



УДК 62-581

А. А. Прокопов, Р. А. Кахоров, В. А. Новиков, М. П. Белов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций

Представлена разработка базы математических моделей компонентов электроприводных систем насосных агрегатов и станций с целью компоновки блоков комплексов, используемых при оптимизации систем управления агрегатами и станциями. Рассматриваются компоненты насосных агрегатов (насосы, электродвигатели, преобразователи частоты, информационно-измерительные и управляющие средства) и компоненты насосных станций (технологические компоненты связи агрегатов через входной и выходной коллекторы, компоненты связи агрегатов с магистралью, компоненты управления технологическими переменными и соотношением переменных). Разновидности компонентов представляют собой вариативную базу для принятия оптимального решения при проектировании электроприводных систем. Выполнены систематизация динамических и энергетических моделей и их табличное представление в виде алгоритмических структурных схем. Дан пример компоновки модели комплекса систем из базы моделей модулей и блоков для исследования динамических и энергетических характеристик насосной станции.

Электроприводные системы насосных агрегатов и станций, математические описания динамических и энергетических процессов, уравнения и алгоритмические структурные схемы компонентов систем управления

В настоящее время на насосных станциях (НС) существенно расширилось применение средств электроприводных систем (ЭПС) и систем автоматизации (совместно они образуют интегрированные ЭПС – ИЭПС), а также методов самонастройки и автоматической оптимизации систем и комплексов управления. Во вновь создаваемых НС все чаще применяют частотно-регулируемые электроприводы на всех насосных агрегатах (НА). Эффективность НС при их оснащении современными системами электропривода и автоматизации проявляется в трех главных составляющих: обеспечении заданных статических и динамических значений давления при произвольном изменении расхода жидкости в магистрали, сведении к минимуму аномальных явлений в виде кавитаций и гидравлических ударов; обеспечении оптимальных решений по минимизации энергозатрат; оптимизации решений по созданию комплексов управления НС и оптимизации процессов при их эксплуатации с использованием оценок показателей эффективности выполнения заданной технологии.

В статье представлена разработка базы математических моделей компонентов НА и НС с целью компоновки блоков комплексов, используемых при структурно-параметрическом синтезе и вариативной оптимизации систем управления агрегатами и станциями [1]. НА содержат следующие компоненты: насосы, электродвигатели, преобразователи частоты, информационно-измерительные и управляющие средства. Компонентами НС являются: НА, технологические компоненты связи агрегатов через входной и выходной коллекторы, компоненты связи агрегатов с магистралью, компоненты управления переменными и соотношением переменных агрегатов НА. Разновидности компонентов представлены в виде модулей и блоков, охватывающих разные решения, адаптированные к НА и НС и представляющие собой вариативную базу для принятия оптимального решения при проектировании электроприводных систем НА и НС. Алгоритмические структурные схемы этих модулей и блоков представлены в таблице [2]. Далее даны математические описания и комментарии к

отдельным компонентам рассматриваемой базы. Для простоты представления схем в таблице опущены элементы ограничения переменных.

Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов. Модели насоса (модули Н1, Н2). Изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров. Можно пересчитать характеристики насоса, используя формулы подобия в соответствии с текущей частотой вращения ω_i [2]:

