

В. А. Ведерников, О. А. Лысова, А. В. Мамченков

## РАЗРАБОТКА И ОПИСАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОЙ УСТАНОВКИ

*Разработка расчетной математической модели системы электропривода наружной установки типа УЭЦН, содержащей преобразователь частоты (ПЧ), фильтр, повышающий трансформатор, длинный кабель и асинхронный электродвигатель типа ПЭД.*

*Модель позволяет исследовать влияние высших гармонических составляющих напряжения и тока ПЧ на электромеханические процессы ПЭД.*

Известно, что ритмичная, высокопроизводительная деятельность любого нефтедобывающего предприятия в значительной мере определяется безаварийной и надежной работой погружных насосов, а последняя, в свою очередь, существенно зависит от качества функционирования их электрооборудования.

Последнее время на нефтедобывающих предприятиях наблюдается интенсивное внедрение частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) электроцентробежных погружных установок (УЭЦН). Применение ЧРП УЭЦН позволяет регулировать отбор нефти из скважины путем изменения потребляемой из сети мощности, снизить нагрузки на электрическую сеть за счет уменьшения количества УЭЦН, устранить периодические режимы работы скважин, а следовательно, снизить количество отказов УЭЦН, увеличить межремонтный период (МРП) эксплуатации оборудования и надежность работы погружных установок. Кроме того, использование ЧРП значительно облегчает режимы ввода скважин в эксплуатацию после ремонтных работ [1].

Особенностью электропривода УЭЦН, по сравнению с электроприводами других механизмов нефтегазодобывающего комплекса, является наличие между преобразователем частоты (ПЧ) и погружным асинхронным электродвигателем (ПЭД) повышающего трансформатора Т2 и длинного кабеля, соединяющего наземное электрооборудование с ПЭД, находящимся в скважине на глубине 2–3 км. Кроме того, на выходе ПЧ часто устанавливаются фильтры с наиболее типичной R-L-C конфигурацией. Схема соединения ПЧ с ПЭД приведена на рис. 1.

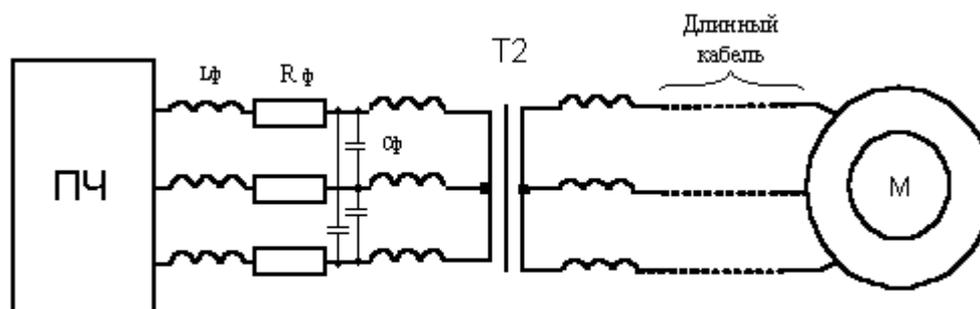


Рис. 1. Принципиальная схема цепи подключения ПЭД к ПЧ

Известно, что ПЧ, будучи нелинейным звеном, является источником ряда гармоник напряжения или тока. Причем их количество и амплитуда каждой в общем спектре зависят от типа и комплектации ПЧ.

Наличие высших гармонических составляющих на выходе ПЧ и цепи «фильтр — трансформатор — длинный кабель» (далее цепь ФТК) неизбежно приводит к искажению форм и величин напряжения и тока ПЭД. Исследования показали, что присутствие коэффициента искажения синусоидальности  $K_{\text{и}}$  ведет к дополнительному нагреву электродвигателя, преждевременному «старению» изоляции его обмоток и сокращению МРП эксплуатации УЭЦН. Кроме того, наличие на входе ПЭД высших гармонических составляющих является причиной возникновения вибраций, которые могут привести к механическим повреждениям и даже разрушению погружной установки.

Поэтому при эксплуатации ЧРП на УЭЦН возникает ряд вопросов, требующих разрешения, одним из которых является вопрос о влиянии на напряжение и токи ПЭД высших гармонических составляющих преобразователя частоты в совокупности с цепью ФТК.

Проведение испытаний на действующей установке ПЧ — ПЭД невозможно, так как для этого необходимо вывести скважину из рабочего режима.

Целью данной работы является создание математической модели, позволяющей произвести исследование влияния ПЧ-ФТК на электромеханические процессы ПЭД.

