

УДК: 621.3.095.2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В СОВМЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ С МАССИВНЫМИ РОТОРАМИ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ТЭС И АЭС

БОРУКЕЕВ Т.С., ЦОЙ В.Н.
Tuigun_ktu@rambler.ru

В статье рассматривается процесс преобразования энергии в электрогидравлических комплексах с «К» статорами и «N» роторами.

In article it is considered process about transformation of energy in electro hydraulic complexes with “K” stator and “N” rotor.

Введение. При преобразовании энергии в любых типах электрических машин, в том числе и в совмещенных электрогидравлических комплексах (ЭГК) технического водоснабжения ТЭС и АЭС, должен четко соблюдаться закон сохранения энергии. Принципов подходов к этому вопросу много, причем каждый автор вносит свои определенные понятия, терминологию при математическом обосновании процесса преобразования энергии. Такое многообразие вносит определенные затруднения при исследовании и разработке теории преобразования энергии в новых типах электрических машин, и особенно в ЭГК, совмещенных с несколькими статорами и роторами и осевыми лопастными насосами.

Основную задачу большинство авторов видят в разработке системы уравнений, связанных с балансом мощностей или моментов, а на их основе получают распределение мощностей по отдельным видам, например, энергию, запасенную в магнитном поле, выраженную через токи и индуктивности и др.[1-5].

Цели и методы. Для описания процессов преобразования энергии в ЭГК воспользуемся понятиями, терминологией и общими системами баланса напряжений записанной в матричной форме для обобщенного электромеханического преобразователя энергии (ОЭП). [6-8] Форма записи, подход к составлению уравнений баланса мощностей зависит от конструкции ЭГК. Учитывая, что процесс преобразования одного вида энергии в другой, в ЭГК происходит не только через электромагнитные, но и гидравлические процессы, то в балансе энергии необходимо учесть и эту особенность. В отличие от процессов преобразования энергии в известных электромеханических преобразователях энергии [3]-[6-7] математическая модель ЭГК с четырьмя аксиально расположенными «К» статорами, «N» массивными роторами и «R» осевыми насосами представлена на рис.1.