$$p_i = k_p \omega_i^2; \quad Q_i = k_Q \omega_i;$$

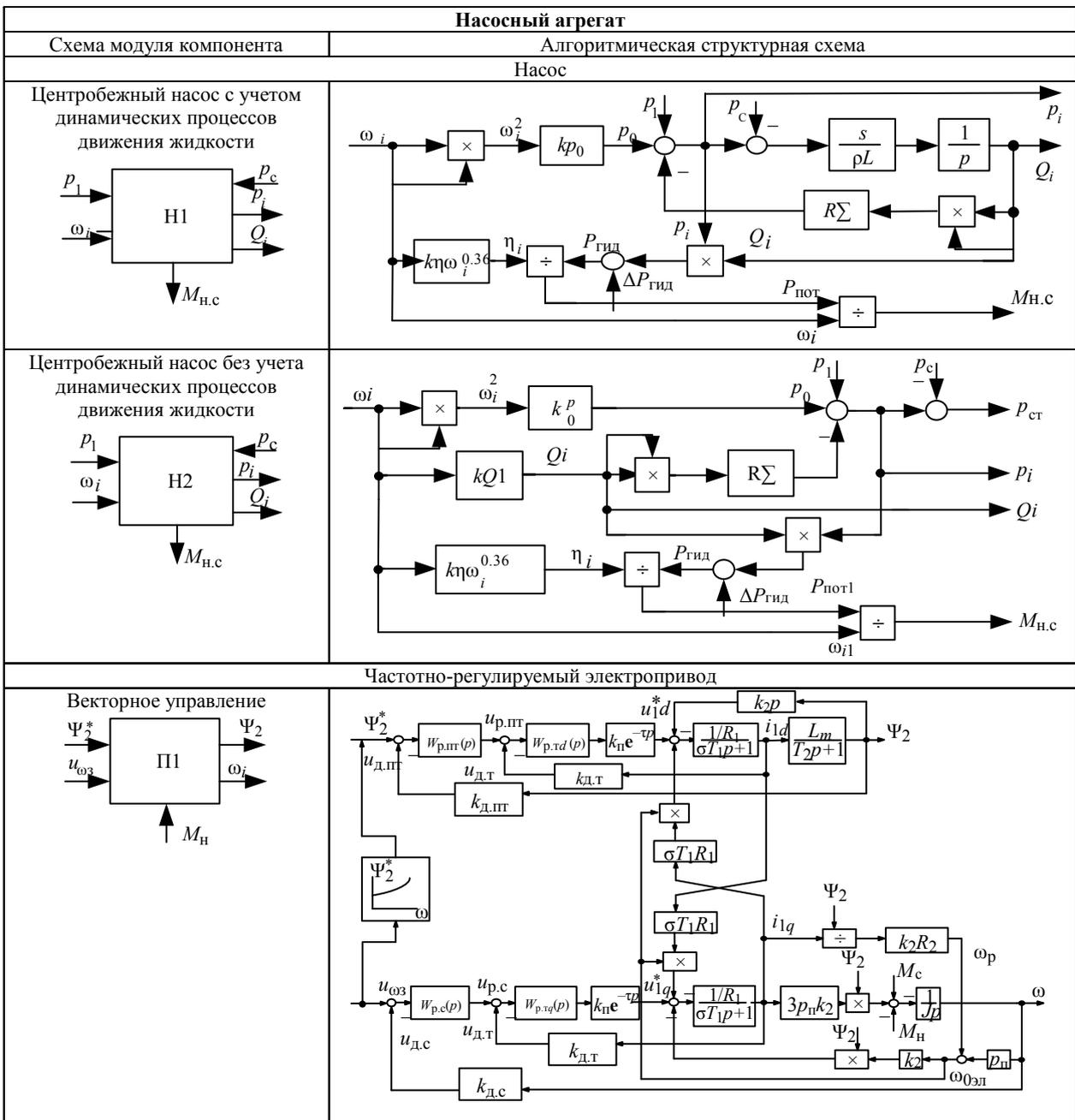
$$M_i = k_M \omega_i^2; \quad P_i = k_P \omega_i^3,$$

где $p_i, Q_i, M_i, P_i, \omega_i$ – текущие значения давления, подачи, момента статического сопротивления и нагрузки, потребляемой мощности, а также частота вращения насоса.

Для удобства исследований и расчетов в статье используется давление, связанное с напором формулой

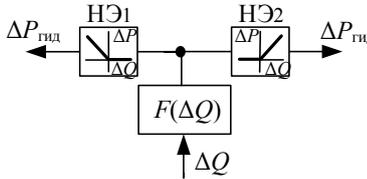
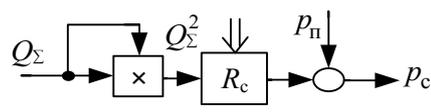
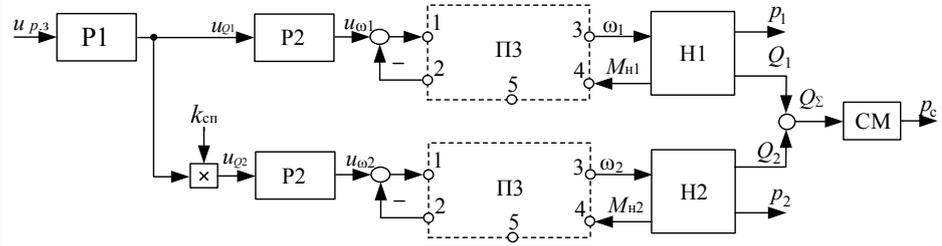
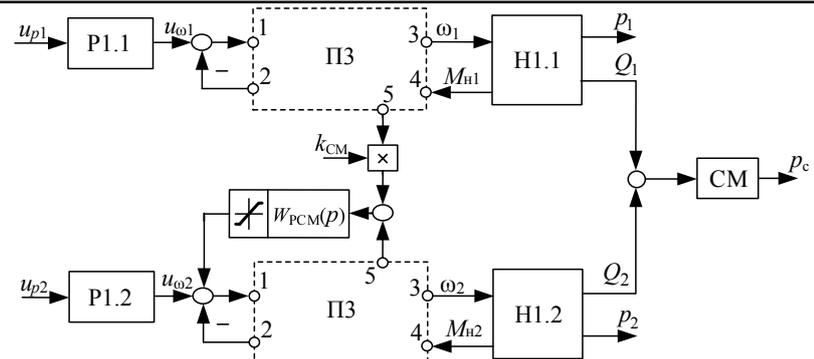
$$p_i = H_i \rho g,$$

где p_i – давление, Па; H_i – напор, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.



