

УДК: 621.3.078.4

DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-19-25

**Р. Н. ХАМИТОВ<sup>1</sup>**  
**В. В. АНИКИН<sup>1</sup>**  
**В. З. КОВАЛЕВ<sup>2</sup>**  
**А. О. ПАРАМЗИН<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>Югорский  
государственный университет,  
Ханты-Мансийский  
автономный округ – Югра,  
г. Ханты-Мансийск

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ВАРИАЦИЯХ ВНЕШНИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В статье исследованы вопросы функционирования электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса при вариациях внешних температурных воздействий. Построена математическая модель анализируемого комплекса с учетом тепловых нестационарных процессов. Показаны отклонения прогнозных значений выходных параметров комплекса при учете температурных воздействий. Предложено построение электромеханической системы с регулируемым погружным электродвигателем с подблоком идентификации параметров и блоком оценивания переменных состояний, что при управлении позволит учитывать внешние температурные воздействия.

**Ключевые слова:** установка электроцентробежного насоса, погружной электродвигатель, математическая модель, тепловой нестационарный процесс.

**Введение.** Оборудование современных нефтяных месторождений представляет собой комплекс сложного электротехнического оборудования, рабочие характеристики которого обусловлены взаимосвязями и взаимовлиянием его составных частей. Основой этого оборудования является электротехнический комплекс УЭЦН — установка электроцентробежного насоса (electric submersible pump) (ЭТК УЭЦН). Только на территории ХМАО – Югра, где добывается около 50 % общероссийской нефти, количество эксплуатируемых УЭЦН, по косвенным оценкам, составляет более 60 тысяч. Основные ком-

поненты, составляющие УЭЦН, — нефтепромысловый трансформатор (НТ), погружная кабельная линия (ПКЛ), погружной электродвигатель (ПЭД). Непосредственная эксплуатация таких компонент УЭЦН, как нефтепромысловый трансформатор, погружная кабельная линия, погружной электродвигатель, происходит в агрессивной среде при значительных вариациях внешних температурных воздействий. В свою очередь, это приводит как к изменению рабочих характеристик, так и к неблагоприятному изменению сроков работки на отказ. Указанное обстоятельство делает

актуальной задачей достоверного прогнозирования и учета воздействий вариаций внешних температурных воздействий на работоспособность УЭЦН.

**Теория.** В соответствии с принятой идеологией математического моделирования электропривода [1, 2] при моделировании эксплуатационных режимов работы электротехнического комплекса ЭТК УЭЦН, содержащего послеремонтные погружные электродвигатели (ПЭД), введем допущения [3, 4]:

— режим работы всех компонент, входящих в моделируемую часть ЭТК УЭЦН, симметричен, соответственно, параметры фазных величин покомпонентно равны;

— магнитное поле в воздушном зазоре ПЭД синусоидально в радиальном направлении и не меняется вдоль образующей рашотки статора (пренебрегаем зубцовыми гармониками, магнитной несимметрией, краевыми эффектами и т.п.);

— напряжение на выходе преобразователя частоты имеет синусоидальную форму;

— изменение потерь в стали ПЭД и насыщение магнитной цепи ПЭД учитываем в рамках модели идентификации ПЭД;

— эффект вытеснения токов в проводниках ПЭД учитываем в рамках модели идентификации ПЭД [5–7];

— активные сопротивления кабеля в части, находящейся в скважине, зависят от температуры окружающей среды и режима работы [8, 9];

— активные сопротивления статорной и роторной обмоток ПЭД зависят от режима работы и температуры окружающей среды [8, 10, 11];

— в установившемся режиме работы температура активной части ПЭД в радиальном и осевом направлениях постоянна;

— многомассовая система (вал ПЭД, электроцентробежный насос, газосепаратор, жидкость в НКТ, ПЖ) моделируется одностепенной системой без учета вязкоупругих свойств [2];

— напряжение на выходе трансформатора имеет синусоидальную симметричную форму, действующее значение напряжения задается соответствующей отпайкой ТМПН [2];

— преобразователь частоты ЭТК УЭЦН моделируется идеальным источником переменной частоты и напряжения.

