

УДК 629.12-8:629.12.037

В.А. Яровенко

**КРИТЕРИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ
В СРАВНИТЕЛЬНЫХ ОЦЕНКАХ ПРОЕКТОВ ГЭУ ЭЛЕКТРОХОДОВ**

Выявлены критерии динамического подобия переходных режимов гребных электродвигателей (ГЭД). Критерии охватывают все типы ГЭД. Обеспечивается возможность сравнительного анализа показателей качества работы электроходов с различными типами ГЭД.

Ключевые слова: гребные электродвигатели; критерии динамического подобия; сравнительный анализ.

Виявлені критерії динамічної подібності перехідних режимів роботи гребних електродвигунів (ГЕД). Критерії охоплюють всі типи ГЕД. Забезпечується можливість порівняльного аналізу показників якості роботи електроходів з різними типами ГЕД.

Ключові слова: гребні електродвигуни; критерії динамічної подібності; порівняльний аналіз.

Dynamic similarity criteria of rowing electric engines' transient regimes were established. These criteria encompass all types of rowing electric engines. Possibility of comparative analysis of quality indices of electric ships' operation with different types of rowing electric engines is given.

Keywords: rowing electric engines; dynamic similarity criteria; comparative analysis.

Актуальность задачи. Определяющим образом на выбор системы электродвижения оказывает тип гребного электродвигателя (ГЭД). На электроходах в качестве ГЭД применяются машины постоянного тока (ДПТ), асинхронные частотно-регулируемые (АД), синхронные (СД) и вентильные (ВЭД). В настоящее время однозначных рекомендаций по преимущественному использованию какого-либо типа ГЭД не существует. Вполне естественно, возникает задача обоснованного выбора типа гребного электродвигателя и, соответственно выбора системы электродвижения, которые в каждом конкретном случае наилучшим образом обеспечат решение поставленных перед ними задач.

Для решения такого типа задач необходимы единые критерии оценки качества работы самих электроходов, и единые критерии оценки качества работы гребной энергетической установки (с соответствующим типом гребного электродвигателя). Разработка таких критериев и является **целью настоящей работы**. Для достижения поставленной цели необ-

ходимо обобщенное математическое описание переходных и установившихся режимов работы ГЭД в составе единого судового пропульсивного комплекса. Оно должно охватывать все типы гребных электродвигателей.

Изложение основного материала. В структурной схеме гребной электрической установки (ГЭУ) электрохода ГЭД является промежуточным звеном между статическим преобразователем электроэнергии и гребным винтом (рис. 1). В общем случае входными режимными показателями для него являются напряжение U_M , ток I_M и коэффициент мощности $\cos\varphi_1$, а выходными – движущий момент M_M и угловая скорость вращения ω_M .

Анализ существующих способов представления движущего момента гребных электродвигателей дает основания принять за унифицированную форму его записи выражение [2]

$$M = K_M \Phi I \cos\varphi_2,$$

где K_M – постоянный коэффициент;

Φ и I – магнитный поток и ток двигателя;

$\cos\varphi_2$ – коэффициент мощности ротора.

При такой форме записи можно в любой момент "изъять" из структурной схемы ГЭУ электродвигатель одного типа и "вставить" в нее электродвигатель другого типа. Причем, это нисколько не повлияет на форму представления выходных параметров предыдущего (преобразователя электроэнергии) и входных параметров последующего (гребной винт) блоков структурной схемы.