Насосный агрегат	
Схема модуля компонента	Алгоритмическая структурная схема
<p>Векторное управление без учета взаимосвязей переменных</p>	
<p>Векторное управление при постоянстве Ψ_2</p>	
<p>Скалярное управление</p>	
Модели энергетических процессов	
<p>Оценка потерь мощности в насосе</p>	
<p>Оценка потерь мощности в двигателе</p>	

Насосный агрегат	
Схема модуля компонента	Алгоритмическая структурная схема
<p>Оценка потерь мощности в ПЧ</p>	
<p>Оценка потерь мощности в насосном агрегате</p>	
<p>Оценка потерь энергии в насосном агрегате</p>	
Информационно-измерительные средства	
<p>Измерение давления, разности давлений, расхода</p>	
Компоненты регулирования технологических переменных	
<p>Регулирование давления</p>	
<p>Регулирование подачи</p>	

Насосная станция с параллельно работающими агрегатами	
Схема модуля компонента	Алгоритмическая структурная схема
Компоненты связи агрегатов через входной и выходной коллекторы	
Связь потерь мощности с разностью подач СА  $\Delta Q \rightarrow F(\Delta Q) \rightarrow \Delta P_{гид}$	
Компоненты связи агрегатов с магистралью	
Связь переменных НС с расходом в магистрали $Q_{\Sigma} \rightarrow CM \rightarrow P_c$	
Компоненты управления переменными и соотношением переменных агрегатов насосной станции	
Управление соотношением подач агрегатов $u_{p1} \rightarrow СП1 \rightarrow \begin{matrix} Q_1 \\ Q_2 \\ p_1 \\ p_2 \end{matrix}$	
Управление соотношением моментов нагрузок электроприводов $\begin{matrix} u_{p1} \\ u_{p2} \end{matrix} \rightarrow СП2 \rightarrow \begin{matrix} Q_1 \\ Q_2 \\ p_1 \\ p_2 \end{matrix}$	

Напорная характеристика насоса, работающего с переменной частотой вращения рабочего колеса, описывается уравнением квадратичной параболы

$$p_i = p_0 \left(\frac{\omega_i}{\omega_{ном}} \right)^2 - R_{нас} Q_i^2,$$

где p_0 – давление насоса при нулевой подаче жидкости; $R_{нас} = \frac{p_0 - p_{ном}}{Q_{ном}^2}$ – гидравлическое сопротивление насоса, определяемое из номинальных данных и давления холостого хода, $p_{ном}$ и $Q_{ном}$ – номинальное давление и номинальная подача насоса; Q_i – текущая подача насоса.

По давлению нулевой подачи p_0 при номинальной скорости $\omega_{ном}$ находится давление нулевой подачи для любой скорости вращения вала:

$$p_{0i} = \frac{p_0}{2} - \omega_i^2 \quad \text{или} \quad p_{0i} = k_{p0} \omega_i^2.$$

Характеристика сети (магистрали) при наличии противодавления определяется по формуле

$$p_c = p_{п} + R_c Q_c^2,$$

где p_c – текущее давление в сети; $p_{п}$ – противо-давление, обусловленное разностью геодезических отметок наивысшей точки подачи жидкости и места установки насоса; $R_c = \frac{p_{ном} - p_{п}}{Q_{ном}^2}$ – гидравлическое сопротивление сети; Q_c – текущий расход жидкости в сети.

Формулы подобия непригодны для определения рабочих параметров центробежных насосов, работающих с противодавлением, когда подача

зависит не только от частоты вращения, но также от отношения p_{Π}/p_0 . Совместное решение уравнений насоса и сети относительно текущей подачи Q_i дает зависимость изменения подачи насоса от его угловой частоты вращения при наличии противодействия в следующем виде [2]:

$$Q_i = Q_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{(\omega_i/\omega_{\text{НОМ}})^2 - (p_{\Pi}/p_0)}{1 - (p_{\Pi}/p_0)}}.$$

Приведенные формулы определяют статику гидравлических процессов. При описании динамических процессов движения жидкости в гидравлической части насосного агрегата ее рассматривают как несжимаемое тело плотностью ρ , занимающее объем в некотором фиктивном трубопроводе с постоянным сечением s и длиной L . В этом случае увеличение или снижение подачи будет характеризоваться увеличением или уменьшением скорости движения жидкости под действием сил, определяемых действующими давлениями и гидравлическим сопротивлением гидравлической части насосного агрегата:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{s}{\rho L} [p_1 + p_0 - p_c - (R_{\Sigma} Q_i^2)],$$

где p_1 – давление во всасывающем трубопроводе насоса; R_{Σ} – суммарное гидравлическое сопротивление насоса с частью напорного трубопровода.

Гидравлическая (полезная) мощность насоса и мощность, потребляемая насосом, определяются выражениями

$$P_{\text{гид}} = p_i Q_i; P_{\text{пот}} = \frac{p_i Q_i}{\eta_i},$$

где η_i – КПД насоса.

Изменение КПД в зависимости от угловой скорости насоса определяется с помощью формулы Муди, преобразованной для насосов:

$$\eta_i = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{НОМ}}}{(\omega_i/\omega_{\text{НОМ}})^{0.36}}, \text{ или } \eta_i = k_{\eta} \omega_i^{0.36},$$

где $\eta_{\text{НОМ}}$ – номинальный КПД насоса.