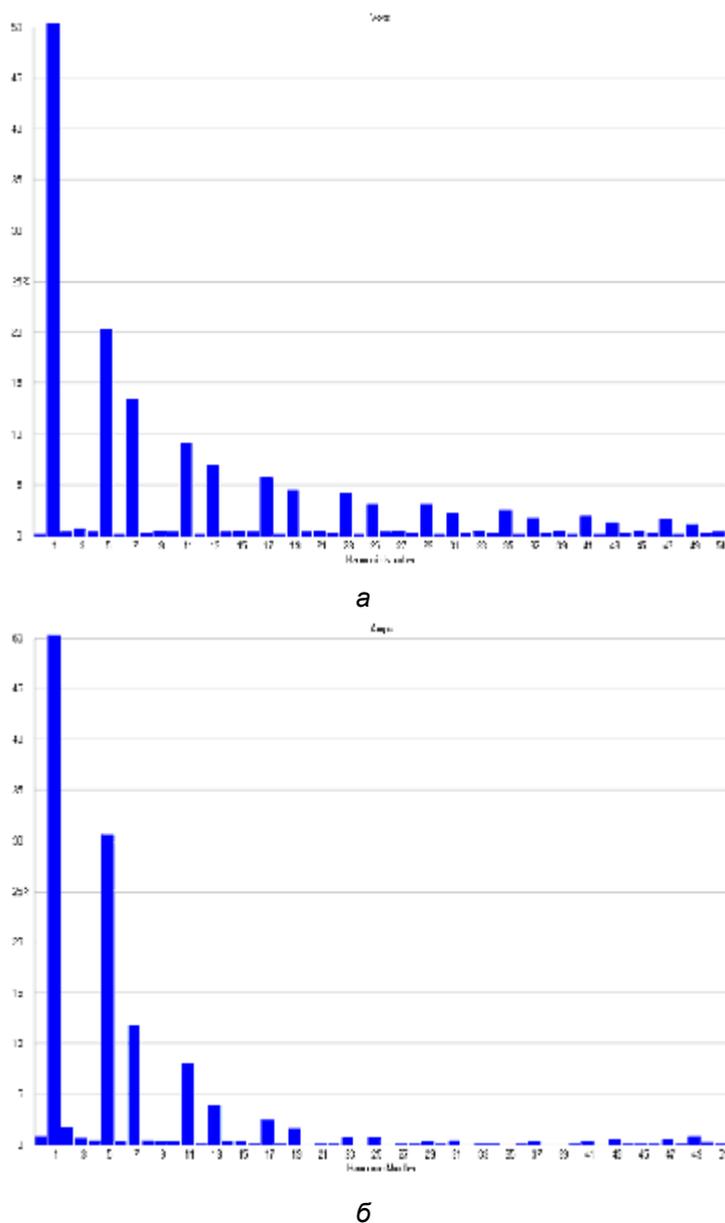
Традиционно считалось, что УЭЦН не требует реверса и торможения, и для питания ее электродвигателя следует применять неререверсивные ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН). Однако в последнее время, в связи с накоплением опыта эксплуатации ПЧ на УЭЦН, возникла необходимость использования реверсивных преобразователей с автономными инверторами тока (АИТ), обусловленная следующими причинами:

— при переходе с высших скоростей на низшие в индуктивностях повышающего трансформатора и обмотках статора ПЭД происходит накопление реактивной энергии, что ведет к их дополнительному нагреву. Для избежания этого целесообразна рекуперация энергии в сеть, возможная только в реверсивном электроприводе;

— часто преобразователь частоты используется не для постоянной эксплуатации с конкретной УЭЦН, а для вывода скважин нефтяного промысла на рабочий режим после их остановки (например, после ремонта). В этом случае неизбежен режим короткого замыкания нагрузки ПЧ, а преобразователи частоты с АИН, как правило, не допускают такого режима [2]. Следовательно, процесс вывода скважины на рабочий режим с помощью преобразователя частоты с АИН является нежелательным. ПЧ с АИТ устойчивы к режиму короткого замыкания и позволяют без труда активизировать скважину после «заглушения».

В настоящее время на кустах скважин, в зависимости от конкретных условий, используются ПЧ с АИН и с АИТ. Поэтому в статье рассматриваются процессы в ПЭД при питании его как от ПЧ с АИН, так и от ПЧ с АИТ.

На скважинах нефтепромыслов объединения ОАО «Юганскнефтегаз» были проведены исследования частотного спектра выходных напряжений и токов находящихся в эксплуатации ПЧ. Наиболее типичные диаграммы гармонического состава напряжения и тока на выходе ПЧ с АИН («Центрилифт») и ПЧ с АИТ («Реда») приведены на рис. 2 и 3 соответственно.



