



УДК: 621.3.095.2

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

БОРУКЕЕВ Т.С., ЦОЙ В.Н.

Tuigun_ktu@rambler.ru

В статье рассматриваются основные уравнения электромагнитных мощностей, напряжений и моментов в электрогидравлическом комплексе с «К» статорами и роторами.

In article it is considered the main equations of electromagnetic capacities, tension and the moments in an electrohydraulic complex with "K" stator and rotors.

Введение. Широкая эксплуатация комплексов, состоящих из асинхронного двигателя и осевых гидравлических насосов в различных отраслях народного хозяйства подтвердила их существенное значение и необходимость дальнейшего развития. Известно, что качественные характеристики электродвигателей и используемых осевых насосов в комплексе недостаточно полно отвечают современным требованиям систем технического водоснабжения в различных отраслях, и в том числе для ТЭС, АЭС и др.[9-10]. Поэтому при эксплуатации различных комплексов технического водоснабжения все больше требуется искусственное приспособление как характеристик электродвигателей, так и осевых насосов к характеристикам приводимых механизмов. С этой целью для технического водоснабжения в комплексах предлагается использовать совмещенные конструктивно осевые насосы с несколькими асинхронными двигателями, что позволит отказаться в некоторых случаях от применения зубчатых редукторов, значительно увеличить диапазон регулирования частот вращения, улучшить технико-экономические показатели систем, снизить вес оборудования, уменьшить производственные площади и др. Работа такого совмещенного асинхронного двигателя и нескольких осевых насосов, конструктивно объединенных в едином корпусе, т.е. электрогидравлического комплекса (ЭГК), заключается в следующем:

В проточной части ЭГК при взаимодействии лопастных систем осевых насосов с рабочей жидкостью происходит преобразование механической энергии лопастей в механическую энергию жидкости. Учитывая наличие последовательно, механически соединенных нескольких осевых насосов внутри цилиндра ротора, при вращении первого насосного колеса возникает силовое взаимодействие лопастей с обтекающим потоком жидкости, создавая определенный напор и расход, при этом в потоке создается приращение момента количества движения жидкости. Таким образом, из насосного колеса жидкость поступает в другое насосное колесо, где момент количества движения жидкости изменяется. За счет чего при последовательном включении насосов в них увеличивается при одинаковом расходе, напор. Высокие эксплуатационные качества осевых насосов (гашение крутящих колебаний и пульсаций крутящего момента, благоприятные условия запуска ЭГК и пр.) определяются особенностями рабочего процесса и конструктивными особенностями, связанные с наличием нескольких электродвигателей и нескольких осевых насосов. ЭГК в сочетании с гидравлическими насосами представляет собой силовой комплекс, более полно удовлетворяющий требованиям к комплексам технического водоснабжения, например в ТЭС, АЭС и др.

Разработанный электрогидравлический комплекс в общем обладает следующими основными свойствами и особенностями работы:

- а) ЭГК состоит из нескольких статоров и роторов с обмотками, одного полого стального цилиндра, внутри которого жестко установлены по длине вал и несколько гидравлических лопастных насосов;
- б) на каждом тороидальном сердечнике статора и ротора по торцам уложены по две обмотки, электрически не связанные между собой, причем ротора установлены жестко на полом стальном цилиндре с осевыми насосами;
- в) позволяет в широком диапазоне регулировать мощности и моменты вращения;
- г) позволяет увеличить напор рабочей жидкости;

- д) отсутствуют электромагнитные связи между всеми статорами и роторами;
- е) осуществляет плавный пуск, разгон под нагрузкой и плавное торможение;
- ж) демпфирование различных колебаний, качаний и ударных нагрузок;
- з) значительно сокращается время разгона рабочих насосных колес и рабочей жидкости, соответственно уменьшаются ударные значения токов и моментов и др.;

Цели и методы. Составить уравнения, описывающие процесс преобразования одного вида энергии в другой с учетом электромагнитных и гидравлических явлений. Для получения основных уравнений напряжений, мощностей и моментов ЭГК комплекса воспользуемся теорией электрических цепей и технической электродинамики [1-8].