Момент сопротивления насоса определяется выражением

$$M_{\text{н.с}} = \frac{P_{\text{пот}}}{\omega_i} = \frac{p_i Q_i}{\omega_i \eta_i}.$$

Модели электропривода с асинхронным двигателем при частотном управлении (модули П1–П4). Система «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД) с векторным управлением. Без учета магнитного насыщения динамическая модель электропривода с векторным управлением формируется при рассмотрении переменных в системе координат d – q и ориентации оси d по вектору потокосцепления ротора. Используются уравнения для составляющих тока статора i_{1d} и i_{1q} , потокосцепления ротора ψ_2 и частоты роторной ЭДС ω_p :

$$\begin{aligned} i_{1d} &= \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1d} - R_1 i_{1d} + \omega_{0\text{эл}} \sigma T R_1 i_{1q} - k_2 p \psi_2); \\ i_{1q} &= \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1q} - R_1 i_{1q} + \omega_{0\text{эл}} \sigma T R_1 i_{1d} - k_2 \omega_{0\text{эл}} \psi_2); \\ \psi_2 &= \frac{1}{T_2 p} (L_m i_{1d} - \psi_2); \omega_p = \frac{k_2 R_2 i_{1q}}{\psi_2}. \end{aligned}$$

Формула электромагнитного момента двигателя и равенство частот вращения:

$$M_d = \frac{3}{2} p_{\Pi} k_2 \psi_2 i_{1q}; \omega_{0\text{эл}} = \omega_{\text{п}} + \omega_p.$$

Основное уравнение механики:

$$p\omega = \frac{M_d - M_{\text{н}} - M_{\text{с}}}{J},$$

где $M_{\text{н}}$, $M_{\text{с}}$, J – моменты нагрузки сопротивления двигателя, инерции привода НА.

Полное описание системы дано в [3], [4].

Регуляторы в контурах регулирования выполняются традиционными. Функциональный модуль связи задания потокосцепления с заданием частоты вращения соответствует нагрузочной характеристике НА и устанавливает энергосберегающий режим с помощью снижения реактивной составляющей тока статора.

Система с векторным управлением без учета перекрестных взаимосвязей контуров регулирования активных и реактивных токов. Поскольку в НА электромагнитные процессы обладают малыми временами переходных процессов по сравнению с механическими процессами, можно пренебречь обратной связью по ЭДС двигателя и перекрестными связями в контурах регулирования потокосцепления и частоты вращения двигателя. Вследствие этого уравнения для составляющих тока статора i_{1d} и i_{1q} потокосцепления ротора ψ_2 примут вид

$$i_{1d} = \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1d} - R_1 i_{1d} - k_2 p \psi_2);$$

$$i_{1q} = \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1q} - R_1 i_{1q}).$$

Остальные уравнения остаются прежними.

Система с векторным управлением при постоянстве ψ_2 . Уравнения ЭП при $\psi_2 = \text{const}$ остаются неизменными, для простоты можно их рассмотреть в упрощенном виде, сводя к известным описаниям ЭП постоянного тока. Обобщенная модель однозонного регулирования скорости привода в виде структурной схемы приведено в ячейке строки ПЗ таблицы и приняты обозначения: $R_{zi} = R_1$; $T_{zi} = \sigma T_1$; $c_{mi} = (3/2) p_{\pi} k_2 \psi_2$; $c'_{mi} = p_{\pi} k_2 \psi_2$, где R_1 – сопротивление статора; σ – коэффициент рассеяния двигателя ($\sigma = 1 - L_m^2 / (L_1 L_2)$); T_1 – постоянная времени статора; $k_2 = L_m / L_2$ – коэффициент; p_{π} – число пар полюсов.

Система со скалярным управлением. Для частотного регулирования в режимах скалярного управления без обратной связи по скорости НА модель электродвигателя на рабочем участке механической характеристики может быть представлена в виде структурной схемы, приведенной в таблице (модуль П4). Электромагнитные процессы формирования электромагнитного момента АД представляются звеном первого порядка с передаточной функцией

$$W_d(p) = \frac{M_d(p)}{\omega_0 - \omega(p)} = \frac{h_U}{1 + T_2' p},$$

где $T_2' = \frac{x_{кр}}{r_2} = \frac{1}{\omega_{ном} s_{кр}}$ – электромагнитная по-

стоянная времени двигателя; $h_U = \frac{2M_{кр}}{\omega_{ном} s_{кр}} =$

$= 2M_{кр} T_2'$ – модуль жесткости линеаризованной

механической характеристики; $s_{кр} = \frac{R_2}{x_{кр}}$ – кри-

тическое скольжение; $\omega_0 = \frac{2\pi f_{зад}}{p_{\pi}}$.

Такой вариант привода – самый простой, но и в этом случае возможна реализация энергосберегающего режима путем реализации соответствующей вольт-частотной характеристики с учетом нагрузочной характеристики НА.

Модели энергетических процессов (модули Э1–Э5). Оценка потерь мощности в насосе. Все потери в насосе можно представить в виде суммы трех видов потерь: объемных, гидравлических и механических.