Соответственно, приходим к следующим математическим моделям основных компонент динамики ЭТК УЭЦН [2, 12].

Асинхронный электродвигатель (ПЭД):

$$\frac{d\Psi_A}{dt} = -\{R_{A,25}[1 + \alpha_t(\tau_{n1} - \tau_{ai})] + R_{A,25}[1 + \alpha_t(\tau_{a1} - \tau_{ai})]\}i_A + U \sin(\omega_1 t),$$

$$\frac{d\Psi_B}{dt} = -\{R_{B,25}[1 + \alpha_t(\tau_{n1} - \tau_{ai})] + R_{B,25}[1 + \alpha_t(\tau_{a1} - \tau_{ai})]\}i_B + U \sin(\omega_1 t + 120^\circ),$$

$$\frac{d\Psi_C}{dt} = -\{R_{C,25}[1 + \alpha_t(\tau_{n1} - \tau_{ai})] + R_{C,25}[1 + \alpha_t(\tau_{a1} - \tau_{ai})]\}i_C + U \sin(\omega_1 t - 120^\circ),$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = -R_{a,25}[1 + \alpha_t(\tau_{n2} - \tau_{ai})] \cdot i_a,$$

$$\frac{d\Psi_b}{dt} = -R_{b,25}[1 + \alpha_t(\tau_{n2} - \tau_{ai})] \cdot i_b,$$

$$\frac{d\Psi_c}{dt} = -R_{c,25}[1 + \alpha_t(\tau_{n2} - \tau_{ai})] \cdot i_c.$$

Здесь

— потокосцепления обмоток:

$$\Psi_A = L_A i_A - \frac{1}{2} L_m (i_B + i_C) +$$

$$+ L_m [i_a \cos \Theta + i_b \cos(\Theta + 120^\circ) + i_c \cos(\Theta - 120^\circ)],$$

$$\Psi_B = L_B i_B - \frac{1}{2} L_m (i_A + i_C) +$$

$$+ L_m [i_a \cos(\Theta - 120^\circ) + i_b \cos \Theta + i_c \cos(\Theta + 120^\circ)],$$

$$\Psi_C = L_C i_C - \frac{1}{2} L_m (i_A + i_B) +$$

$$+ L_m [i_a \cos(\Theta + 120^\circ) + i_b \cos(\Theta - 120^\circ) + i_c \cos \Theta],$$

$$\Psi_a = L_a i_a - \frac{1}{2} L_m (i_b + i_c) +$$

$$+ L_m [i_a \cos \Theta + i_b \cos(\Theta - 120^\circ) + i_c \cos(\Theta + 120^\circ)],$$

$$\Psi_b = L_b i_b - \frac{1}{2} L_m (i_a + i_c) +$$

$$+ L_m [i_a \cos(\Theta + 120^\circ) + i_b \cos \Theta + i_c \cos(\Theta - 120^\circ)],$$

$$\Psi_c = L_c i_c - \frac{1}{2} L_m (i_a + i_b) +$$

$$+ L_m [i_a \cos(\Theta - 120^\circ) + i_b \cos(\Theta + 120^\circ) + i_c \cos \Theta];$$

— пренебрегаем несимметрией активных и индуктивных параметров схемы замещения ПЭД, пренебрегаем температурными флуктуациями параметров цепи намагничивания, тогда имеем:  $R_{1,25} = R_{A,25} = R_{B,25} = R_{C,25}$ ;  $L_1 = L_A = L_B = L_C$ ;  $R_{2,25} = R_{a,25} = R_{b,25} = R_{c,25}$ ;  $L_2 = L_a = L_b = L_c$ ;  $L_m = \text{const}$ ;

— мгновенные значения температур активных частей ПЭД:  $\tau_{n1}$ ,  $\tau_{a1}$ ,  $\tau_{n2}$ ,  $\tau_{a2}$ ;

— мгновенные значения токов ПЭД:  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ ,  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ;

— температурный коэффициент сопротивления меди:  $\alpha_t = 0,0038 \cdot 10^{-3} (1/K)$ .