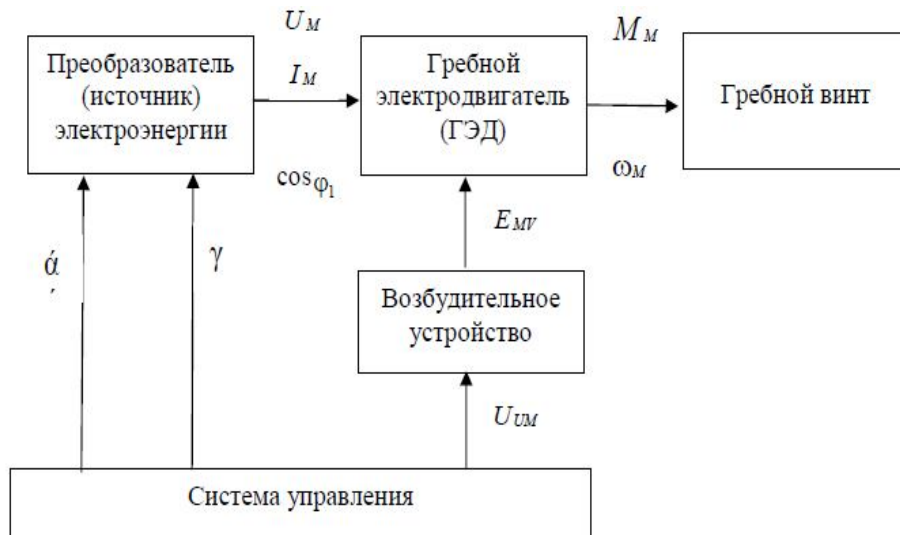


Рис. 1. Гребной электродвигатель в ГЭУ электрохода

В общем случае, математическое описание переходных и установившихся режимов работы гребного электродвигателя в составе ГЭУ имеет [2] следующий вид:

уравнение движения ГЭД

$$J_M \frac{d\omega_M}{dt} = \begin{cases} M_M - M_P - M_{TM}, & \text{для ДПТ, АД, ВЭД} \\ J_M \frac{2\pi \cdot 60}{p_M} \cdot \frac{df_M}{dt}, & \text{для СД} \end{cases}, \quad (1)$$

где J_M – приведенный к валу гребного электродвигателя момент инерции ротора, валопровода и гребного винта с присоединенными массами воды;

M_P – момент сопротивления гребного винта;

M_{TM} – суммарный момент сил трения;

f_M – частота питающего напряжения;

p_M – число пар полюсов обмотки;

движущий момент ГЭД

$$M_M = \begin{cases} K_{M1} \Phi_M I_M K_M^{in} \cos \varphi_{2M}, & \text{для ДПТ, АД, ВЭД} \\ M_P + M_{TM} + \frac{2\pi \cdot 60}{p_M} J_M \frac{df_M}{dt}, & \text{для СД} \end{cases}, \quad (2)$$

где K_{M1} – постоянный конструктивный коэффициент;

K_M^{in} – коэффициент инвертирования;

$\cos \varphi_{2M}$ – коэффициент мощности ротора двигателя.

Принцип работы синхронных гребных электродвигателей (СД) при частотном управлении отличается от принципа работы остальных типов ГЭД. Угловая скорость вращения ротора СД определяется частотой f_M питающего двигателя напряжения, т.е. электродвигатель работает без скольжения. Этот факт нашел отражение в формулах (1) и (2).

Магнитный поток ГЭД

$$\Phi_M = \begin{cases} \alpha_{M\Phi} \sum F_{MV} = \alpha_{M\Phi} W_{MV} I_{MV}, & \text{ДПТ, СД,} \\ \alpha_{M\Phi} \sum F_{MV} = \alpha_{M\Phi} \sqrt{\left[F_{MV} - K_{MD} F_{MA} \sin \left(\theta_{MK} + \delta_M^{in} + \frac{\gamma_M}{2} \right) \right]^2 + \left[K_{MQ} F_{MA} \cos \left(\theta_{MK} + \delta_M^{in} + \frac{\gamma_M}{2} \right) \right]^2}, & \text{ВЭД,} \\ \frac{U_M \gamma}{c_{1M}} \frac{\sqrt{x_{2M}^2 + r_{2M}^2} / \beta_M^2}{\sqrt{(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) \frac{r_{2M}^2}{\beta_M^2} + 2r_{1M} \alpha \frac{r_{2M}}{\beta_M}}}, & \text{АД.} \end{cases} \quad (3)$$

где $\alpha_{M\phi}$ – постоянный коэффициент; F_{MV} – магнитодвижущая сила возбуждения; W_{MV} – число витков обмотки возбуждения; I_{MV} – ток в обмотке возбуждения; K_{MD} – коэффициент формы поля поперечной реакции якоря; F_{MA} – магнитодвижущая сила реакции якоря; θ_{MK} – угол реакции якоря между векторами э.д.с. холостого хода и коммутирующей э.д.с.; δ_M^{in} – угол запаса инверторного режима; γ – относительное значение питающего двигателя напряжения; K_{MQ} – коэффициент формы поля продольной составляющей реакции якоря; α – относительная частота тока статора; U_M – напряжение на входе двигателя; c_{1M} – постоянный коэффициент; r_{2M}' – приведенное активное сопротивление ротора; x_{2M}' – приведенное реактивное сопротивление ротора; β_M – абсолютное скольжение ротора; b_M, c_M, d_M, e_M – постоянные коэффициенты частотно-управляемого ГЭД; r_{1M} – активное сопротивление статора.