Объемные потери (потери на циркуляцию) $\Delta N_{об}$ возникают вследствие внутренних протечек через зазоры между корпусом машины и рабочим колесом. Жидкость получает возможность протекать из области с большим давлением в область с меньшим давлением.

Гидравлические потери связаны с трением жидкости о внутренние направляющие поверхности и рабочие колеса насоса. Общие гидравлические потери в насосах $\Delta N_{гид}$ оцениваются как потери по длине h_L , и ударные вдоль всей проточной части насоса h_y равны

$$\Delta N_{гид} = h_L + h_y.$$

Механические потери связаны с вращением вала и рабочих колес насоса, что проявляется в трении в подшипниках, уплотнениях насоса и нерабочих поверхностей колес о перекачиваемую воду. Механические потери $\Delta N_{мех}$ образуются вне проточной части насоса и могут определяться как сумма:

$$\Delta N_{мех} = \Delta N_{диск} + \Delta N_{п+y},$$

где $\Delta N_{диск}$ – дисковые потери; $\Delta N_{п+y}$ – потери механического трения в подшипниках и уплотнениях.

Потери механического трения в насосах невелики и составляют обычно 0.1–0.2 % от затрачиваемой мощности. Более существенны дисковые потери, которые возникают в результате трения наружных поверхностей дисков рабочего колеса о жидкость, находящуюся между корпусом и колесом.

Таким образом, КПД насоса представляет собой произведение объемного ($\eta_{об} = 0.96...0.98$), гидравлического ($\eta_{гид} = 0.90...0.96$) и механического КПД ($\eta_{мех} = 0.84...0.94$), характеризующих отдельные виды потерь энергии в насосе:

$$\eta_{нас} = \eta_{об} \eta_{гид} \eta_{мех}.$$

Мощность гидравлических потерь в насосе будет определяться долей потерь давления (Δp); мощность механических потерь – долей потерь мощности ($\Delta N_{мех}$); мощность объемных потерь ($\Delta N_{об}$) – объемом перетекаемой воды (ΔQ) и

выражаться отношением полезной мощности, сообщаемой перекачиваемой воде, к мощности на валу двигателя насоса (P_1).

Тогда

$$\eta_{\text{гид}} = \frac{P_1 - \Delta N_{\text{гид}}}{P_1} = \frac{(p_i - \Delta p) Q_i}{p_i Q_i} = \frac{p_i - \Delta p}{p_i} = 1 - \frac{\Delta p}{p_i};$$

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{P_1 - \Delta N_{\text{мех}}}{P_1} = 1 - \frac{\Delta N_{\text{мех}}}{P_1};$$

$$\eta_{\text{об}} = \frac{P_1 - \Delta N_{\text{об}}}{P_1} = \frac{p_i(Q_i - \Delta Q)}{p_i Q_i} = \frac{Q_i - \Delta Q}{Q_i} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q_i},$$

вследствие чего получим выражение для полезной (гидравлической) мощности ($P_{\text{гид}}$) в выражении КПД насоса:

$$P_{\text{гид}} = p_i Q_i \left(1 - \frac{\Delta N_{\text{гид}}}{P_1} \right) \left(1 - \frac{\Delta N_{\text{об}}}{P_1} \right) \left(1 - \frac{\Delta N_{\text{мех}}}{P_1} \right).$$

Потери мощности насоса

$$\Delta P_{\text{нас}} = P_{\text{пот}} - P_{\text{гид}},$$

где $P_{\text{гид}} = p_i Q_i$ – гидравлическая (полезная)

мощность насоса; $P_{\text{пот}} = \frac{p_i Q_i}{\eta_{\text{ин}}}$ – потребляемая

мощность насоса.

Оценка потерь мощности в двигателе [5]. Потери мощности двигателя при номинальном режиме

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{М}} + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}.$$

Магнитные потери в двигателе

$$\Delta P_{\text{М}} = \Delta P_{\text{М.с1}} + \Delta P_{\text{М.з1}},$$

где $\Delta P_{\text{М.с1}}, \Delta P_{\text{М.з1}}$ – магнитные потери в спинке и в зубцах статора:

$$\Delta P_{\text{М.с1}} = k_{\text{м.т}} P_{1.0/50} (f/50)^{2+\beta} B_{\text{с1}}^2 G_{\text{с1}},$$

$$\Delta P_{\text{М.з1}} = k_{\text{м.т}} P_{1.0/50} (f/50)^{2+\beta} B_{\text{з1}}^2 G_{\text{з1}}.$$

Электрические потери в обмотке статора

$$\Delta P_{\text{эл1}} = m_1 I_1^2 R_1.$$

Электрические потери в обмотке ротора

$$\Delta P_{\text{эл2}} = m_2 I_2^2 R_2.$$

Механические потери

$$\Delta P_{\text{мех}} = k_{\text{Г}} (n_1 10^{-3})^2 (D_{\text{лн}} 10^{-2})^4.$$

Добавочные потери

$$\Delta P_{\text{доб}} = 0.005 P_{\text{ном}} \left(\frac{P_1}{P_{\text{ном}}} \right)^2,$$

где $P_1 = P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{мех}}$ – полная механическая мощность на валу двигателя, $P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - \Delta P_{\text{эл1}}$ – механическая мощность на валу двигателя или $P_{\text{эм}} = \omega_0 M_{\text{ном}}, P_{\text{мех}} = \omega_{\text{ном}} M_{\text{ном}}$.