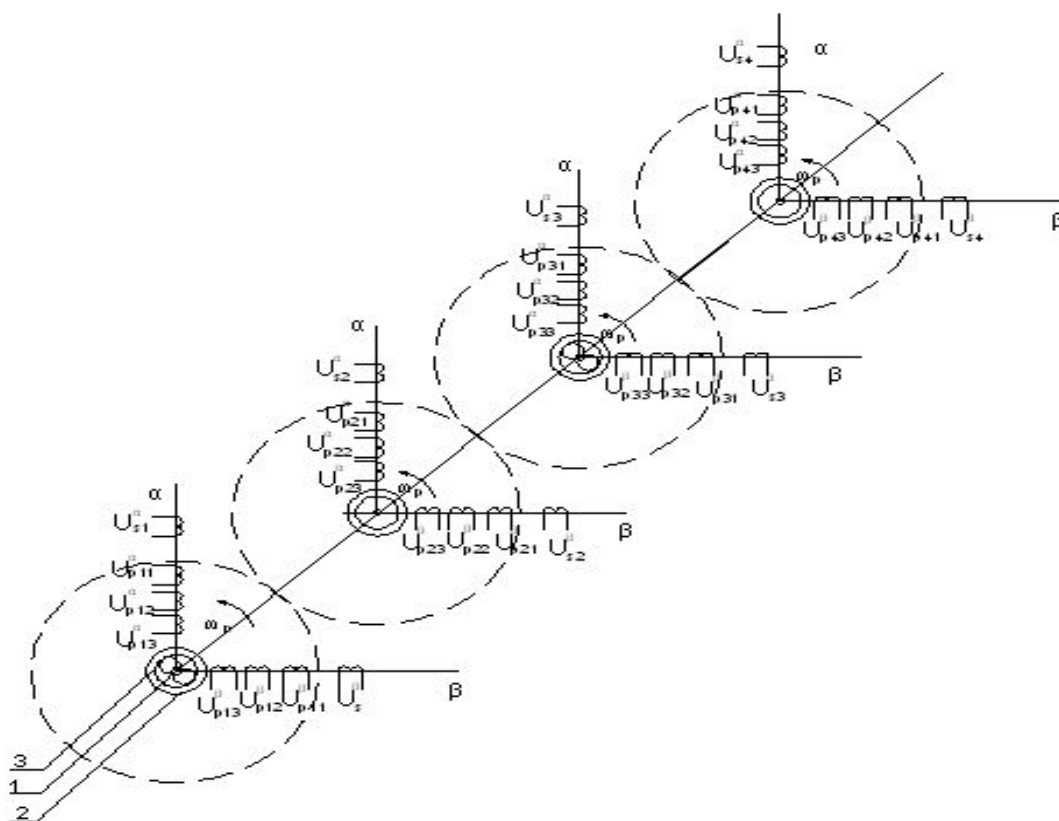


Рис.1. Модель ЭГК с 4 статорами, 4 роторами и 3-осевым насосом: s-статор; p-ротор; 1- вал; 2-полюый цилиндр; 3- осевой насос.

Учитывая, что ЭГК состоит из нескольких идентичных электрогидравлических систем, уравнение баланса напряжений в матричной форме запишем только для одной

электрогидравлической системы:

$$\|U\| = \left[\|A\| + \|B\|\bar{P} + \|C\| \right] \times \|i\|, \tag{1}$$

где столбцовые субматрицы напряжений $\|U\|$ и токов $\|i\|$, и оператор дифференцирования $\bar{P} = d/dt$ имеют вид для одной электрогидравлической системы:

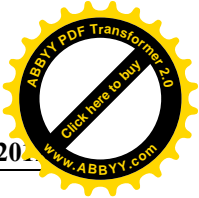
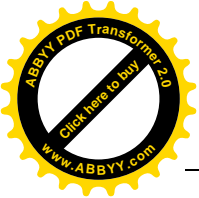
$$\|U\| = colon \left[U_{s1}^\alpha, 0, 0, 0, 0, 0, 0, U_{s1}^\beta \right],$$

$$\|i\| = colon \left[i_{s1}^\alpha, i_{p11}^\alpha, i_{p12}^\alpha, i_{p13}^\alpha, i_{p13}^\beta, i_{p12}^\beta, i_{p11}^\beta, i_{s1}^\beta \right],$$

Диагональная матрица активных сопротивлений соответствующих обмоток запишется в виде

$$\|A\| = diag \left[r_s^\alpha, r_{p11}^\alpha, r_{p12}^\alpha, r_{p13}^\alpha, r_{p13}^\beta, r_{p12}^\beta, r_{p11}^\beta, r_s^\beta \right], \tag{2}$$

остальные элементы матрицы $\|A\| = 0$. Матрица $\|B\|$ зависит от полных и взаимных индуктивностей, характеризует трансформаторные ЭДС и представлена в виде :



$$\|B\| = \begin{pmatrix} L_{S1} & M_{SP11} & M_{S1P12} & M_{s1p13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{P11s} & L_{P11} & M_{p112} & M_{p113} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{p12s} & M_{p121} & L_{P12} & M_{p113} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{p13s} & M_{p131} & M_{p132} & L_{p13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{p13} & M_{p132} & M_{p131} & M_{p13s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{p123} & L_{P12} & M_{p121} & M_{p12s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{p113} & M_{p112} & L_{p11} & M_{p11s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{S1P13} & M_{S1P12} & M_{S1P11} & L_{S1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

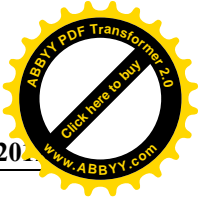
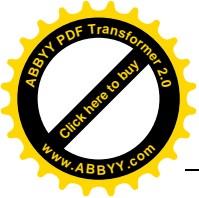
Матрица $\|C\|$ зависит от частоты вращения ротора, полных и взаимных индуктивностей соответствующих обмоток, характеризует ЭДС вращения и представлена в виде:

$$\|C\| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_p M_{P13} & \omega_p M_{P112} & \omega_p L_{P11} & \omega_p M_{P11S} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_p M_{P123} & \omega_p L_{P12} & \omega_p M_{P121} & \omega_p M_{P12S} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_p L_{P13} & \omega_p M_{P132} & \omega_p M_{P131} & \omega_p M_{P13S} \\ -\omega_p M_{P13S} & -\omega_p M_{P132} & -\omega_p M_{P131} & -\omega_p L_{P13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_p M_{P12S} & -\omega_p M_{P121} & -\omega_p L_{P12} & -\omega_p M_{P123} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_p M_{P11S} & -\omega_p L_{P11} & -\omega_p M_{P112} & -\omega_p M_{P113} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Умножение уравнения равновесия ЭДС на транспонированную матрицу токов $\|i\|_t$ позволяет получить полную мощность S на электрических зажимах одной электрической системы ЭГК.