$$\begin{aligned}
 U_S^\alpha &= i_S^\alpha \cdot r_S^\alpha + L_S^\alpha \frac{di_S^\alpha}{dt} + M_{SP1} \frac{di_{P1}^\alpha}{dt} + M_{SP2} \frac{di_{P2}^\alpha}{dt} + M_{SP3} \frac{di_{P3}^\alpha}{dt} \\
 U_S^\beta &= i_S^\beta \cdot r_S^\beta + L_S^\beta \frac{di_S^\beta}{dt} + M_{SP1} \frac{di_{P1}^\beta}{dt} + M_{SP2} \frac{di_{P2}^\beta}{dt} + M_{SP3} \frac{di_{P3}^\beta}{dt} \\
 U_{P1}^\alpha &= i_{P1}^\alpha \cdot r_{P1}^\alpha + L_{P1}^\alpha \frac{di_{P1}^\alpha}{dt} + M_{SP1} \frac{di_S^\alpha}{dt} + M_{P1P2} \frac{di_{P2}^\alpha}{dt} + M_{P1P3} \frac{di_{P3}^\alpha}{dt} + \\
 &+ \omega_{P1} (L_{P1}^\alpha * i_{P1}^\beta + M_{P1P2} * i_{P2}^\beta + M_{P1S} * i_S^\beta + M_{P1P3} * i_{P3}^\beta) \\
 U_{P1}^\beta &= i_{P1}^\beta \cdot r_{P1}^\beta + L_{P1}^\beta \frac{di_{P1}^\beta}{dt} + M_{SP1} \frac{di_S^\beta}{dt} + M_{P1P2} \frac{di_{P2}^\beta}{dt} + M_{P1P3} \frac{di_{P3}^\beta}{dt} - \\
 &- \omega_{P1} (L_{P1}^\beta * i_{P1}^\alpha + M_{P1P2} * i_{P2}^\alpha + M_{P1S} * i_S^\alpha + M_{P1P3} * i_{P3}^\alpha) \\
 U_{P2}^\alpha &= i_{P2}^\alpha \cdot r_{P2}^\alpha + L_{P2}^\alpha \frac{di_{P2}^\alpha}{dt} + M_{SP2} \frac{di_S^\alpha}{dt} + M_{P2P1} \frac{di_{P1}^\alpha}{dt} + M_{P2P3} \frac{di_{P3}^\alpha}{dt} + \\
 &+ \omega_{P1} (L_{P2}^\alpha * i_{P2}^\beta + M_{P2P1} * i_{P1}^\beta + M_{P2P3} * i_{P3}^\beta + M_{P2S} * i_S^\beta) \\
 U_{P2}^\beta &= i_{P2}^\beta \cdot r_{P2}^\beta + L_{P2}^\beta \frac{di_{P2}^\beta}{dt} + M_{SP2} \frac{di_S^\beta}{dt} + M_{P2P1} \frac{di_{P1}^\beta}{dt} + M_{P2P3} \frac{di_{P3}^\beta}{dt} - \\
 &- \omega_{P1} (L_{P2}^\beta * i_{P2}^\alpha + M_{P2P1} * i_{P1}^\alpha + M_{P2S} * i_S^\alpha + M_{P2P3} * i_{P3}^\alpha) \\
 U_{P3}^\alpha &= i_{P3}^\alpha \cdot r_{P3}^\alpha + L_{P3}^\alpha \frac{di_{P3}^\alpha}{dt} + M_{SP3} \frac{di_S^\alpha}{dt} + M_{P3P1} \frac{di_{P1}^\alpha}{dt} + M_{P3P2} \frac{di_{P2}^\alpha}{dt} + \\
 &+ \omega_{P1} (L_{P3}^\alpha * i_{P3}^\beta + M_{P3S} * i_S^\beta + M_{P3P1} * i_{P1}^\beta + M_{P3P2} * i_{P2}^\beta) \\
 U_{P3}^\beta &= i_{P3}^\beta \cdot r_{P3}^\beta + L_{P3}^\beta \frac{di_{P3}^\beta}{dt} + M_{SP3} \frac{di_S^\beta}{dt} + M_{P3P1} \frac{di_{P1}^\beta}{dt} + M_{P3P2} \frac{di_{P2}^\beta}{dt} - \\
 &- \omega_{P1} (L_{P3}^\beta * i_{P3}^\alpha + M_{P3S} * i_S^\alpha + M_{P3P1} * i_{P1}^\alpha + M_{P3P2} * i_{P2}^\alpha)
 \end{aligned} \tag{1}$$

В системе уравнений напряжений (1) приняты следующие обозначения:

$r_S^\alpha, r_{P1}^\alpha, r_{P2}^\alpha, r_{P3}^\alpha, r_S^\beta, r_{P1}^\beta, r_{P2}^\beta, r_{P3}^\beta, L_S^\alpha, L_{P1}^\alpha, L_{P2}^\alpha, L_{P3}^\alpha, L_S^\beta, L_{P1}^\beta, L_{P2}^\beta, L_{P3}^\beta$ - активные сопротивления и полные индуктивности обмоток статора, первой, второй и третьей обмоток ротора, по оси α и β ;

$M_{SP1}, M_{P1P2}, M_{P1P3}, M_{SP2}, M_{P2P1}, M_{P2P3}, M_{SP3}, M_{P3P1}, M_{P3P2}$ - коэффициенты взаимоиנדуктивностей между соответствующими обмотками.