Оценка потерь мощности в преобразователе частоты. Потери ПЧ

$$\Delta P_{\text{ПЧ}} = \Delta P_{\text{В}} + \Delta P_{\text{АИ}},$$

где $\Delta P_{\text{В}} = \Delta P_{\text{р.вх}} + \Delta P_{\text{В}}$ – потери выпрямителя, где $\Delta P_{\text{В}}$ – потери мощности в вентилях выпрямителя.

Электрические потери мощности во входных коммутирующих реакторах ПЧ

$$\Delta P_{\text{р.вх}} = 18 \frac{R_{\text{р.вх}}}{\pi^2} \frac{P_{\text{вх}}^2}{U_d^2},$$

где $U_d = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{2/\pi}}$ – среднее значение выпрямленного

напряжения; $P_{\text{вх}} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$ – мощность, потребляемая двигателем от ПЧ.

Потери мощности в вентилях выпрямителя

$$\Delta P_{\text{В}} = 2 \left(\frac{U_{\text{гр}}}{U_d^2} P_{\text{вх}} + R_{\text{д.диф}} \frac{P_{\text{вх}}^2}{U_d^2} \right),$$

где $R_{\text{д.диф}}$ – дифференциальное сопротивление диода для прямого тока; $U_{\text{гр}}$ – граничное, или прямое, падение напряжения на диоде.

Потери мощности в автономном инверторе напряжения

$$\Delta P_{\text{АИ}} = \Delta P_{\text{кл}} + \Delta P_{\text{р.вых}} = \frac{1}{2\pi} U_{\text{гр.пр}} + U_{\text{гр.обр}} I_1 +$$

$$+ \frac{3}{4} R_{\text{кл.пр.диф}} + R_{\text{кл.обр.диф}} I_1^2 +$$

$$+ \frac{U_{\text{гр.пр}} - U_{\text{гр.обр}}}{U_d} P_{\text{вх}} +$$

$$+ \frac{8R_{\text{кл.пр.диф}} - R_{\text{кл.обр.диф}}}{3\pi U_d} I_1 P_{\text{вх}} + \left(\frac{3}{2} R_{\text{р.вых}} I_1^2 \right),$$

где $R_{\text{р.вых}}$ – активное сопротивление обмотки реактора; $U_{\text{гр.пр}}, U_{\text{гр.обр}}$ – граничные падения напряжения при прямом и обратном токах; $R_{\text{кл.пр.диф}}, R_{\text{кл.обр.диф}}$ – дифференциальные сопротивления ключа инвертора при прямом и обратном токах; I_1 – модуль результирующего вектора тока статорной обмотки АД.

Оценка потерь мощности в активном выпрямителе аналогична оценке в автономном инверторе напряжения.

Оценка общих потерь мощности в насосном агрегате. Потери мощности НА

$$\Delta P_{\text{НА}} = \Delta P_{\text{нас}} + \Delta P_{\text{дв}} + \Delta P_{\text{ПЧ}}.$$

Оценка потерь энергии в насосном агрегате. Потребляемая в течение периода T энергия (W , Дж) НА описывается формулой $W_{\text{НА}} = \int_0^T P_{\text{НА}}(t) dt$. В частном случае, когда на отдель-

ных интервалах t_i мощность НА постоянна и равна $P_{\text{НА}}$, формула энергии НА приобретает вид

$$W_{\text{НА}} = \sum_{i=1}^m P_{i\text{НА}} t_i,$$

где m – число интервалов.

Потери энергии НА определяются следующим образом:

$$\Delta W_{\text{НА}} = \int_0^T \Delta P_{\text{НА}}(t) dt.$$

Модели информационно-измерительных средств. Косвенная оценка частоты вращения электропривода. При ограниченном диапазоне регулирования частоты вращения ротора в системах векторного управления приводами НА не применяют энкодеры, а оценку этой переменной выполняют в соответствии с уравнением

$$\omega = (\omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{р}}) / p_{\text{п}},$$

отдельные составляющие которого раскрыты ранее. Часть структурной схемы, относящаяся к этой оценке, раскрыта в модуле П1.

Измерение давления, разности давлений и подачи (расхода) (модуль И). Измерения выполняют с использованием соответствующих датчиков. Датчики давления преобразуют абсолютное давление, разности давлений в нормированный аналоговый выходной сигнал 0...10 В или 4...20 мА, в цифровой сигнал, например в стандарте HART-протокола либо по интерфейсу RS-485 с протоколом обмена данными ModbusRTU. Датчик расхода выполняет линейное преобразование объемного расхода жидкости, протекающей в трубопроводе, в сигналы, аналогичные сигналам датчика давления. В зависимости от типа выходного сигнала расходомеры подразделяются на датчики с линейным выходным сигналом по току, напряжению или частоте и датчики с цифровым сигналом.