**Рис. 2.** Диаграммы спектрального состава напряжения а и тока б на выходе ПЧ с АИН

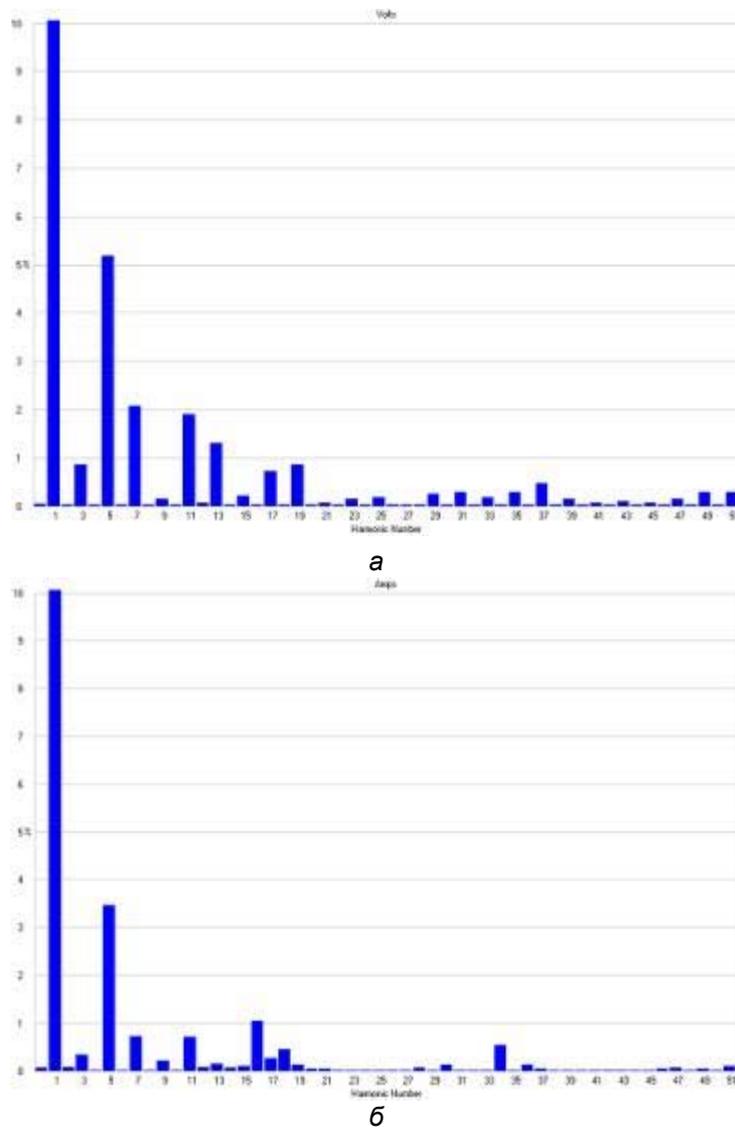


Рис. 3. Диаграммы спектрального состава напряжения *а* и тока *б* на выходе ПЧ с АИТ

На основании принципиальной схемы (рис. 1) была разработана схема замещения цепи ПЧ — ПЭД (рис. 4).

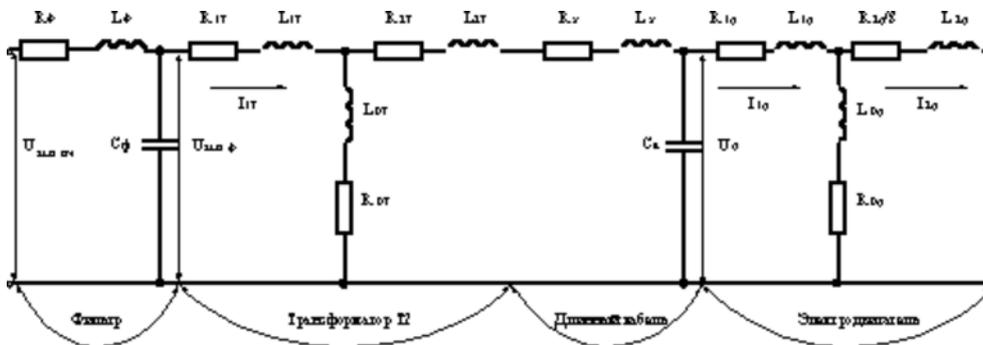


Рис. 4. Схема замещения цепи подключения ПЭД к ПЧ:

$R_{\phi}$ ,  $L_{\phi}$ ,  $C_{\phi}$  — активное сопротивление, индуктивность и емкость фильтра;  
 $R_{1T}$ ,  $L_{1T}$  — активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки трансформатора;  $R_{0T}$ ,  $L_{0T}$  — активное

сопротивление и индуктивность намагничивающего контура трансформатора;  $R_{2T}, L_{2T}$  — приведенные активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки трансформатора;  $R_k, L_k, C_k$  — активное сопротивление, индуктивность и емкость длинного кабеля;  $R_{1д}, L_{1д}$  — активное сопротивление и индуктивность обмотки статора электродвигателя;  $R'_2, L'_2$  — приведенные к обмотке статора активное сопротивление и индуктивность обмотки ротора;  $R_{0д}, L_{0д}$  — активное сопротивление и индуктивность намагничивающего контура электродвигателя;  $U_{\text{вых. ПЧ}}, U_{\text{вых. ф}}, U_d$  — напряжения на выходе ПЧ, фильтра и входе ПЭД

Математический алгоритм для рассматриваемой модели определяется типом инвертора ПЧ и разрабатывается исходя из нижеприведенных соображений.

**Для ПЧ с автономным инвертором напряжения.** В этом случае ПЧ является источником напряжения [3], структурная схема системы ФТК имеет вид, приведенный на рис. 5.

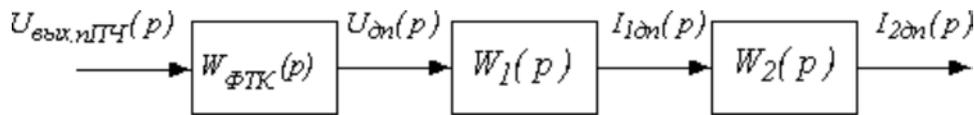


Рис. 5. Структурная схема цепи ПЧ — ПЭД:

$$W_{\text{ФТК}}(p) = \frac{U_{\text{ст}}(p)}{U_{\text{вых.пч}}(p)} \text{ — передаточная функция по напряжению цепи ФТК;}$$

$$W_1(p) = \frac{I_{1\text{ст}}(p)}{U_{\text{ст}}(p)} \text{ — передаточная функция ПЭД по току цепи обмотки статора;}$$

$$W_2(p) = \frac{I_{2\text{ст}}(p)}{I_{1\text{ст}}(p)} \text{ — передаточная функция ПЭД по току цепи обмотки ротора;}$$

$U_{\text{вых.пч}}(p) = U_n K_n$  — изображение выходного напряжения  $n$ -й гармонической составляющей ПЧ;  $n$  — номер гармонической составляющей;  $K_n$  — коэффициент, указывающий какую часть номинального выходного напряжения  $U_n$  преобразователя представляет собой  $n$ -я гармоническая составляющая

Расчет производится для единичного гармонического воздействия.

