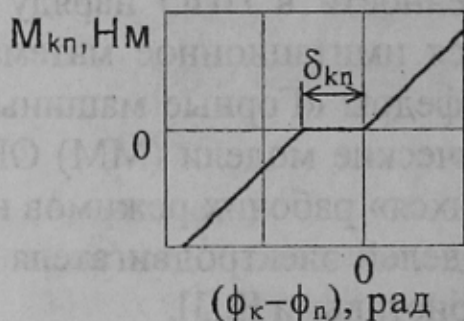


Рис. 2 Характеристика кусочно-линейной связи

C_{kn} – коэффициент жесткости участка kn ;

β_{kn} – коэффициент демпфирования участка kn .

Необходимо отметить, что приравнивание нулю C_{24} и β_{24} позволяет рассматривать режимы работы ОК при механически не связанных двигателях.

Формирование нагрузок в ППО ОК происходит в замкнутой системе «ОК – забой» и носит случайный квазистационарный характер. Наибольшее влияние на этот процесс оказывают неравномерность перемещения комбайна, силовая неуравновешенность ИО и сложные автоколебательные процессы в замкнутой системе. С учетом всего этого, моменты сопротивления, приложенные к массам ИО (M_{c1} и M_{c2}) можно представить [2]:

$$M_{c_i} = d_{ij} M_{c p_i} + d_{ij} M_{c p_i}(t - \tau_j) + d_{ij} M_{n_i} \sin(\omega_{n_i} t + \Psi_{n_i}) + d_{ij} M_{v_i} \sin(\omega_{v_i} t) \quad (2)$$

Здесь d_{ij} – коэффициент, изменяющий режим нагружения;

j – индекс, соответствующий режиму нагружения;

$d_{ij} M_{c p_i}(t - \tau_j)$ – составляющая, необходимая для задания различного темпа нарастания среднего уровня нагрузки;

$M_{c p_i}$, M_{n_i} , M_{v_i} – соответственно средний уровень и амплитуды низкочастотных (НЧ) и высокочастотных составляющих нагрузки;

Ψ_{n_i} – начальная фаза НЧ составляющих нагрузки;

i – индекс, соответствующий номеру ИО ($i=1,2$).

Момент сопротивления от подсистемы подачи (M_{c3}) можно представить [2]:

$$M_{c3} = (0.05 \dots 0.2)(M_{c p_1} + M_{c p_2}) \quad (3)$$

Динамические процессы в двигателях, в т.ч. на нелинейной части механической характеристики, с учетом общеизвестных допущений наиболее полно описывает модель, разработанная на основе фундаментальных исследований Парка-Горева [4]. Особенностью комбайновых электродвигателей с глубокопазными роторами является необходимость учета изменения параметров схемы замещения двигателя в зависимости от скольжения S , что связано с явлением вытеснения токов к поверхности стержней. На основе работы [5] произведена замена контура ротора с параметрами X_r и $R_r(S)$ эквивалентным двойным контуром с параметрами $X_{гв}$, $X_{гн}$ и $R_{гв}$, $R_{гн}$, не зависящими от S . Для учета влияния питающей сети статорные уравнения следует дополнить составляющими падений напряжений, которые в коорди-

натной системе $\alpha, \beta, 0$ с достаточной степенью точности [4] могут быть представлены:

$$\begin{aligned}\Delta U_{S\alpha} &= Rc(i_{S\alpha 1} + i_{S\alpha 2}) - Xc(i_{S\beta 1} + i_{S\beta 2}); \\ \Delta U_{S\beta} &= Rc(i_{S\beta 1} + i_{S\beta 2}) + Xc(i_{S\alpha 1} + i_{S\alpha 2});\end{aligned}\quad (4)$$

Rc и Xc – соответственно активное и реактивное сопротивления питающей сети.