$$S = \frac{1}{2} \|i\|_t \cdot \|U\| = \frac{1}{2} \left[\|i\|_t \cdot \|A\| \cdot \|i\| + \|i\|_t \frac{d\|B\| \cdot \|i\|}{dt} + \|i\|_t \cdot \|C\| \cdot \|i\| \right] \quad (5)$$

Выделив из матрицы $\|C\|$ угловую частоту вращения ротора $\|\omega_p\|$, получим



$$S = \frac{1}{2} \left[\|i\|_t \cdot \|A\| \cdot \|i\| + \|i\|_t \cdot \|B\| \frac{d\|i\|}{dt} + \|i\|_t \cdot \|\omega_p\| \cdot \|C\| \cdot \|i\| \right], \tag{6}$$

где $\|\omega_p\|$ – матрица угловой частоты вращения роторов

$$\|\omega_p\| = \text{colon} \left[0, \omega_p, \omega_p, \omega_p, \omega_p, \omega_p, \omega_p, 0 \right] \tag{7}$$

Если предположить, что угловая частота вращения ротора равно нулю, т.е. ЭГК неподвижна, то получим уравнение полной мощности в режиме пуска ЭГК

$$S_i = \frac{1}{2} \left[\|i_i\|_t \cdot \|A_i\| \cdot \|i_i\| + \|i_i\|_t \cdot \|B_i\| \frac{d\|i_i\|}{dt} \right], \tag{8}$$

где индекс “п” соответствует режиму работы ЭГК при

$$\omega_{p1} = \omega_{p2} = \dots = \omega_{pN} = \omega_p = \omega_A = \omega_O = 0$$

, т.к. все ротора механически связаны с одним валом.

Анализ полученного выражения показывает, что первое слагаемое представляет собой суммарную мощность, теряемую в виде тепла в активных сопротивлениях всех обмоток в указанном режиме работы.

$$P_i = \frac{1}{2} \|i_i\|_t \cdot \|A_i\| \cdot \|i_i\| \tag{9}$$

Второе же слагаемое характеризует мощность g_k , запасенную в магнитном поле, при неподвижном состоянии ЭГК

$$g_k = \frac{1}{2} \|i_k\|_t \cdot \|B_k\| \cdot \frac{d\|i_k\|}{dt} \tag{10}$$

Если теперь проанализируем уравнение баланса мощностей для одной электрогидравлической системы ЭГК и сравним с уравнением (6-10), то можем сделать следующие выводы:

1. Первое слагаемое в уравнении (5), как и в уравнении (6), представляет собой суммарную мощность, рассеиваемую в виде тепла в активных сопротивлениях всех обмоток

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{2} \|i\|_t \cdot \|A\| \cdot \|i\| \tag{11}$$

2. Так как ротора вращаются, т.е. $\omega_p \neq 0$, то оставшиеся два слагаемых представляют собой

сумму двух мощностей - мощность, запасенная магнитным полем g_m , и мощность, преобразуемая в механическую энергию P_M .

$$g_m = \frac{1}{2} \|i\|_t \cdot \|B\| \cdot \frac{d\|i\|}{dt} \tag{12}$$

$$P_M = \frac{1}{2} \|i\|_t \cdot \|\omega_p\| \cdot \|C\| \cdot \|i\|, \tag{13}$$

Матрица $\|C\|$ соответствует $\|C\|$, но без учета ω_p .

Для полного описания процессов преобразования энергии в ЭГК воспользуемся уравнением баланса моментов, записанным в форме:

$$m_{\dot{a}} = Nm_{p1} - RM_H - [RJ_H + J_{\dot{A}}] \frac{d\omega_p}{dt} - (NJ_{p1} + J_{\dot{o}} + J_{\dot{a}}) \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} - M_0, \tag{14}$$

где M_0 - статический момент трения.