На основании схемы замещения (рис. 4) получены уравнения, описывающие комплексные коэффициенты усиления каждого элемента структурной схемы:  $W_U(2j\pi fn)$  — по напряжению ПЭД,  $W_1(2j\pi fn)$  — по току цепи статора,  $W_2(2j\pi fn)$  — по току цепи ротора.

Определены уравнения для расчета эквивалентных сопротивлений  $Z_{кд}$  цепи длинный кабель — двигатель и  $Z_3$  трансформатора:

$$Z_{кд} = E + jD, \tag{1}$$

где

$$D = \frac{2\pi fn L_k A^2 + 2\pi fn L_k \left(B - \frac{1}{2\pi fn C_k}\right)^2 - A^2 \frac{1}{2\pi fn C_k} - B \frac{1}{2\pi fn C_k} \left(B - \frac{1}{2\pi fn C_k}\right)}{A^2 + \left(B - \frac{1}{2\pi fn C_k}\right)^2},$$

$$E = \frac{R_k A^2 + R_k \left(B - \frac{1}{2\pi fn C_k}\right)^2 + A B \frac{1}{2\pi fn C_k} - A \frac{1}{2\pi fn C_k} \left(B - \frac{1}{2\pi fn C_k}\right)}{A^2 + \left(B - \frac{1}{2\pi fn C_k}\right)^2},$$

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{R_{1A} \left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)^2 + R_{1A} 4\pi^2 f^2 n^2 (L'_2 + L_{0A})^2 + \left( \frac{R_2}{S} R_{0A} - 4\pi^2 f^2 n^2 L'_2 L_{0A} \right) \left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)}{\left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L'_2 + L_{0A})^2} + \\
 &\quad + \frac{\left( \frac{R_2}{S} L_{0A} + R_{0A} L'_2 \right) 4\pi^2 f^2 n^2 (L'_2 + L_{0A})}{\left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L'_2 + L_{0A})^2}, \\
 B &= \frac{2\pi f n L_{1A} \left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)^2 + 8\pi^3 f^3 n^3 L_{1A} (L'_2 + L_{0A}) + 2\pi f n \left( \frac{R_2}{S} L_{0A} + R_{0A} L'_2 \right) \left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)}{\left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L'_2 + L_{0A})^2} - \\
 &\quad - \frac{\left( \frac{R_2}{S} R_{0A} - 4\pi^2 f^2 n^2 L'_2 L_{0A} \right) 2\pi f n (L'_2 + L_{0A})}{\left( \frac{R_2}{S} + R_{0A} \right)^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L'_2 + L_{0A})^2}. \\
 Z_3 &= M + jN, \tag{2}
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{R_{1T} (R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + R_{1T} (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2}{(R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2} + \\
 &\quad + \frac{(R_{0T} Ek^2 + R_{0T} R'_{2T} - Dk^2 2\pi f n L_{0T} - 4\pi^2 f^2 n^2 L_{0T} L'_{2T}) (R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})}{(R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2} + \\
 &\quad + \frac{(2\pi f n L_{0T} Ek^2 + 2\pi f n L_{0T} R'_{2T} + R_{0T} Dk^2 + R_{0T} 2\pi f n L'_{2T}) (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))}{(R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2}, \\
 N &= \frac{2\pi f n L_{1T} (R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + 2\pi f n L_{1T} (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2}{(R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2} + \\
 &\quad + \frac{(Ek^2 2\pi f n L_{0T} + R'_{2T} 2\pi f n L_{0T} + R_{0T} Dk^2 + R_{0T} 2\pi f n L'_{2T}) (R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})}{(R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2} - \\
 &\quad - \frac{(R_{0T} Ek^2 + R_{0T} R'_{2T} - Dk^2 2\pi f n L_{0T} - 4\pi^2 f^2 n^2 L_{0T} L'_{2T}) (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))}{(R_{0T} + Ek^2 + R'_{2T})^2 + (Dk^2 + 2\pi f n (L_{0T} + L'_{2T}))^2}.
 \end{aligned}$$

Комплексное изображение тока  $I_{1T}$  в первичной обмотке трансформатора T2 определится как:

$$I_{1T} = \frac{1}{M + jN}. \tag{3}$$

Комплексное изображение приведенного тока  $I'_{2T}$  во вторичной обмотке трансформатора T2 равно

$$\begin{aligned}
 I'_2 &= \frac{1}{M + jN} \times \\
 &\quad \times \frac{(R_{0T} + j2\pi f n L_{0T}) \chi A 2\pi f n C_x + j(B 2\pi f n C_x - 1)}{(R_{0T} + R'_{2T} + R_x k^2 \chi A 2\pi f n C_x + j(B 2\pi f n C_x - 1)) + j2\pi f n (L_{0T} + L_x k^2 + L'_{2T}) (A 2\pi f n C_x + j(B 2\pi f n C_x - 1)) + (-jA + B) k^2}.
 \end{aligned}$$