Ток двигателя

$$I_M = \begin{cases} \frac{U_M - c_{EM} \Phi_M \omega_M}{r_{1M}}, \text{ДПТ,} \\ \frac{U_M - c_{EM} \Phi_M K_M^{in} \omega_M}{1,85 r_{1M}}, \text{ВЭД,} \\ \frac{\sqrt{E_{0M}^2 + U_M^2 - 2U_M E_{0M} \cos \theta_M}}{x_{Md}^2}, \text{СД,} \\ \frac{U_M \gamma}{\sqrt{(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) \frac{r_{2M}'^2}{\beta_M^2} + 2r_{1M} \alpha \frac{r_{2M}'}{\beta_M}}}, \text{АД.} \end{cases}, \quad (4)$$

где c_{EM} – постоянный коэффициент; E_{0M} – э.д.с. намагничивания синхронного ГЭД; θ_M – угол нагрузки синхронного ГЭД; x_{MD} – синхронное индуктивное сопротивление явнополюсной синхронной машины по поперечной оси.

Коэффициент инвертирования

$$K_M^{in} = \begin{cases} 1, & \text{ДПТ, АД, СД,} \\ \frac{3}{\pi} \cos \left(\delta_M^{in} + \frac{\gamma_{MK}}{2} \right) \cos \frac{\gamma_{MK}}{2}, & \text{ВЭД.} \end{cases} \quad (5)$$

Коэффициент мощности на входе двигателя

$$\cos \phi_{1M} = \begin{cases} 1, & \text{ДПТ,} \\ \cos\left(\delta_M^{in} + \gamma_{MK}/2\right), & \text{ВЭД,} \\ \cos\left(\arctg \frac{U_M - E_{0M} \cos \theta_M}{E_{0M} \sin \theta_M}\right), & \text{СД,} \\ \frac{b_M^2 \beta_M / r'_{2M} + d_M^2 r'_{2M} / \beta_M + r_{1M} \alpha}{\sqrt{\left[(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) + \left((d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) r'_{2M} / \beta_M + 2r_{1M} \alpha \right) \right]} \cdot \left(\frac{b_M \beta_M}{r'_{2M}} + \frac{d_M^2 r'_{2M}}{\beta_M} \right)}. \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициент мощности ротора

$$\cos \phi_{2M} = \begin{cases} 1, & \text{ДПТ, ВЭД, СД,} \\ \frac{r'_{2M} / \beta_M}{\sqrt{x_{2M}'^2 + r_{2M}'^2 / \beta_M^2}}, & \text{АД.} \end{cases} \quad (7)$$

Математическая модель (1) - (7) гребного электродвигателя является единой для любого из рассматриваемых двигателей.

Переменные величины формул (1)-(7) находятся следующим образом.

Э.д.с. намагничивания

$$E_{0M} = K_{EM} \omega_M [W_{MV} I_{MV}],$$

где K_{EM} - постоянный коэффициент.

Угол реакции якоря θ_{MK} между векторами э.д.с. холостого хода и коммутирующей э.д.с для неявнополюсного и явнополюсного вентильного гребного электродвигателя определяется, соответственно, по соотношениям

$$\theta_{MK} = \begin{cases} \arctg\left(\frac{F_{MA}}{F_{MV}}\right); \\ \arctg\left(\frac{K_{MQ} \cdot F_{MA}}{F_{MV}}\right), \end{cases}$$

где K_{MQ} – коэффициент формы поля продольной составляющей реакции якоря.

Угол нагрузки θ_M синхронного ГЭД находится решением уравнения

$$M_M = \frac{m_M E_{0M} U_M}{\omega_M x_{MD}} \sin \theta_M + \frac{m_M U_M^2}{2\omega_M} \left(\frac{1}{x_{MQ}} - \frac{1}{x_{MD}} \right) \sin(2\theta_M),$$

где x_{MQ} – синхронное индуктивное сопротивление явнополюсной синхронной машины по продольной оси.