А суммарная электромагнитная мощность, развиваемая тремя обмотками одного ротора m_{P1} запишется в виде:

$$m_{P1} = m_{Y1} + m_{Y2} + m_{Y3} = p [M_{S1P11} (i_{S1}^{\beta} i_{P11}^{\alpha} - i_{P11}^{\beta} i_{S1}^{\alpha}) + M_{S1P12} (i_{P12}^{\alpha} i_{S1}^{\beta} - i_{S1}^{\alpha} i_{P12}^{\beta}) + M_{S1P13} (i_{P13}^{\alpha} i_{S1}^{\beta} - i_{S1}^{\alpha} i_{P13}^{\beta})], \quad (15)$$

где m_e - момент на валу двигателя; $m_{\Sigma 1}$, $m_{\Sigma 2}$ и m_{Y3} - электромагнитные моменты, развиваемые алюминиевой и стальной к.з. обмотками и массивной частью ротора; J_{δ} ; J_{P1} ; $J_{\tilde{A}}$; J_B ; $J_{\tilde{A}}$ - моменты инерции соответственно полого цилиндра, насосных колес, жидкости, вала и ротора; M_H - гидродинамический момент, развиваемый насосным колесом, R - количество осевых насосов, N - количество роторов, " K " - количество статоров.

Если уравнение баланса моментов (14) умножить на $\omega_{\dot{a}}$, то получим следующее уравнение баланса мощности

$$\omega_{\dot{a}} m_{\dot{a}} = (N m_{P1} - R M_H) \omega_{\dot{a}} - \omega_{\dot{a}} (R J_H + J_{\tilde{A}}) \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} - \omega_{\dot{a}} (N J_{P1} + J_{\delta} + J_{\tilde{A}}) \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} - M_0 \omega_{\dot{a}} \quad (16)$$

После преобразования уравнений баланса мощностей (15) и (16) получим следующее выражение:

$$\omega_{\dot{a}} m_{P1} N = [\omega_{\dot{a}} m_{\dot{a}} + R M_H \omega_{\dot{a}}] + (R J_H + J_{\tilde{A}} + J_{\delta}) \omega_{\dot{a}} \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} + N J_{P1} \omega_{\dot{a}} \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} + M_0 \omega_{\dot{a}} \quad (17)$$

Тогда на основании закона сохранения энергии после преобразования получим полное уравнение баланса всех мощностей совмещенного ЭГК с массивным ферромагнитным ротором

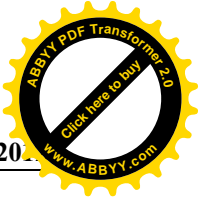
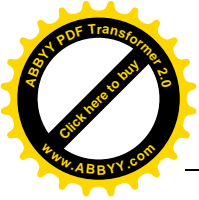
$$\begin{aligned} \hat{E}S - \omega_{\dot{a}} m_{\dot{a}} = & \left[\frac{R \rho_{\epsilon} D_A^3 \omega_{\dot{a}}^3 (R_2^2 - R_1^2)}{\pi \rho} + \|i\|_t \cdot \|A\| \cdot \|i\| \cdot K + \omega_{\dot{a}} M_0 \right] + \\ & + \left[K \|i\|_t \cdot \|B\| \frac{d\|i\|}{dt} + N \omega_{\dot{a}} J_{P1} \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} + (R J_H + J_{\tilde{A}} + J_{\delta}) \omega_{\dot{a}} \frac{d\omega_{\dot{a}}}{dt} \right] + \\ & \left[\|i\|_t \cdot \|\omega_{\dot{a}}\| \cdot \|C'\| \cdot \|i\| \right] K \end{aligned} \quad (18)$$

Для получения выражения полезной мощности, которая преобразуется в механическую мощность, можно воспользоваться последним слагаемым в уравнении баланса мощностей (18).

Таким образом, в уравнении баланса мощностей имеем: в левой части- разность между полной мощностью и мощностью на валу, а в правой части- сумму мощностей в виде: гидродинамических потерь; потерь в электрических сопротивлениях; потерь на трение; запасенной энергии в магнитном поле; кинетической энергии вращающегося ротора и конструктивных элементов гидродинамической системы, включая объем жидкости.