Комплексное изображение напряжения  $U_2$  на электродвигателе (без учета фильтра) определится как:

$$U_2 = \frac{U'_2}{k}. \tag{4}$$

где

$$U'_2 = I'_2 \frac{(-jA + B) k^2}{2\pi f n C_x A + j(B 2\pi f n C_x - 1)}.$$

Тогда, с учетом комплексного коэффициента усиления фильтра, комплексный коэффициент усиления по напряжению ПЭД имеет следующий вид:

$$W_U(2\pi fn) = (M_1 + jN_1)(V_1 + jW_1) = M_2 + jN_2, \quad (5)$$

где

$$M_1 = \frac{1 - 4\pi^2 f^2 r^2 L_\Phi C_\Phi}{(1 - 4\pi^2 f^2 r^2 L_\Phi C_\Phi)^2 + R_\Phi^2 4\pi^2 f^2 r^2 C_\Phi^2};$$

$$N_1 = \frac{-R_\Phi 2\pi fn C_\Phi}{(1 - 4\pi^2 f^2 r^2 L_\Phi C_\Phi)^2 + R_\Phi^2 4\pi^2 f^2 r^2 C_\Phi^2};$$

$$V_1 = \frac{k(VM + WN)}{M^2 + N^2};$$

$$W_1 = k \frac{WM - VN}{M^2 + N^2};$$

$$W = \frac{HG - FL}{H^2 + L^2};$$

$$V = \frac{FH + GL}{H^2 + L^2}.$$

Комплексный коэффициент усиления  $W_1(2\pi fn)$  по току статора ПЭД определится как:

$$W_1(2\pi fn) = \frac{U_2}{Z_A} = \frac{U_2}{A + jB} = M_3 + jN_3, \quad (6)$$

где

$$M_3 = \frac{M_2 A + N_2 B}{A^2 + B^2};$$

$$N_3 = \frac{N_2 A - M_2 B}{A^2 + B^2};$$

$$M_2 = M_1 V_1 - N_1 W_1;$$

$$N_2 = M_1 W_1 + N_1 V_1.$$

Комплексный коэффициент усиления по приведенному току ротора

$$W_2(2\pi fn) = I_\kappa \frac{R_{\sigma\lambda} + j2\pi fn L_{\sigma\lambda}}{R_{\sigma\lambda} + \frac{R_2}{s} + j2\pi fn (L_{\sigma\lambda} + L_2')} = M_4 + jN_4, \quad (7)$$

где

$$M_4 = \frac{(M_3 R_{\sigma\lambda} - N_3 2\pi fn L_{\sigma\lambda})(R_{\sigma\lambda} + \frac{R_2}{s}) + (N_3 R_{\sigma\lambda} + M_3 2\pi fn L_{\sigma\lambda}) 2\pi fn (L_{\sigma\lambda} + L_2')}{(R_{\sigma\lambda} + \frac{R_2}{s})^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L_{\sigma\lambda} + L_2')^2};$$

$$N_k = \frac{(N_3 R_{\text{оА}} - M_3 2\pi f n L_{\text{оА}}) \left( R_{\text{оА}} + \frac{R_2}{S} \right) - (M_3 R_{\text{оА}} + N_3 2\pi f n L_{\text{оА}}) 2\pi f n (L_{\text{оА}} + L_2')}{\left( R_{\text{оА}} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L_{\text{оА}} + L_2')^2}$$

Амплитуда  $n$ -й гармонической составляющей напряжения ПЭД определяется как:

$$A_{\dots n} = \sqrt{M_2^2 + N_2^2} K_n. \quad (8)$$

Фазовый сдвиг относительно входного сигнала:

$$\varphi_{\dots n} = \arctg \frac{N_2}{M_2}. \quad (9)$$

Кривая мгновенного значения  $n$ -й гармонической составляющей напряжения ПЭД:

$$U_{\dots n} = A_{\dots n} \sin(2\pi n f t + \varphi_{\dots n}). \quad (10)$$

Суммарная кривая мгновенных значений  $k$  гармонических составляющих определяется следующим уравнением:

$$U_{\dots \Sigma} = \sum_1^k U_{\dots n} \quad (11)$$

Действующее значение  $n$ -й гармонической составляющей напряжения ПЭД:

$$U_{\dots \Delta n} = \frac{A_{\dots n}}{\sqrt{2}}. \quad (12)$$

Суммарное действующее значение  $k$  гармонических составляющих напряжения ПЭД:

$$U_{\dots \Delta \Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^k A_{\dots n}^2}{2}}. \quad (13)$$

Из (6) аналогично определяются мгновенные и действующие значения тока цепи статора:

$$A_{\dots n} = \sqrt{M_3^2 + N_3^2} K_n; \quad (14)$$

$$\varphi_{\dots n} = \arctg \frac{N_3}{M_3}; \quad (15)$$

$$I_{\dots n} = A_{\dots n} \sin(2\pi n f t + \varphi_{\dots n}); \quad (16)$$

$$I_{\dots \Sigma} = \sum_1^k I_{\dots n}; \quad (17)$$

$$I_{\dots \Delta n} = \frac{A_{\dots n}}{\sqrt{2}}; \quad (18)$$

$$I_{\text{н.т.1.}\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^k A_{\text{н.т.1.}n}^2}{2}} \quad (19)$$