Как динамические элементы сложных систем управления, эти датчики можно представить в упрощенном виде инерционными звеньями с передаточными функциями:

$$W_{\text{д.д}}(p) = \frac{k_{\text{д.д}}}{T_{\text{д.д}} p + 1}; \quad W_{\text{д.р.д}}(p) = \frac{k_{\text{д.р.д}}}{T_{\text{д.р.д}} p + 1};$$

$$W_{\text{д.п}}(p) = \frac{k_{\text{д.п}}}{T_{\text{д.п}} p + 1},$$

где $k_{\text{д.д}} = \frac{u_{3.p}}{p_i}$; $k_{\text{д.р.д}} = \frac{u_{3.\Delta p}}{p_1 - p_2}$; $k_{\text{д.п}} = \frac{u_{3.Q}}{Q_i}$ – коэффициенты датчиков давления, разности давлений и подачи.

Математические модели электроприводных систем насосных станций с параллельно работающими агрегатами.

Компоненты связи агрегатов через входной и выходной коллекторы и с магистралью. Связь потерь мощности с разностью подач НА (модуль СА). В [6] показано, что наиболее энергозатратны установки с двумя параллельно работающими насосами, один из которых работает с максимальной подачей, а другой – с регулируемой минимальной подачей. При этом начиная с малых значений подач гидравлические потери резко возрастают с уменьшением частоты вращения рабочего колеса регулируемого насоса. Они могут достигать 18 % общей мощности установки. Потери электроэнергии могут превышать 25 % суммарной электрической мощности работающих насосов с учетом снижения КПД регулируемого насоса при его минимальной подаче. При увеличении количества насосов до трех или четырех (один из которых – регулируемый) гидравлические потери в НС существенно снижаются. Рациональное соотношение регулируемых и нерегулируемых насосов составляет 1/3...1/2. Аналогичные выводы о потерях электроэнергии присутствуют и в [7]. Примерная зависимость увеличения гидравлических потерь от разности подач параллельно работающих НА может быть представлена параболой. При двух или трех одновременно работающих регулируемых НА эта зависимость будет симметричной по отношению к смежным НА с нелинейными элементами, показанными в модуле СА.

Связь переменных НС с расходом в магистрали (модуль СМ). Под связью переменных НС с расходом в магистрали понимается зависимость между давлением и расходом жидкости. При от-

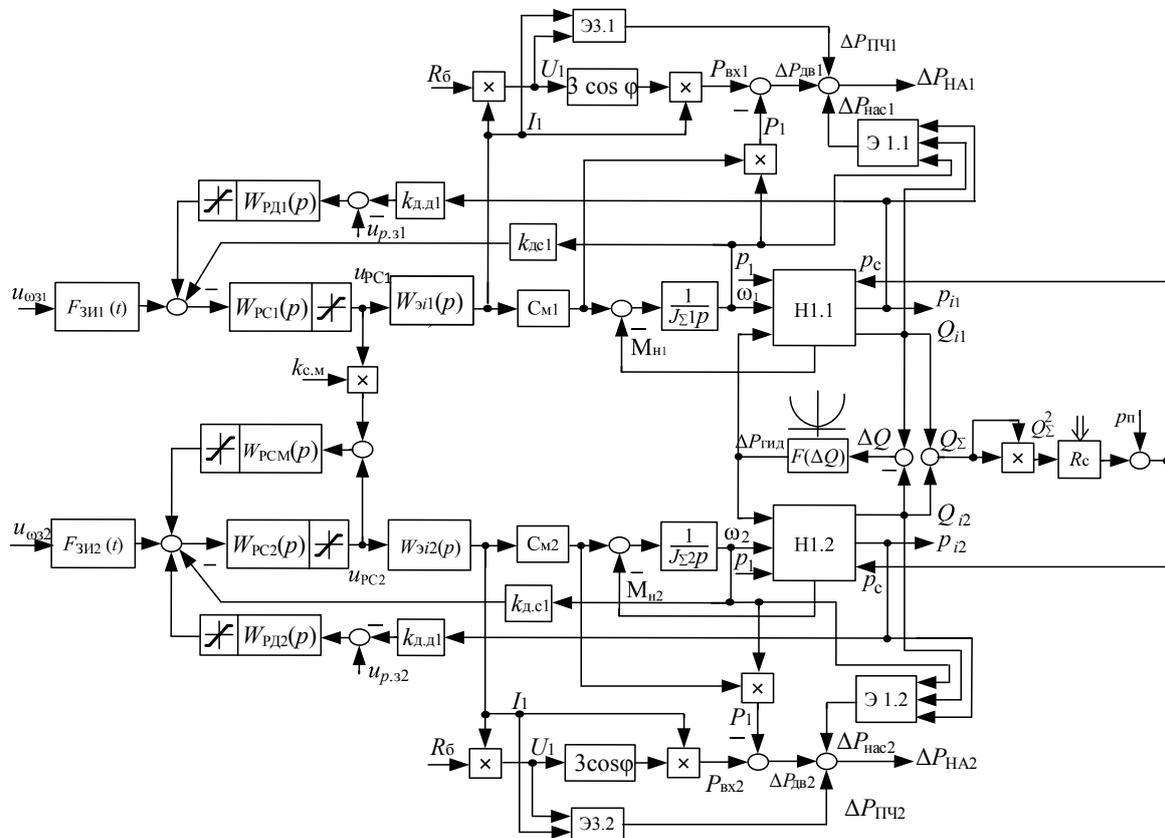
сутствии утечек и непроизводительных расходов подача НС, работающей непосредственно на магистраль без промежуточных емкостей, должна быть в каждый момент времени равна расходу в магистрали. Эта задача решается системами регулирования давления в магистрали. Характеристика магистрали при наличии противодействия аналогична характеристике сети НА, описание которой дано ранее. В таблице это описание отображено модулем СМ.