Так как сумма электромагнитных мощностей, развиваемая каждым ротором, равна полной электромагнитной мощности, то результирующий электромагнитный момент может быть определен по следующей формуле:

$$K \|i\|_t \cdot \|C'\| \cdot \|i\| = m_{P1} N \quad (19)$$



Полную мощность, запасенную в магнитном поле, можно представить в виде

$$Kq_m = \|i\|_t \cdot \|B\| \frac{d\|i\|}{dt} \cdot K \quad (20)$$

Механическую мощность на валу, с учетом механических и гидравлических потерь, можно определить из формулы

$$P_{\dot{a}} = K \cdot \|i\|_t \cdot \omega_p \cdot \|C\| \cdot \|i\| - ND_A \frac{\omega_a^2 (R_2^2 - R_1^2) \omega_a}{\pi} - \omega_a M_0 - (RJ_H + J_A + J_{\delta}) \omega_a \frac{d\omega_a}{dt} - NJ_p \omega_a \frac{d\omega_a}{dt} \quad (21)$$

Переход к полной активной мощности связан с законом сохранения энергии, т.е. вся энергия, полученная через электрические зажимы ЭГК, должна быть равна полной энергии, запасенной в магнитном поле, плюс полной рассеиваемой мощности в виде тепловых потерь, плюс полной динамической и механической мощности на валу.

Тогда полная активная мощность может быть представлена в виде

$$P = K \|i\|_t \cdot \|A\| \cdot \|i\| + P_{\dot{a}} \quad (22)$$

Имея выражения полных мощностей и ее составляющие, можно определить так называемый динамический коэффициент, зависящий от запасенной энергии в магнитном поле и который, в целом, характеризует энергообмен между сетью и ЭГК в зависимости от его назначения и режима работы. Исследования [1,2,5] показывают, что отличия энергетических динамических показателей, рассчитанных за один рабочий цикл, от их номинальных значений в обычных асинхронных двигателях, составляет от 3% до 21%, что свидетельствует о целесообразности введения энергетических динамических показателей: В ЭГК эти показатели можно определить по следующим формулам:

$$Kq_m = \|U\|^{-1} \cdot \|B\| \frac{d\|i\|}{dt}, \quad (23)$$

а коэффициент использования активной мощности можно представить как

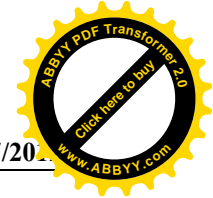
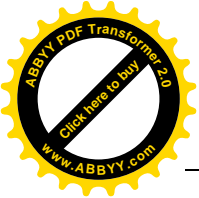
$$Kat = \frac{P_{\dot{a}}}{P} = 1 - \frac{K \|i\|_t \cdot \|A\| \cdot \|i\|}{P} \quad (24)$$

Этот коэффициент использования получен без учета магнитных потерь, расчет которых в динамике представляет сложную задачу.

Вывод. Впервые для совмещенных ЭГК на основании законов сохранения энергии с учетом особенностей конструкций, наличия лопастных гидротурбин и жидкости получены формулы баланса полных и активных мощностей, распределение запасенной, полезной и тепловых мощностей, уравнения баланса моментов. Введены и получены энергетические динамические показатели и коэффициент использования активной мощности.

Литература

1. Слим С. Электромеханические преобразования энергии. - М.: Энергия, 1968. – 376 с.
2. Хрущев В.В. Электрические микромашины автоматических устройств. - Л.: Энергия, 1976. – 384 с.
3. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. - М.: Энергия, 1973. – 400 с.
4. Келим Ю.М., Копылов И.П., Свечарник Д.В., Шизлович Л.Х. Совмещенные электрические машины. - М.: Энергия, 1969. - 200 с.
5. Хенкок Е. Матричный анализ электрических машин. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.
6. Цой В.Н. Основные уравнение асинхронной гидродинамической машины с аксиальным расположением роторов. – М.: Электричество, 1990. № 10.



7. Цой В.Н. Электромеханические преобразования энергии в многообмоточных, многороторных синхронных машинах. - М.: Электричество, 1988. №2.
8. Цой В.Н. Обобщенная модель многороторного электромеханического преобразователя энергии. - М.: Электричество, 1984. № 4.