Из (7) определяются мгновенные и действующие значения тока цепи ротора:

$$A_{\text{н.т.2.}n} = \sqrt{M_n^2 + N_n^2} K_n; \quad (20)$$

$$\varphi_{\text{н.т.2.}n} = \arctg \frac{N_n}{M_n}; \quad (21)$$

$$I_{\text{н.т.2.}n} = A_{\text{н.т.2.}n} \sin(2\pi nft + \varphi_{\text{н.т.2.}n}); \quad (22)$$

$$I_{\text{н.т.2.}\Sigma} = \sum_1^k I_{\text{н.т.2.}n}; \quad (23)$$

$$I_{\text{н.т.1.}n} = \frac{A_{\text{н.т.2.}n}}{\sqrt{2}}; \quad (24)$$

$$I_{\text{н.т.1.}\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^k A_{\text{н.т.2.}n}^2}{2}} \quad (25)$$

**Для ПЧ с автономным инвертором тока.** Расчет производится аналогично предыдущему случаю, но комплексный коэффициент усиления определяется из условия, что ПЧ здесь является источником тока [3], т. е. комплексное изображение тока на входе фильтра

$$I_{\Phi} = 1.$$

Комплексное изображение тока первичной обмотки трансформатора Т2 описывается следующим уравнением:

$$I_{\text{т}} = E_1 + jD_1, \quad (26)$$

где

$$E_1 = \frac{1 - N2\pi fnC_{\Phi}}{(1 - N2\pi fnC_{\Phi})^2 + M^2 4\pi^2 f^2 n^2 C_{\Phi}^2};$$

$$D_1 = \frac{-M2\pi fnC_{\Phi}}{(1 - N2\pi fnC_{\Phi})^2 + M^2 4\pi^2 f^2 n^2 C_{\Phi}^2}.$$

Комплексный коэффициент усиления по напряжению ПЭД определяется как:

$$W_{1T}(2j\pi fn) = E_2 + jD_2, \quad (27)$$

где

$$E_2 = k(VE_1 - WD_1);$$

$$D_2 = k(VD_1 + WE_1).$$

Комплексный коэффициент усиления по току обмотки статора ПЭД определяется как:

$$W_{1T}(2j\pi fn) = \frac{U_2}{Z_A} = E_3 + jD_3, \quad (28)$$

где

$$E_3 = \frac{E_2 A + D_2 B}{A^2 + B^2};$$

$$D_3 = \frac{A D_2 - E_2 B}{A^2 + B^2}.$$

Комплексный коэффициент усиления по току обмотки ротора ПЭД определяется как:

$$W_{2T}(2j\pi fn) = E_4 + jD_4, \quad (29)$$

где

$$E_4 = \frac{(E_3 R_{\sigma A} - D_3 2\pi fn L_{\sigma A})(R_{\sigma A} + \frac{\sigma_2}{s}) + (D_3 R_{\sigma A} + E_3 2\pi fn L_{\sigma A})(2\pi fn(L_{\sigma A} + L_2'))}{(R_{\sigma A} + \frac{\sigma_2}{s})^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L_{\sigma A} + L_2')^2};$$

$$D_4 = \frac{-(E_3 R_{\sigma A} - D_3 2\pi fn L_{\sigma A})(2\pi fn(L_{\sigma A} + L_2')) + (D_3 R_{\sigma A} + E_3 2\pi fn L_{\sigma A})(R_{\sigma A} + \frac{\sigma_2}{s})}{(R_{\sigma A} + \frac{\sigma_2}{s})^2 + 4\pi^2 f^2 n^2 (L_{\sigma A} + L_2')^2}.$$

Амплитуда и фазовый сдвиг  $n$ -й гармонической составляющей напряжения ПЭД определяется как:

$$A_{1T, n} = \sqrt{E_2^2 + D_2^2} K_n; \quad (30)$$

$$\varphi_{1T, n} = \arctg \frac{D_2}{E_2}. \quad (31)$$

Кривая мгновенного значения  $n$ -й гармонической составляющей напряжения ПЭД:

$$U_{1T, n} = A_{1T, n} \sin(2\pi n f t + \varphi_{1T, n}). \quad (32)$$

Суммарное действующее значение  $k$  гармонических составляющих напряжения ПЭД:

$$U_{1T, \Sigma} = \sum_1^k U_{1T, n}. \quad (33)$$

Действующее значение  $n$ -й гармонической составляющей напряжения ПЭД:

$$U_{1T, n} = \frac{A_{1T, n}}{\sqrt{2}}. \quad (34)$$

Суммарное действующее значение  $k$  гармонических составляющих напряжения ПЭД:

$$U_{\text{шт.н.}\Delta\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^k A_{\text{шт.н.}\Delta\Sigma}^2}{2}}. \quad (35)$$