Угол машинной коммутации ВЭД

$$\gamma_{MK} = \beta_M^{in} - \delta_M^{in};$$

$$\delta_M^{in} = \arccos \left(\frac{2 I_M L_{MK}}{c_{EM} \phi_M} + \cos \beta_M^{in} \right),$$

где β_M^{in} – угол управления машинной коммутации; L_{MK} – коммутационная индуктивность фазы двигателя.

Постоянные коэффициенты асинхронного частотно-управляемого ГЭД рассчитываются по известным соотношениям

$$b_M = r_{1M} (1 + \tau_{2M});$$

$$c_M = x_{1M} (1 + \tau_{2M}) + x'_{2M};$$

$$d_M = (\tau_{1M} / x_{1M}) r_{1M};$$

$$e_M = 1 + \tau_{1M}.$$

Коэффициенты рассеяния τ_{1M} и τ_{2M} рассчитываются по выражениям

$$\tau_{1M} = \frac{x_{1M}}{x_{0M}}; \quad \tau_{2M} = \frac{x'_{2M}}{x_{0M}},$$

где x_{1M} – индуктивное сопротивление статора асинхронного ГЭД; x_{0M} – индуктивное сопротивление намагничивания.

Ток в обмотке возбуждения ГЭД определяется из уравнения

$$L_{MV} \frac{d I_{MV}}{dt} + r_{MV} I_{MV} = E_{MV},$$

где L_{MV} – индуктивность обмотки возбуждения ГЭД; r_{MV} – активное сопротивление обмотки возбуждения; E_{MV} – э.д.с. на выходе возбудителя ГЭД.

В качестве возбуждающих устройств ГЭД могут применяться электромашинные или тиристорные агрегаты. В общем случае, э.д.с. на выходе возбуждателя определяется как

$$E_{MV} = K_{MV1} \Phi_{MV} + K_{MV2} I_{MV}^c,$$

где Φ_{MV} – магнитный поток возбуждателя ГЭД; I_{MV}^c – ток в обмотке само-возбуждения; K_{MV1} , K_{MV2} – постоянные коэффициенты.

Переходные процессы в первой ступени усиления возбуждателя и в обмотке самовозбуждения описывается уравнениями

$$T_{MV} \frac{d\Phi_{MV}}{dt} + \Phi_{MV} = \sum_i (K_{MVi} U_{MU_i}) = U_{MU\Sigma};$$

$$L_{MV}^c \frac{dI_{MV}^c}{dt} + r_{MV}^c I_{MV}^c = U_{MV},$$

где T_{MV} – суммарная постоянная времени электромашинного возбуждателя; U_{MU_i} – i -й управляющий сигнал; K_{MVi} – коэффициент усиления по i -му управляющему сигналу; L_{MV}^c – индуктивность обмотки самовозбуждения; R_{MV}^c – активное сопротивление обмотки самовозбуждения; U_{MV} – напряжение на выходе возбуждателя;

Для тиристорных возбуждателей э.д.с. на выходе возбуждателя определяется по уравнению

$$E_{MV} = (U_{MV})_0 K_{MV3} \sum_i (K_{MVi} U_{MU_i}) = (U_{MV})_0 \cos \alpha_{MV},$$

где $(U_{MV})_0$ – напряжение на выходе возбуждателя в режиме холостого хода; α_{MV} – угол управления возбуждателем; K_{MV3} – постоянный коэффициент.

Уравнения системы управления связывают сигналы U_{Ui} , подаваемые на входы системы управления, с напряжением на выходе соответствующего канала регулирования

В общем случае эта связь имеет следующий вид [1]:

$$A_{Kr}(t)(U_{\text{вых}})_{Kr} = K_{Kr}^{CS} \sum_i K_i^{CS} (U_{Ui} - U_{3i}),$$

где K – объект управления; r – управляемый параметр; A_{kr} – функциональная зависимость управляющих устройств регуляторов от времени, включая производную; $(U_{\text{вых}})_{Kr}$ – управляющий сигнал на входе K -го объекта по r -му параметру; K_{Kr}^{CS} – коэффициент усиления по r -му параметру управления K -го объекта; U_{Ui} – напряжения сигналов управления и корректирующих связей; U_{3i} – напряжения сравнения (отсечки); K_i^{CS} – коэффициент усиления по i -му управляющему сигналу.