Данная система дифференциальных уравнений позволяет исследовать ЭГК как в динамическом, так и в установившихся режимах [2,4,6,8].

Заменяя $\frac{d}{dt} = j\omega$ и учитывая, что все полные индуктивности в уравнениях (1), получим после ряда преобразований уравнения напряжений в установившемся режиме:

$$L = \ell_{\sigma} + \sum_{i=1, N=1}^k M_{iN}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + jx_m \dot{I}_m \\ \frac{\dot{U}'_{P1}}{S_{P1}} &= \dot{I}'_{P1} \frac{r'_{P1}}{S_{P1}} + jx'_{P1} \dot{I}'_{P1} + jx_m \dot{I}_m \\ \frac{\dot{U}'_{P2}}{\sqrt{S_{P1}}} &= \dot{I}'_{P2} \frac{r'_{P2}}{\sqrt{S_{P1}}} + j \frac{x'_{P2}}{\sqrt{S_{P1}}} \dot{I}'_{P2} + jx_m \dot{I}_m \\ \frac{\dot{U}'_{P3}}{\sqrt{S_{P1}}} &= \dot{I}'_{P3} \frac{r'_{P3}}{\sqrt{S_{P1}}} + j \frac{x'_{P3}}{\sqrt{S_{P1}}} \dot{I}'_{P3} + jx_m \dot{I}_m \end{aligned} \quad (2)$$

где: $x_1 = \omega l_{\sigma S}$, $x'_{P1} = \omega l'_{\sigma P1}$, $x'_{P2} = \omega l'_{\sigma P2}$, $x'_{P3} = \omega l'_{\sigma P3}$, $x'_m = \omega M_m$ - индуктивные сопротивления соответствующих обмоток;

$$S_{P1} = 1 - \frac{n_p}{n_c} = 1 - v_p$$

- скольжение ротора;

$$M_{SP1} = M_{P1P2} = M_{P1P3} = M_{SP2} = M_{P2P1} = M_{P2P3} = M_{SP3} = M_{P3P1} = M_{P3P2} = M_m$$

примерные значения коэффициентов взаимной индукции между обмотками. На основе этих основных уравнений напряжений (2) определим ток в обмотке статора:

$$\dot{I}_1 = \frac{U_1}{Z_H} = \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z_m \cdot Z_a}{Z_m + Z_a} + \frac{Z_a \cdot Z_c}{Z_a + Z_c} + \frac{Z_c \cdot Z_{\phi}}{Z_c + Z_{\phi}}}; \quad (3)$$

где знаменатель данного выражения представляет следующую схему замещения (рис.1).

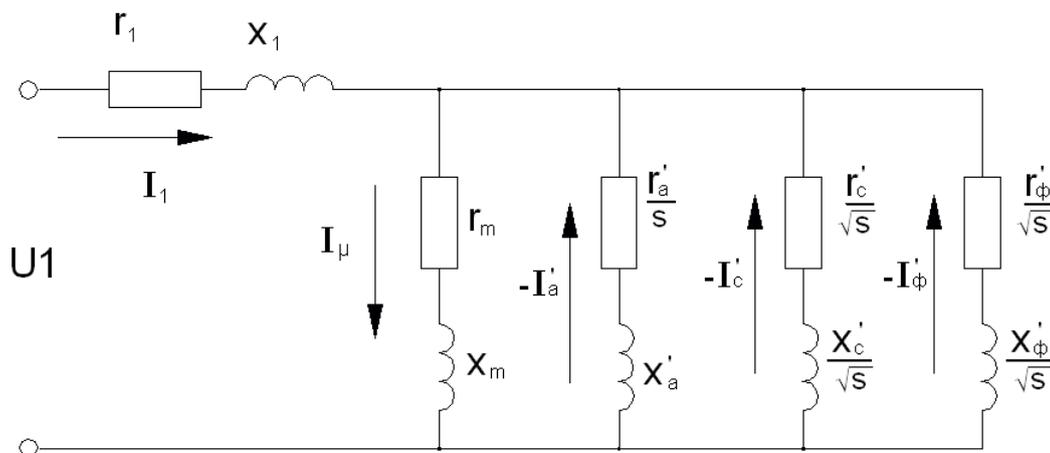


Рис.1. Электрическая Т-образная схема замещения ЭГК

Электромагнитные мощности, развиваемые соответствующими обмотками ротора ЭГК, запишутся в виде:

для алюминиевой обмотки ротора

$$P_{\text{эa}} = \frac{mU_s^2 r_a}{s} \left| \frac{[(g_s g_{\text{эс}} + b_s b_{\text{эс}}) + j(b_s g_{\text{эс}} - g_s b_{\text{эс}})]}{g_{\text{эс}}^2 + b_{\text{эс}}^2} \cdot (g_a + jb_a) \right|^2 ; \quad (4)$$

стальной обмотки ротора

$$P_{\text{эc}} = \frac{mU_s^2 r_c}{\sqrt{s}} \left| \frac{[(g_s g_{\text{эс}} + b_s b_{\text{эс}}) + j(b_s g_{\text{эс}} - g_s b_{\text{эс}})]}{g_{\text{эс}}^2 + b_{\text{эс}}^2} \cdot (g_c + jb_c) \right|^2 ; \quad (5)$$

$$P_{\text{эф}} = \frac{mU_s^2 r_\phi}{\sqrt{s}} \left| \frac{[(g_s g_{\text{эс}} + b_s b_{\text{эс}}) + j(b_s g_{\text{эс}} - g_s b_{\text{эс}})]}{g_{\text{эс}}^2 + b_{\text{эс}}^2} \cdot (g_\phi + jb_\phi) \right|^2 ; \quad (6)$$

Так как все обмотки ротора работают на один вал, то результирующая электромагнитная мощность запишется в виде:

$$P_{\text{э2}} = P_{\text{эa}} + P_{\text{эc}} + P_{\text{эф}} ; \quad (7)$$

Выражения электромагнитных моментов, развиваемых различными обмотками роторов, имеют вид для:

алюминиевой обмотки ротора

$$M_{\text{эa}} = \frac{P}{\omega} \frac{mU_s^2 r_a}{s} \left| \frac{[(g_s g_{\text{эс}} + b_s b_{\text{эс}}) + j(b_s g_{\text{эс}} - g_s b_{\text{эс}})]}{g_{\text{эс}}^2 + b_{\text{эс}}^2} \cdot (g_a + jb_a) \right|^2 ; \quad (8)$$

стальной обмотки ротора

$$M_{\text{эc}} = \frac{P}{\omega} \frac{mU_s^2 r_c}{\sqrt{s}} \left| \frac{[(g_s g_{\text{эс}} + b_s b_{\text{эс}}) + j(b_s g_{\text{эс}} - g_s b_{\text{эс}})]}{g_{\text{эс}}^2 + b_{\text{эс}}^2} \cdot (g_c + jb_c) \right|^2 ; \quad (9)$$

ферромагнитной обмотки ротора

$$M_{\text{эф}} = \frac{P}{\omega} \frac{mU_s^2 r_\phi}{\sqrt{s}} \left| \frac{[(g_s g_{\text{эс}} + b_s b_{\text{эс}}) + j(b_s g_{\text{эс}} - g_s b_{\text{эс}})]}{g_{\text{эс}}^2 + b_{\text{эс}}^2} \cdot (g_\phi + jb_\phi) \right|^2 ; \quad (10)$$

Так как все обмотки ротора работают на один вал, то результирующий электромагнитный момент запишется в виде:

$$M_{\text{э2}} = M_{\text{эa}} + M_{\text{эc}} + M_{\text{эф}} , \quad (11)$$

где эквивалентные электрические проводимости параллельных ветвей запишутся в виде для:

$$\gamma_{\text{э}} = \sqrt{g_{\text{э}}^2 + b_{\text{э}}^2} ; \quad g_{\text{э}} = g_m + g_a + g_c + g_\phi ; \quad b_{\text{э}} = b_m + b_a + b_c + b_\phi ; \quad y_{\text{э}} = g_{\text{э}} + jb_{\text{э}} ;$$

$$\omega = 2\pi f$$

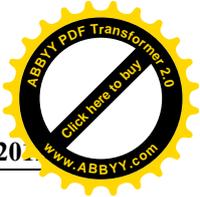
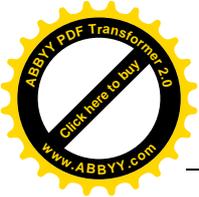
обмотки статора

$$g_s = \frac{r_s}{r_s^2 + x_s^2} ; \quad b_s = \frac{x_s}{r_s^2 + x_s^2} ; \quad y_s = g_s + jb_s$$