Из (28) аналогично определяются мгновенные и действующие значения тока цепи статора:

$$A_{\text{шт.1}\Delta\Sigma} = \sqrt{E_3^2 + D_3^2} K_n; \quad (36)$$

$$\varphi_{\text{шт.1}\Delta\Sigma} = \arctg \frac{D_3}{E_3}; \quad (37)$$

$$i_{\text{шт.1}\Delta\Sigma} = A_{\text{шт.1}\Delta\Sigma} \sin(2\pi nft + \varphi_{\text{шт.1}\Delta\Sigma}); \quad (38)$$

$$I_{\text{шт.1}\Delta\Sigma} = \sum_1^k I_{\text{шт.1}\Delta\Sigma}; \quad (39)$$

$$I_{\text{шт.1}\Delta\Sigma} = \frac{A_{\text{шт.1}\Delta\Sigma}}{\sqrt{2}}; \quad (40)$$

$$I_{\text{шт.1}\Delta\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^k A_{\text{шт.1}\Delta\Sigma}^2}{2}}. \quad (41)$$

Из (29) определяются мгновенные и действующие значения тока цепи ротора:

$$A_{\text{шт.2}\Delta\Sigma} = \sqrt{E_4^2 + D_4^2}; \quad (42)$$

$$\varphi_{\text{шт.2}\Delta\Sigma} = \arctg \frac{D_4}{E_4}; \quad (43)$$

$$i_{\text{шт.2}\Delta\Sigma} = A_{\text{шт.2}\Delta\Sigma} \sin(2\pi nft + \varphi_{\text{шт.2}\Delta\Sigma}); \quad (44)$$

$$I_{\text{шт.2}\Delta\Sigma} = \sum_1^k I_{\text{шт.2}\Delta\Sigma}; \quad (45)$$

$$I_{\text{шт.2}\Delta\Sigma} = \frac{A_{\text{шт.2}\Delta\Sigma}}{\sqrt{2}}; \quad (46)$$

$$I_{\text{шт.2}\Delta\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^k A_{\text{шт.2}\Delta\Sigma}^2}{2}}. \quad (47)$$

На основании полученного математического описания на алгоритмическом языке DELPHI была разработана программа модели, экран меню которой показан на рис. 6. В модели можно задавать тип инвертора ПЧ; параметры фильтра, трансформатора, кабеля и электродвигателя; номера рассматриваемых гармонических составляющих и удельный вес каждой из них в общем гармоническом спектре.

На рис. 7 и 8 приведены результаты работы модели, показаны кривые мгновенных значений напряжения ПЭД при питании его от ПЧ с АИН и с АИТ соответственно. Заданный гармонический состав выходных напряжения и тока ПЧ соответствует спектру, приведенному на диаграммах (рис. 2 и 3), без учета гармонических

составляющих, чья величина составляет менее 3 % от первой.

Модель элемент: ПЧ с АИН | ПЧ с АИТ

Коэффициент трансформации: 1 частота: 50 | ток холостого хода: 1.871133723 | Коэффициент потерь: 0.04 | Индуктивность: 0.04 | Индуктивность: 0.04 | Индуктивность: 0.001

Параметры индуктора	Параметры трансформатора	Параметры кабеля	Параметры электрической цепи
R <sub>л</sub> : 0.01	R <sub>тн</sub> : 0.0176	R <sub>к</sub> : 0.0008	R <sub>1а</sub> : 0.01
L <sub>л</sub> : 0.05	L <sub>тн</sub> : 1.1E-6	L <sub>к</sub> : 0.0008	L <sub>1а</sub> : 0.01
C <sub>л</sub> : 0.0	R <sub>сн</sub> : 0.0176	C <sub>к</sub> : 0.0008	R <sub>1б</sub> : 0.01
L <sub>сн</sub> : 0.0	L <sub>сн</sub> : 1.1E-6	R <sub>сн</sub> : 0.0176	L <sub>1б</sub> : 0.01
	R <sub>сн</sub> : 0.0176	L <sub>сн</sub> : 1.1E-6	R <sub>2</sub> : 0.01
	L <sub>сн</sub> : 1.1E-6	R <sub>сн</sub> : 0.0176	L <sub>2</sub> : 0.01
	R <sub>сн</sub> : 0.0176	L <sub>сн</sub> : 1.1E-6	R <sub>3</sub> : 0.01
	L <sub>сн</sub> : 1.1E-6	R <sub>сн</sub> : 0.0176	L <sub>3</sub> : 0.01
	R <sub>сн</sub> : 0.0176	L <sub>сн</sub> : 1.1E-6	R <sub>4</sub> : 0.01
	L <sub>сн</sub> : 1.1E-6	R <sub>сн</sub> : 0.0176	L <sub>4</sub> : 0.01