Система управления может формировать в общем случае следующие управляющие сигналы.

- 1) по цепи возбуждения возбудителя гребного электродвигателя.
Результирующее напряжение на входе возбудителя ГЭД

$$U_{UM} = \sum K_{Mi}^{CS} (U_{Ui} - U_{zi}) = K_{UM0} U_{UM3} + K_{UMP} U_{UMP} - K_{UM\omega} U_{UM\omega} - K_{UMI} U_{UMI},$$

где U_{UM3} – задающее напряжение;

U_{UMP} , $U_{UM\omega}$, U_{UMI} – сигналы на выходах соответствующих усилителей

$$U_{UMP} = \frac{T_{BM}}{T_{0M}} (M_M \omega_M - P_{Mgr}) + \frac{1}{T_{0M}} \int (M_M \omega_M - P_{Mgr}) dt;$$

$$U_{UM\omega} = \frac{T_{MM}}{T_{0\omega} K_{TB} K_Y K_{Y5}} (\omega_M - \omega_{Mgr}) + \frac{2}{T_{0\omega} K_{TB} K_Y K_{05}} \int (\omega_M - \omega_{Mgr}) dt;$$

$$U_{UMI} = \frac{T_{BM}}{T_{0I}^T} (I_M - I_{Mgr}) + \frac{1}{T_{0I}^T} \int (I_M - I_{Mgr}) dt.$$

Коэффициенты усиления по задающему сигналу K_{UM0} , по мощности K_{UMP} , по угловой скорости вращения $K_{UM\omega}$, по току K_{UMI} , механическая постоянная времени T_{MM} , постоянные времени обмотки возбуждения гребного электродвигателя T_{BM} и соответствующих регуляторов T_{0M} , $T_{0\omega}$, T_{0I}^T зависят от конкретной схемы системы автоматического регулирования.

- 2) управление статическими преобразователями энергии.

Относительная частота выходного напряжения преобразователя электроэнергии

$$\alpha = \alpha_3 - K_{\alpha P} \alpha_P - K_{\alpha\omega} \alpha_\omega - K_{\alpha f} (\alpha_f - \alpha_{fp}) - K_{\alpha M} (\alpha_M - \alpha_{Mfp}) - K_{\alpha I} (\alpha_I - \alpha_{Ifp}).$$

Относительное напряжение на выходе преобразователя

$$\gamma = \gamma_3 - K_{\gamma I} (\gamma_I - \gamma_{Ifp}) - K_{\gamma U} \gamma_U$$

где α_3 – задающее значение относительной частоты; α_P – корректирующая связь по мощности ГЭД; α_ω – корректирующая связь по угловой скорости вращения ГЭД; α_f – отсечка по выходной частоте преобразователя частоты; α_M – отсечка по вращающему моменту ГЭД; α_I – отсечка по току статора ГЭД; γ_3 – задающее значение относительного напряжения пре-

образователя частоты – сигнал, являющийся функцией относительной частоты α и принятого закона управления напряжением; γ_U – корректирующая связь по напряжению ГЭД; γ_I – отсечка по току статора ГЭД.

Коэффициенты усиления $K_{\alpha P}$, $K_{\alpha \omega}$, $K_{\alpha f}$, $K_{\alpha M}$, $K_{\alpha I}$, $K_{\gamma I}$, $K_{\gamma U}$ определяются, как и при управлении по цепям возбудителей, конкретной системой управления.

В каждом конкретном случае система автоматического управления имеет свой "набор" управляющих сигналов по каждому каналу регулирования.

Представленная математическая модель переходных и установившихся режимов работы гребных электродвигателей универсальна. Она охватывает гребные электродвигатели подавляющего большинства электроходов и позволяет исследовать маневренные и установившиеся режимы их работы. Заложенные в модель принципы ее построения обеспечивают возможность проведения сравнительного анализа динамики электроходов с различными типами гребных электродвигателей и выбора наилучшего варианта.