С учетом изложенного выше система дифференциальных уравнений, описывающая динамические процессы в первом двигателе имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_{s\alpha 1} = \omega_c [(a_{s1} - 1)\alpha_{s1}\Psi_{s\alpha 1} + a_{r\beta 1}\alpha_{s1}\Psi_{\beta\alpha 1} + a_{r\eta 1}\alpha_{s1}\Psi_{\eta\alpha 1}] + U_m \cos(\omega_c t) - \Delta U_{S\alpha}; \\ \dot{\Psi}_{\beta\alpha 1} = \omega_c [a_{s1}\alpha_{r\beta 1}\Psi_{s\alpha 1} + (a_{r\beta 1} - 1)\alpha_{r\beta 1}\Psi_{\beta\alpha 1} + a_{r\eta 1}\alpha_{r\beta 1}\Psi_{\eta\alpha 1}] - \omega_{p1}\Psi_{\beta\beta 1}P; \\ \dot{\Psi}_{\eta\alpha 1} = \omega_c [a_{s1}\alpha_{r\eta 1}\Psi_{s\alpha 1} + a_{r\beta 1}\alpha_{r\eta 1}\Psi_{\beta\alpha 1} + (a_{r\eta 1} - 1)\alpha_{r\eta 1}\Psi_{\eta\alpha 1}] - \omega_{p1}\Psi_{\eta\beta 1}P; \\ \dot{\Psi}_{s\beta 1} = \omega_c [(a_{s1} - 1)\alpha_{s1}\Psi_{s\beta 1} + a_{r\beta 1}\alpha_{s1}\Psi_{\beta\beta 1} + a_{r\eta 1}\alpha_{s1}\Psi_{\eta\beta 1}] + U_m \sin(\omega_c t) - \Delta U_{S\beta}; \\ \dot{\Psi}_{\beta\beta 1} = \omega_c [a_{s1}\alpha_{r\beta 1}\Psi_{s\beta 1} + (a_{r\beta 1} - 1)\alpha_{r\beta 1}\Psi_{\beta\beta 1} + a_{r\eta 1}\alpha_{r\beta 1}\Psi_{\eta\beta 1}] + \omega_{p1}\Psi_{\beta\alpha 1}P; \\ \dot{\Psi}_{\eta\beta 1} = \omega_c [a_{s1}\alpha_{r\eta 1}\Psi_{s\beta 1} + a_{r\beta 1}\alpha_{r\eta 1}\Psi_{\beta\beta 1} + (a_{r\eta 1} - 1)\alpha_{r\eta 1}\Psi_{\eta\beta 1}] + \omega_{p1}\Psi_{\eta\alpha 1}P;\end{cases}\quad (5)$$

Момент двигателя:

$$Md_1 = \frac{3\omega_c P}{2X_{s1}} [\Psi_{s\beta 1}(a_{s1}\Psi_{s\alpha 1} + a_{r\beta 1}\Psi_{\beta\alpha 1} + a_{r\eta 1}\Psi_{\eta\alpha 1}) - \Psi_{s\alpha 1}(a_{s1}\Psi_{s\beta 1} + a_{r\beta 1}\Psi_{\beta\beta 1} + a_{r\eta 1}\Psi_{\eta\beta 1})];\quad (6)$$

Токи статора в проекции на оси α и β :

$$\begin{aligned}i_{s\alpha 1} &= \omega_c X_{s1}^{-1} (\Psi_{s\alpha 1} - a_{s1}\Psi_{s\alpha 1} - a_{r\beta 1}\Psi_{\beta\alpha 1} - a_{r\eta 1}\Psi_{\eta\alpha 1}); \\ i_{s\beta 1} &= \omega_c X_{s1}^{-1} (\Psi_{s\beta 1} - a_{s1}\Psi_{s\beta 1} - a_{r\beta 1}\Psi_{\beta\beta 1} - a_{r\eta 1}\Psi_{\eta\beta 1});\end{aligned}\quad (7)$$

Коэффициенты системы (5) находятся в зависимости от параметров схемы замещения двигателя:

$$\begin{aligned}\alpha_{s1} &= R_{s1}X_{s1}^{-1}; & \alpha_{r\beta 1} &= R_{r\beta 1}X_{r\beta 1}^{-1}; & \alpha_{r\eta 1} &= R_{r\eta 1}X_{r\eta 1}^{-1}; \\ X_{sr1} &= (X_{m1}^{-1} + X_{s1}^{-1} + X_{r\beta 1}^{-1} + X_{r\eta 1}^{-1})^{-1}; \\ a_{s1} &= X_{sr1}X_{s1}^{-1}; & a_{r\beta 1} &= X_{sr1}X_{r\beta 1}^{-1}; & a_{r\eta 1} &= X_{sr1}X_{r\eta 1}^{-1};\end{aligned}\quad (8)$$

$\omega_c = 314$ рад/с – угловая скорость магнитного поля;

p – число пар полюсов;

$\omega_{p1} = \omega_2$ — угловая скорость ротора первого двигателя ($\omega_{p2} = \omega_3$);

$U_m = \sqrt{2/3} U_{ном}$ — амплитуда напряжения в фазе.