Для загрузки данных  
Забыли параметры в  
каждой области  
трансформатора

Для загрузки данных  
Забыли параметры в  
каждой области  
электрической цепи

Рис. 6. Экран меню модели

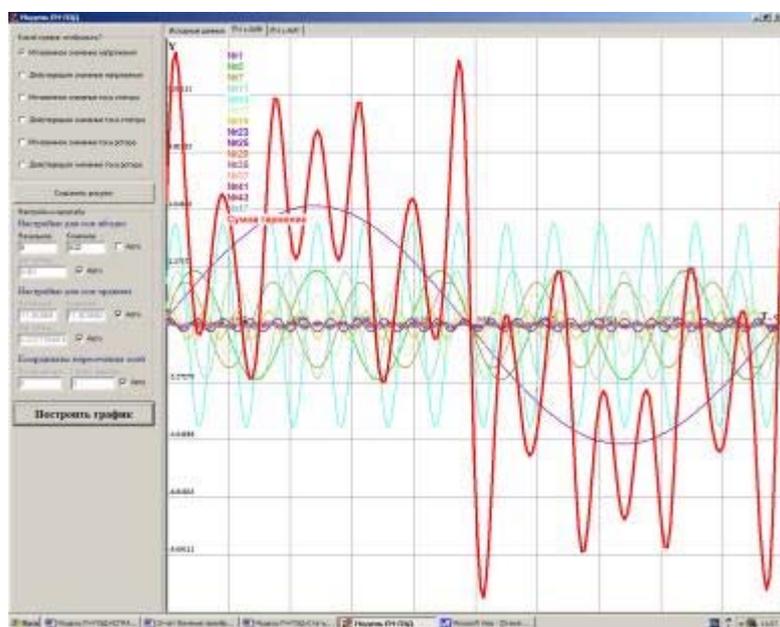
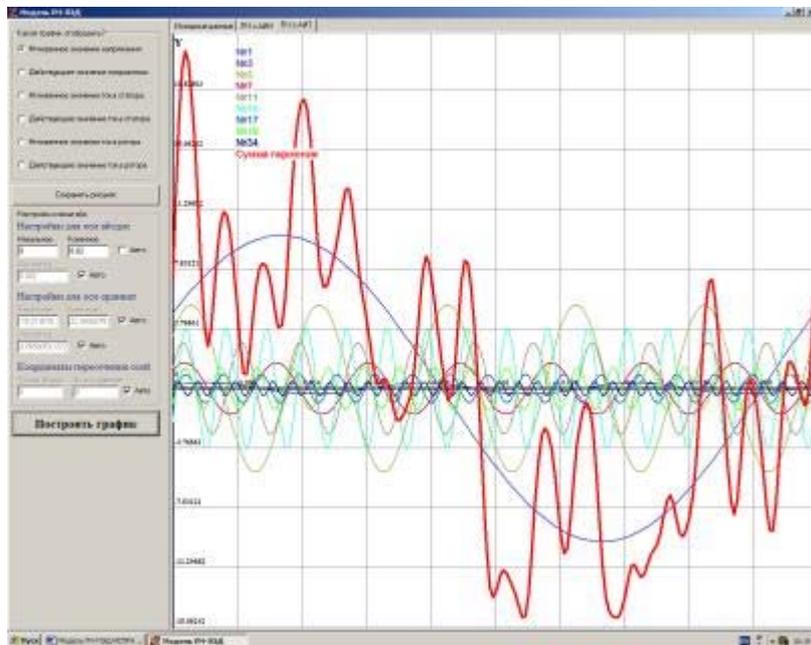


Рис. 7. Пример работы модели: кривые мгновенных значений напряжения ПЭД при питании его от ПЧ с АИН



**Рис. 8.** Пример работы модели: кривые мгновенных значений напряжения ПЭД при питании его от ПЧ с АИТ

Из рис. 7 и 8 видно, что совокупность ПЧ с инвертором любого типа и цепи ФТК ведет к искажению напряжения на обмотке статора ПЭД, т. е. очевидна необходимость дальнейших исследований в этом направлении. Аналогичную оценку можно осуществить и в отношении токов статорной и роторной обмоток ПЭД.

Таким образом, разработанная модель позволяет:

- произвести исследование электромеханических процессов в ПЭД при питании его от ПЧ с инверторами напряжения и тока;
- исследовать форму и величину кривых мгновенных и действующих значений напряжения и токов ПЭД при воздействии на него одной (любой) гармонической составляющей выходных напряжения или тока ПЧ и совокупности нескольких;
- оценить влияние параметров цепи ПЧ — ПЭД на напряжение и токи погружного электродвигателя каждой гармонической составляющей отдельно и их совокупности;
- обнаружить возможность резонансных явлений в цепи ПЧ — ПЭД;
- определить оптимальную структуру и параметры фильтров для ПЧ с АИН и АИТ для каждой гармонической составляющей;
- оценить влияние на электромагнитный момент ПЭД каждой гармонической составляющей отдельно и их совокупности;
- определить параметры элементов цепи ПЧ — ПЭД, при которых возможно появление вибрационных моментов электродвигателя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вандевьер Джозер Э. Направление развития высокопроизводительных электрических погружных систем для скважин с высокой забойной температурой и агрессивной средой. М.: Информэлектро, 1987. 24 с.
2. Кудрявцев А. В., Ладыгин А. Н. Современные преобразователи частоты в электроприводе // Приводная техника. 1998. № 3. С. 21–28.
3. Ведерников В. А., Лысова О. А., Григорьев Г. Я. Особенности выбора преобразователей частоты для электропривода погружных насосных установок // Энергетика Тюменского региона. 2004. № 1. С. 32–35.

V. A. Vedernikov, O. A. Lysova, A. V. Mamchenkov

### DEVELOPMENT AND DESCRIPTION WITH REGARD TO A DIGITAL MODEL OF AN ELECTRIC DRIVE SYSTEM IN SUBMERSIBLE UNIT

*The article deals with development of a design mathematical model regarding an electric drive system in the outer unit of the ECPU type containing frequency converter (FC), filter, step-up transformer, a long cable, and an asynchronous motor of submersible type. The model allows to investigate the impact produced by higher harmonic components of the FC voltage and current upon electromechanical processes in the submersible motor.*