В соответствии с поставленной задачей, для выявления критериев динамического подобия система уравнений (1)-(7) приводится к безразмерной форме. Для этого следует воспользоваться понятием приближенного динамически эквивалентного комплекса. В соответствии с ним, для перехода к безразмерной форме записи используется понятие базовых значений относительных режимных показателей. В качестве таковых (они отмечаются индексом «0») принимаются значения, соответствующие работе пропульсивного комплекса электрохода в номинальном установившемся режиме, при движении судна по свободной, глубокой, спокойной воде прямым курсом. Тогда относительные значения соответствующих режимных показателей будут определяться как отношения текущих значений к базовым. Будем обозначать их символом «0» в показателе степени (например, $M_D^0 = M_D / M_{D0}$). Относительное время T^0 определяется несколько иначе

$$T^0 = \frac{v_0}{L} t,$$

где t – реальное время.

Окончательный вариант обобщенной математической модели переходных и установившихся режимов работы гребных электродвигателей, а составе пропульсивных комплексов электроходов представлен (опуская все промежуточные выкладки) ниже.

Уравнение движения гребного электродвигателя

$$\frac{d\omega_M^0}{dT^0} = N_M (M_M^0 - K_{M1} M_P^0 - K_{MT}). \quad (8)$$

Математическое описание законов изменения основных режимных показателей электродвигателей достаточно сложное. Для облегчения восприятия математической модели запишем переведенные в безразмерные величины формулы (2)-(7) в отдельности по каждому из рассматриваемых типов гребных электродвигателей (что, ни в коей мере не, влияет на общность математического аппарата).

1. Для гребных электродвигателей постоянного тока и вентильных ГЭД:

а) вращающий момент

$$M_M^0 = \phi_M^0 I_M^0 (K_M^{in})^0; \quad (9)$$

б) магнитный поток

$$\phi_M^0 = \sqrt{C_{M1} (I_{MV}^0)^2 + C_{M2} I_{MV}^0 + C_{M3} - C_{M8} I_M^0 (C_{M9} I_{MV}^0 + C_{M10}) \cdot \sin \gamma_{KC} + C_{M11} (I_M^0)^2} \times \\ \times \sqrt{(K_{MD}^2 \sin^2 \gamma_{KC} + K_{MQ}^2 \cos^2 \gamma_{KC})}; \quad (10)$$

в) ток двигателя

$$I_M^0 = C_{M12} U_M^0 - C_{M13} \phi_M^0 (K_M^{in})^0 \omega_M^0; \quad (11)$$

г) коэффициент инвертирования

$$(K_M^{in})^0 = C_{M15} [\cos \beta_M^{in} + \cos \delta_M^{in}]; \quad (12)$$

д) суммарный угол коммутации

$$\gamma_{KC} = \left(\arctg \frac{C_{M4} I_M^0}{C_{M5} I_{MV}^0 + C_{M6}} + \frac{\beta_M^{in} + \delta_M^{in}}{2} \right); \quad (13)$$

е) коэффициент мощности на входе двигателя

$$\cos \varphi_M = \cos \left(\frac{\beta_M^{in} + \delta_M^{in}}{2} \right). \quad (14)$$

2. Для асинхронного гребного электродвигателя:

а) вращающий момент

$$M_M^0 = C_{M16} \frac{\gamma^2}{(C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M^0)} \cdot \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)}; \quad (15)$$

б) ток

$$I_M^0 = C_{M24} \gamma \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)} ; \quad (16)$$

в) коефіцієнт потужності двигателя

$$\cos \varphi_M = \frac{C_{M17} + \frac{C_{M21}}{C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0} + \frac{C_{M23}\alpha}{2(C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0)}}{\sqrt{C_{M17} + \frac{C_{M21}}{C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0}}} \cdot \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)}, \quad (17)$$

где $R_f(\alpha, \omega_M^0)$ – вспомогательная функция:

$$R_f(\alpha, \omega_M^0) = \sqrt{(C_{M17} + C_{M18}\alpha^2) + \frac{C_{M21} + C_{M22}\alpha^2}{(C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0)^2} + \frac{C_{M23}\alpha}{C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0}}. \quad (18)$$

3. Для синхронного гребного электродвигателя:

а) вращающий момент

$$M_M^0 = \frac{1}{N_M} \frac{d\alpha}{dT} + K_{M1} M_P^0 + K_{MT}; \quad (19)$$

б) ток двигателя

$$I_M^0 = \sqrt{C_{M28} (I_{MV}^0)^2 + C_{M29} \left(\frac{\gamma}{\alpha}\right)^2 - C_{M30} \frac{I_{MV}^0 \gamma}{\alpha} \cos \theta_M}; \quad (20)$$

в) коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi_M = \cos \left[\arctg \frac{C_{M31} \gamma - \alpha I_{MV}^0 \cos \theta_M}{\alpha I_{MV}^0 \sin \theta_M} \right]; \quad (21)$$

г) э.д.с. намагничивания

$$E_{0M}^0 = \alpha I_{MV}^0. \quad (22)$$

Угол нагрузки θ_M находится из решения уравнения

$$M_M^0 = C_{M26} \frac{E_{0M}^0 \gamma}{\alpha} \sin \theta_M + C_{M27} \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \sin 2\theta_M. \quad (23)$$

Уравнения процессов в возбудительном устройстве гребного электродвигателя:

а) ток в обмотке возбуждения электродвигателя

$$\frac{dI_{MV}^0}{dT^0} = N_{MV} [E_{MV}^0 - I_{MV}^0]; \quad (24)$$

б) э.д.с. на выходе возбудителя

$$E_{MV}^0 = C_{MV3} \phi_{MV}^0 + C_{MV4} (I_{MV}^c)^0; \quad (25)$$

в) магнитный поток

$$\frac{d\phi_{MV}^0}{dT^0} = N_{MV1} [U_{MU\Sigma}^0 - \phi_{MV}^0]; \quad (26)$$

г) ток в обмотке самовозбуждения

$$\frac{d(I_{MV}^c)^0}{dT^0} = N_{MV2} [E_{MV}^0 - (1 - C_{MV6}) I_{MV}^0 - C_{MV6} (I_{MV}^c)^0]. \quad (27)$$

Результирующее напряжение на входе возбудителя гребного электродвигателя

$$U_{MU\Sigma}^0 = K_{UM0} U_{UM}^0 + K_{UMP} U_{UMP}^0 - K_{UM\omega} U_{UM\omega}^0 - K_{UMI} U_{UMI}^0, \quad (28)$$

где

$$\frac{dU_{UMP}^0}{dT^0} = K_{UMP1} (M_M^0 \omega_M^0 - P_{M1}^0) + K_{UMP2} \frac{d(M_M^0 \omega_M^0 - P_{M1}^0)}{dT^0}; \quad (29)$$

$$\frac{dU_{UM\omega}^0}{dT^0} = K_{UM\omega1} (\omega_M^0 - \omega_{M1}^0) + K_{UM\omega2} \frac{d(\omega_M^0 - \omega_{M1}^0)}{dT^0}; \quad (30)$$

$$\frac{dU_{UMI}^0}{dT^0} = K_{UMI1} (I_M^0 - I_{M1}^0) + K_{UMI2} \frac{d(I_M^0 - I_{M1}^0)}{dT^0}. \quad (31)$$

В процессе преобразования уравнений (1)-(7), описывающих переходные процессы в пропульсивных комплексах в абсолютных единицах, в безразмерную форму записи, были получены критерии динамического подобия – безразмерные параметры пропульсивных комплексов.

Именно этими критериями, согласно выражениям (8)-(31), и определяются законы изменения во времени режимных показателей комплексов. Ими же определяются и показатели качества работы гребных электродвигателей на маневрах. Электродвигатели с равными значениями критериев будут иметь одинаковые законы изменения режимных показателей. Заложенные в модель принципы ее построения обеспечивают возможность проведения сравнительного анализа динамики комплексов и показателей качества работы электроходов с различными типами ГЭД.

Выводы. Таким образом, в работе выявлены критерии динамического подобия гребных электродвигателей. Они позволяют осуществлять количественную оценку поведения электродвигателей в составе судовых пропульсивных комплексов. Это дает возможность для каждого конкретного судна обоснованно выбирать тип электродвигателя с заранее прогнозируемыми показателями качества его работы.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рукавишников С.Б. Автоматизированные ГЭУ / С.Б. Рукавишников. – Л.: Судостроение, 1968. – 311 с.
2. Яровенко В.А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов / В.А. Яровенко. – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2013

Рецензент – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **В.Г. Івановський**