Механическая подсистема, ее уравнения динамики:

$$J \frac{d\omega}{dt} = p(M_E - M_C); \quad \frac{d\Theta}{dt} = \omega,$$

где  $\omega$  — скорость вращения ротора ПЭД;  $J$  — момент инерции вращающихся масс приведённых к валу двигателя;  $p$  — число пар полюсов ПЭД;  $M_E$  — момент электромагнитный развиваемый ПЭД;  $M_C$  — момент сопротивления на валу ПЭД, с учетом собственного момента сопротивления.

Момент электромагнитный ПЭД определяется выражением:

$$M_E = -L_m p -$$

$$\left[ \begin{aligned} & i_A ((i_a \sin \Theta) + i_b \sin(\Theta + 120^\circ) + i_c \sin(\Theta - 120^\circ)) + \\ & + i_B (i_a \sin(\Theta - 120^\circ) + i_b \sin \Theta + i_c \sin(\Theta + 120^\circ)) + \\ & + i_C (i_a \sin(\Theta + 120^\circ) + i_b \sin(\Theta - 120^\circ) + i_c \sin \Theta) \end{aligned} \right].$$

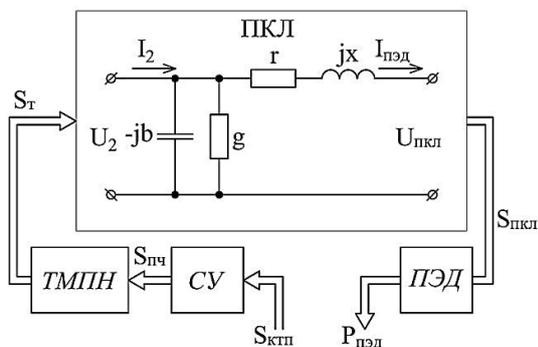


Рис. 1. Схема замещения погружной кабельной линии в составе УЭЦН для промышленной частоты 50 Гц

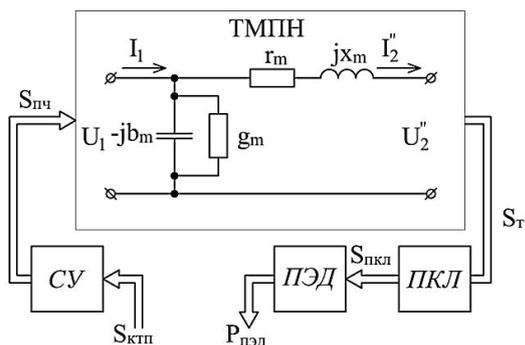


Рис. 2. Схема замещения нефтепромыслового трансформатора в составе УЭЦН

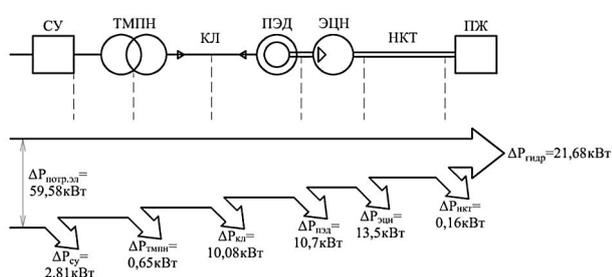


Рис. 3. Распределение активной мощности УЭЦН

Момент сопротивления  $M_C$  определяется характеристиками гидравлической подсистемы УЭЦН, при допущении об отсутствии упруговязких свойств, имеем: момент статический

$$M_C = CQ\omega + D\omega^2,$$

энергетическая характеристика

$$P = \omega^2(CQ + D\omega),$$

$$C = \frac{b_1}{\omega_{НОМ}^2}, \quad D = \frac{b_0}{\omega_{НОМ}^3},$$

где  $\omega_{НОМ}$  — номинальная угловая частота вращения насоса;  $b_0, b_1$  — паспортные коэффициенты насоса.

Для моделирования кабельной линии учитывается характер реактивной проводимости, ее омическое сопротивление и его температурные зависимости.