Дифференциальные уравнения второго двигателя аналогичны (5)-(8) с учетом замены индекса 1 на 2.

Запишем дифференциальные уравнения движения всех сосредоточенных масс:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = I_1^{-1} (M_{12} - Mc_1); \\ \dot{\omega}_2 = I_2^{-1} (Md_1 - M_{24} - M_{12}); \\ \dot{\omega}_3 = I_3^{-1} (Md_2 - M_{34} - Mc_3); \\ \dot{\omega}_4 = I_4^{-1} (M_{34} + M_{24} - M_{45}); \\ \dot{\omega}_5 = I_5^{-1} (M_{45} - Mc_2); \end{cases} \quad (9)$$

Совместное решение системы уравнений (1)-(9) позволяет определять механические и электромагнитные нагрузки в данной электромеханической системе. При этом в векторе начальных условий общей ММ' необходимо учитывать наличие «открытых» случайных по величине зазоров на участках трансмиссии.

С использованием разработанной ММ были исследованы динамические режимы ППО комбайна 1ГШ68 с двигателями ЭКВ4УУ5 (110 кВт). Решение уравнений производилось методом Рунге-Кутты с применением ПЭВМ. Некоторые результаты моделирования приведены на рис.3,4.

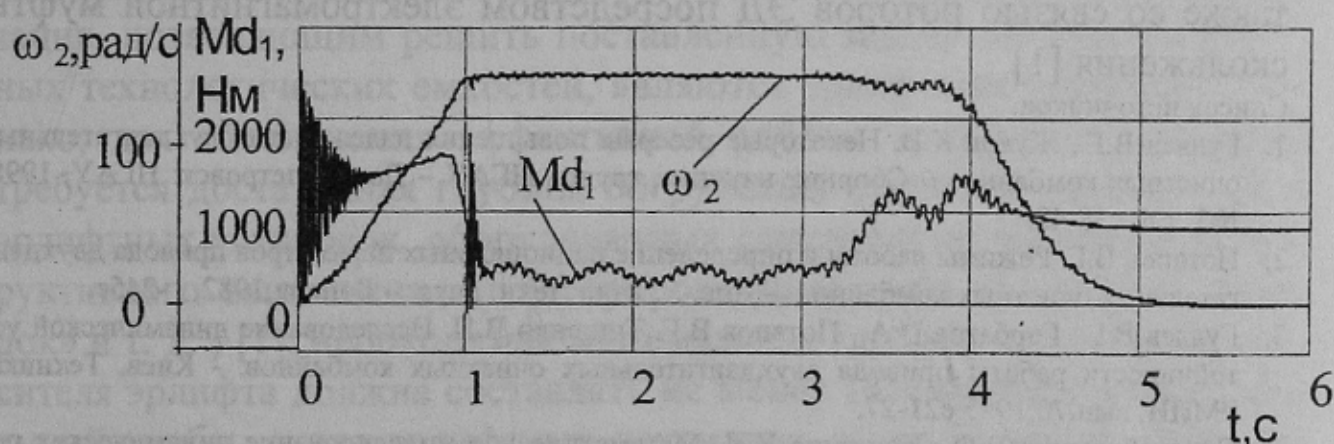


Рис. 3 Электромагнитный момент и угловая скорость ротора первого ЭД

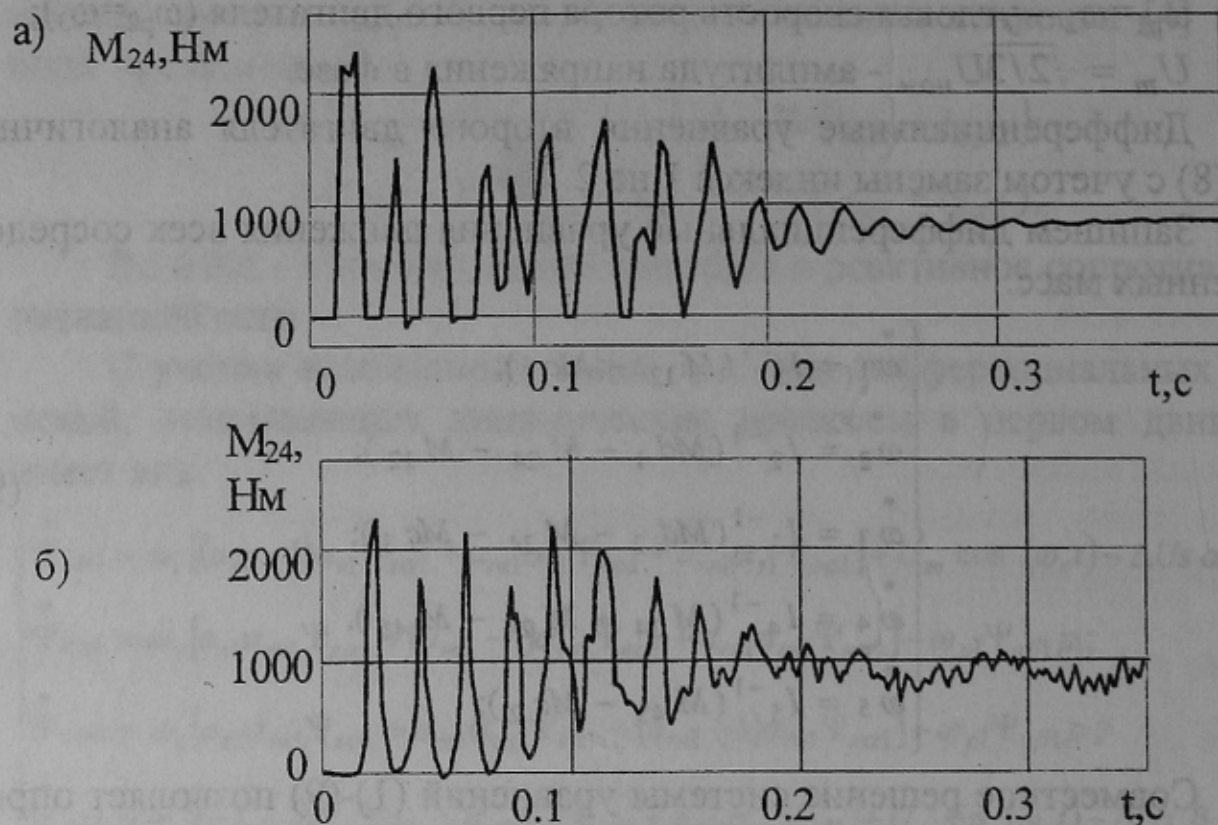


Рис. 4 Пуск без нагрузки: а – результат моделирования; б – осциллограмма натурального эксперимента

Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной ММ реальному объекту на качественном уровне, однако, необходима дальнейшая ее калибровка. С использованием разработанной модели ППО планируется создание ММ замкнутой системы «очистной комбайн – забой» с рассмотренной структурой ППО, а также со связью роторов ЭД посредством электромагнитной муфты скольжения [1].

Список источников.

1. Гуляев В.Г., Жуков К.В. Некоторые резервы повышения надежности двухдвигательных очистных комбайнов // Сборник научных трудов НГАУ – Днепропетровск: НГАУ, 1998, №3, т.6, с38-42.
2. Потапов В.Г. Режимы работы и определение рациональных параметров привода двухдвигательных очистных комбайнов. – Дис. ... канд. техн. наук. – Донецк, 1982, -245с.
3. Гуляев В.Г., Горбатов П.А., Потапов В.Г., Тищенко В.П. Исследование динамической устойчивости работы привода двухдвигательных очистных комбайнов. - Киев, Техника, РМПИ, вып.70, 1985, с21-27.
4. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование динамических режимов двухдвигательного асинхронного электропривода // Известия ВУЗов, Энергетика, 1974, №1, с43-48.
5. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Параметры и схемы замещения асинхронных электродвигателей с вытеснением тока в роторе // Электрические станции, 1976, №2, с51-54.