алюминиевой обмотки ротора

$$g_a = \frac{r_a \cdot s}{r_a^2 + s^2 x_a^2} ; \quad b_a = \frac{x_a \cdot s^2}{r_a^2 + s^2 x_a^2}$$

стальной обмотки ротора



$$g_c = \frac{r_c \sqrt{s}}{r_c^2 + x_c^2}; \quad b_c = \frac{x_c \sqrt{s}}{r_c^2 + x_c^2}$$

ферромагнитного массива ротора

$$g_\phi = \frac{r_\phi \sqrt{s}}{r_\phi^2 + x_\phi^2}; \quad b_\phi = \frac{x_\phi \sqrt{s}}{r_\phi^2 + x_\phi^2}$$

Результирующая проводимость ЭГК

$$y = \frac{y_s \cdot y_g}{y_s + y_g} = g + jb$$

По полученным данным рассчитаны и представлены соответствующие выходные показатели ЭГК в табл.1.

Для сравнения приведены технические показатели серийного асинхронного двигателя 4A355S4Y3.

Таблица 1

п/№	Выходные показатели	ЭГК	Серийный двигатель
1	P _н , кВт	250	250
2	U _н , В	380/660	380/660
3	n _с , об/мин	1500	1500
4	S _н , %	1,92	1,7
5	η, о.е.	87	94,5
6	I ₁ , А	283	252,4
7	cosφ, о.е.	0,9	0,92
8	K _п	1,52	1,03
9	K _м	2,37	2,11
10	S _{кр}	0,05	0,07
11	K _г	6,1	4,7

В таблице 2 представлены технические характеристики ЭГК с двумя последовательными осевыми насосами и четырьмя совмещенными асинхронными двигателями, каждый мощностью по 250 кВт, и показатели серийного осевого насоса ОВ5-55 с одним насосом и одним асинхронным двигателем мощностью 220 кВт.

Из представленных показателей видно, что для получения у ОВ5-55 такого же напора H_г=47,3 м, как в ЭГК, потребуются пять насосов N_д=5 общей мощностью P_г=1100 кВт.

Таблица 2

Показатели насоса	Обозначения	ЭГК	ОВ5-55
Подача, м ³ /с	Q _г	2,1	1,8
Напор, м	H _г	47,3	10
Диаметр рабочего колеса, м	D _г	0,55	0,55
Число электродвигателей	N _д	1	5
Число осевых насосов	N _н	2	5
Мощность насоса, кВт	P _г	1130	1100
Скорость вращения электродвигателя, об/мин	n _г	1500	1000



Вывод. Для разработанной конструкции ЭГК с тремя обмотками на массивном роторе получены все основные уравнения, характеризующие особенности комплекса, с использованием при расчетах программного продукта matLab. Основные выходные показатели практически в номинальном режиме получились одинаковыми, а пусковые свойства и показатели существенно улучшились.

Литература

1. Сили С. Электромеханические преобразования энергии. - М.: Энергия, 1968. – 376 с.
2. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. - М.: Энергия, 1973. – 400 с.
3. Келим Ю.М., Копылов И.П., Свечарник Д.В., Шидлович Л.Х.. Совмещенные электрические машины. - М.: Энергия, 1969. – 200 с.
4. Хенкок Е. Матричный анализ электрических машин. - М: Энергия, 1967. – 224 с.
5. Цой В.Н. Основные уравнения асинхронной гидродинамической машины с аксиальным расположением роторов. – М.: Электричество, 1990. № 10.
6. Цой В.Н. Электромеханические преобразования энергии в многообмоточных, многороторных синхронных машинах. - М: Электричество, 1988. № 2.
7. Цой В.Н. Обобщенная модель многороторного электромеханического преобразователя энергии. – М.: Электричество, 1984. № 4.
8. Жабо В.В., Уваров В.В. Гидравлика и насосы. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
9. Новодережкин Р.А. Насосные станции систем технического водоснабжения ТЭС и АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 265 с.