Для моделирования трансформатора учитываются:  $r$  — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток;  $x$  — индуктивное сопротивление рассеяния первичной и вторичной обмоток;  $b$  — индуктивная проводимость намагничивания;  $g$  — активная проводимость, учитывающая магнитные потери».

Соответственно, схемы замещения принимают вид, представленный на рис. 1, 2 [2].

По предложенной модели проведен расчет поэлементного распределения активной мощности в квазиустановившемся режиме работы УЭЦН, укомплектованной ЭЦНИ-160, ПЭД-35 (рис. 3). При расчете принято: коэффициент полезного действия УЭЦН 36,3%, кабель марки КРБК-3×25 [2].

Показательно, что всего около 36 % полученной УЭЦН электрической энергии идет на основной технологический процесс — извлечение пластовой жидкости. Основные потери энергии сосредоточены в двух элементах — электроцентробежном насосе и погружном электродвигателе. Это задает тренд повышения энергоэффективности всего УЭЦН — рациональный подбор элементов УЭЦН, учитывающих реальные энергетические характеристики ПЭД и других элементов УЭЦН в их взаимосвязях как в статике, так и в динамике.

Оптимальное решение выявленного распределения энергетических потерь имеет важнейшее значение для обеспечения качества функционирования всего комплекса в целом и определения принципов построения и настройки системы управления комплексом [13, 14].

В мировой и отечественной практике разрешение указанного выше противоречия приводит к отказу от нерегулируемого электропривода и применению различных типов регулируемого [3, 15]. Задача регулируемого привода здесь — минимизация потребляемой электрической энергии всего комплекса при сохранении требования основного технологического процесса. Одним из наиболее эффективных решений (по соотношению цена — качество) здесь будет регулируемый электропривод УЭЦН по системе преобразователь частоты (ПЧ) — ПЭД. В данном случае ПЭД конструктивно представляет собой асинхронный электрический двигатель с короткозамкнутым ротором.

Практическое применение ПЧ, применительно к УЭЦН, позволит [2–4]:

- повысить коэффициент полезного действия преобразования электрической энергии в УЭЦН и всей промышленной сети;
- снизить температуры активных элементов УЭЦН (например, обмотки ПЭД, кабель);
- оптимизировать электропотребление УЭЦН применительно к изменению режима работы;
- устранить броски пусковых токов, что существенно снизит ударные тепловые и ударные механические нагрузки;
- построить систему «умная скважина», объединяющую весь процесс управления от поставки электрической энергии до транспортировки нефти в товарный парк;
- управлять оптимальным объемом добычи нефти путем изменения частоты питающего напряжения, при этом отпадает необходимость дорогостоящей процедуры замены оборудования;
- «обеспечить энергосбережение в режимах раскочки и вывода скважин на режим»;
- «снизить вероятность парафинирования скважины при ее временном выводе»;

Влияние температуры скважинной среды на допустимые токовые нагрузки

Температура скважинной среды, °С	40			60			80			95		
	10	16	35	10	16	35	10	16	35	10	16	35
Сечение жилы кабеля, мм <sup>2</sup>	10	16	35	10	16	35	10	16	35	10	16	35
Допустимая нагрузка, А	100	120	>160	80	105	160	60	70	105	0	20	40

— «возобновить эксплуатацию законсервированных малодебитных скважин (10–5 м<sup>3</sup>/сут), которых в России насчитывается более 3 тысяч» [2];

— управлять отдельными показателями качества электрической энергии на входе системы управления УЭЦН в соответствии с динамическими режимами всей промысловой сети.

Особенность ЭТК УЭЦН — недоступность ПЭД (в рабочих режимах) для прямых измерений [16], что обостряет проблему предварительной послеремонтной идентификации электромагнитных параметров ПЭД при нестабильных характеристиках внешних воздействий.

В настоящей работе, для решения указанной проблемы, предложено модифицировать метод Левенберга – Марквардта в «многоскоростную» структуру:

$$x^{k+1} = x^k + \text{diag}(h^k) \cdot [E - a \cdot \text{diag}(h^k) \cdot A_t]^{-1},$$

где  $\text{diag}(h^k)$  — матрица шагов интегрирования, имеющая диагональное представление. Шаги интегрирования  $h_i^k$  здесь определяются локальными свойствами задачи идентификации в момент, соответствующий интервалу вычисления, и, как правило, различаются по величине:  $h_i^k \neq h_j^k$  при  $i \neq j$ . Предложенная «многоскоростная» модификация существенно снижает время счета при поиске глобального оптимума.