Компоненты управления переменными и соотношением переменных агрегатов насосной станции. При явлении, описанном модулем СА, необходимо предусматривать выравнивание расходов НА при различии сопротивлений в трубопроводах и характеристик агрегатов, работающих на общую магистраль через напорный коллектор. Делать это можно в системе приводов «ведущий – ведомый», регулируя непосредственно соотношения подач НА или косвенно регулируя соотношения моментов нагрузок электроприводов.

Управление соотношением подач агрегатов (модуль СП1). Электроприводными системами НС решается задача управления давлением в магистрали с регулятором давления, имеющим ограничение выходного сигнала, и внутренними

контурами регулирования подач каждого НА. Для управления соотношением подач агрегатов применяют системы с индивидуальными ПЧ на каждый двигатель. Один из НА выбирается ведущим и от него поступают сигналы заданий подач на другие НА. Устанавливая конкретные значения коэффициентов соотношения подач $k_{с.п.у}$, обеспечивают соответствующие им подачи НА. В модуле СП1 применены модули приводов ПЗ, возможно применение и других модулей. Для простоты не показаны обратные связи по давлению и подачам.

Управление соотношением моментов нагрузок электроприводов (модуль СП2). Системы управления соотношением моментов приводов, имеющих механические взаимосвязи, подробно рассмотрены в [3]. В приводах НС имеются взаимосвязи моментов через гидравлические процессы, но это не меняет принципов построения систем. С помощью регулятора соотношения моментов (РСМ) корректируются значения частот вращения двигателей или частот индивидуальных ПЧ с целью получения нужных соотношений, в том числе и равных значений моментов. Как и в предыдущих вариантах систем, эти соотношения устанавливаются коэффициентами $k_{с.м.у}$ по значению момента задания ведущего привода.



Таким образом, из представленных в таблице модулей можно формировать алгоритмические структурные схемы блоков и комплексов, отображающие динамические и энергетические процессы в системах управления технологией НА и НС. В качестве примера на рисунке показана алгоритмическая структурная схема одного из вариантов системы управления НС, состоящей из двух взаимосвязанных НА. Система включает в себя регуляторы скорости РС, давления РД, соотношения моментов нагрузки приводов РСМ, замкну-

тые контуры регулирования токов, задатчики интенсивности ЗИ для разгона и торможения электроприводов и отображает динамические и энергетические процессы в НС.

Выбирая различных сочетания компонентов моделей можно находить модели с лучшими характеристиками и на основании этих моделей находить оптимальный вариант системы управления насосной станцией, отвечающей обобщенным и частным критериям оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов М. П., Новиков В. А. Оптимизация интегрированных электроприводных систем механизмов, агрегатов, машин и комплексов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 300 с.
2. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
3. Новиков В. А., Савва С. В., Татаринцев Н. И. Электропривод в современных технологиях. М.: Академия, 2014. 400 с.
4. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2007. 272 с.
5. Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 360 с.
6. Каргин С. А. Анализ потерь электроэнергии при работе группы насосов, оснащенных регулируемым приводом // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 3. С. 12–18.
7. Сербин Ю. В., Прокопов А. А., Бугров В. П. Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования // Информ. бюллетень инж. центра «Арт». 2007. № 2. С. 57–65.

A. A. Prokopov, R. A. Kakhorov, V. A. Novikov, M. P. Belov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

MATHEMATICAL MODELS ELECTRIC DRIVE SYSTEMS OF PUMPING UNITS AND STATIONS

Presents the development a base of mathematical models components of electric drive systems of pumping units and stations for the purpose of assembling blocs of complexes used under optimization of control systems for units and stations. Are considered the components of pumping units (pumps, electric motors, frequency converters, information-measuring and control means) and components of pumping stations (technological components of the connection of aggregates through the input and output collectors, components of communication of units with the magistral, components for controlling technological variables and variable ratio). Varieties of components represent a variable base for adoption the optimal decision in the design of electric drive systems. Is performed systematization of dynamic and energy models and their tabular representation in the form of algorithmic structural schemes. Given example of the layout of a model of a complex of systems from the base of models modules and blocks for research the dynamic and energy characteristics of pumping stations.

Electric drive systems of pumping units and stations, mathematical descriptions of dynamic and energy processes, equations and algorithmic structural schemes components of control systems