**Исследование влияния на качество функционирования ЭТК УЭЦН идентифицированных отклонений параметров послеремонтных ПЭД при вариациях внешних температурных воздействий.** Выше было показано, что послеремонтный ПЭД является ключевой частью исследуемых ЭТК, выполняет основную технологическую роль по преобразованию электрической энергии в механическую и передаче ее электроцентробежному насосу при решении задач оптимального регулирования его напора. ПЭД оказывает основное влияние на качество функционирования ЭТК УЭЦН, как единого комплекса энергопреобразования. Соответственно, система управления электроприводом ЭТК УЭЦН требует учета реальных энергетических характеристик ПЭД, которые существенно варьируются из-за особенностей существующих ремонтных технологий. Ранее было экспериментально показано, что разброс по таким параметрам ПЭД, как активные сопротивления цепи ротора, индуктивные сопротивления цепей ротора и статора могут достигать 25 % [10, 17]. В свою очередь, нелинейные зависимости параметров ТМПН, КЛ и ПЭД от температуры окружающей среды и характера нагрузки (табл. 1) усугубляют указанную ситуацию [18, 19].

Для оценки влияния температурных флуктуаций на эксплуатационные характеристики ЭТК УЭЦН

и оценки влияния на качество функционирования ЭТК УЭЦН идентифицированных отклонений параметров послеремонтных ПЭД при вариациях внешних температурных воздействий был проведен вычислительный эксперимент. В качестве показателей качества функционирования ЭТК УЭЦН приняты время выхода на установившийся режим и скольжение [3].

Математическая модель реализует систему уравнений, предложенную выше, и построена в среде MatLab для ЭТК УЭЦН в составе: ПЭД 1ЭД(Т)45-117-1000, кабель, насос, ТМПН, преобразователь частоты (ПЧ). ПЧ моделируется входным соотношением; частота питающего напряжения/действующее значение питающего напряжения.

Длина кабеля принята равной средней глубине погружения на месторождениях ХМАО – Югра, которая составляет значение три километра.

Характеристика гидравлической сети и энергетическая характеристика насоса приняты из условий независимости момента сопротивления от температуры.

Серия расчетов проводилась для трех сочетаний температур ПЭД и кабеля, обусловленных различной температурой пластовой жидкости. Температуры наземной части УЭЦН приняты постоянными. При каждом сочетании температур последовательно моделировался ЭТК УЭЦН, содержащий послеремонтный ПЭД с номинальными параметрами, послеремонтный ПЭД с максимальными отклонениями параметров от номинальных в большую сторону и послеремонтный ПЭД с максимальными отклонениями параметров в меньшую сторону. Для кабеля учитывались только температурные изменения параметров. ПЧ моделировал управление выходом на режим и расклиниванием.

Фрагменты вычислительных экспериментов при условии постоянного момента, создаваемого механической частью ЭТК УЭЦН, приведены на рис. 4 – 6 и в табл. 2. В табл. 2 указаны следующие данные:

$\Delta U_{гв}$ , В — фазное напряжение ПЭД в установившемся режиме;

$\Delta U_{гв}^{пуск}$ , В — фазное напряжение ПЭД в пусковом режиме;

$\Delta U_{к}^{узм}$ , В — падение напряжения на кабеле в установившемся режиме;

$I_{узм}$ , А — фазный ток УЭЦН в установившемся режиме;

$s$ , % — скольжение ПЭД;

$M_{max}$ , Н·м — максимальный момент ПЭД;

$t_{узм}$ , сек — время выхода УЭЦН на установившийся режим;

«Ном» — параметры модели ПЭД соответствуют паспортным

«Откл + 25» — параметры модели ПЭД отклоняются от паспортных в большую сторону на 25 %;

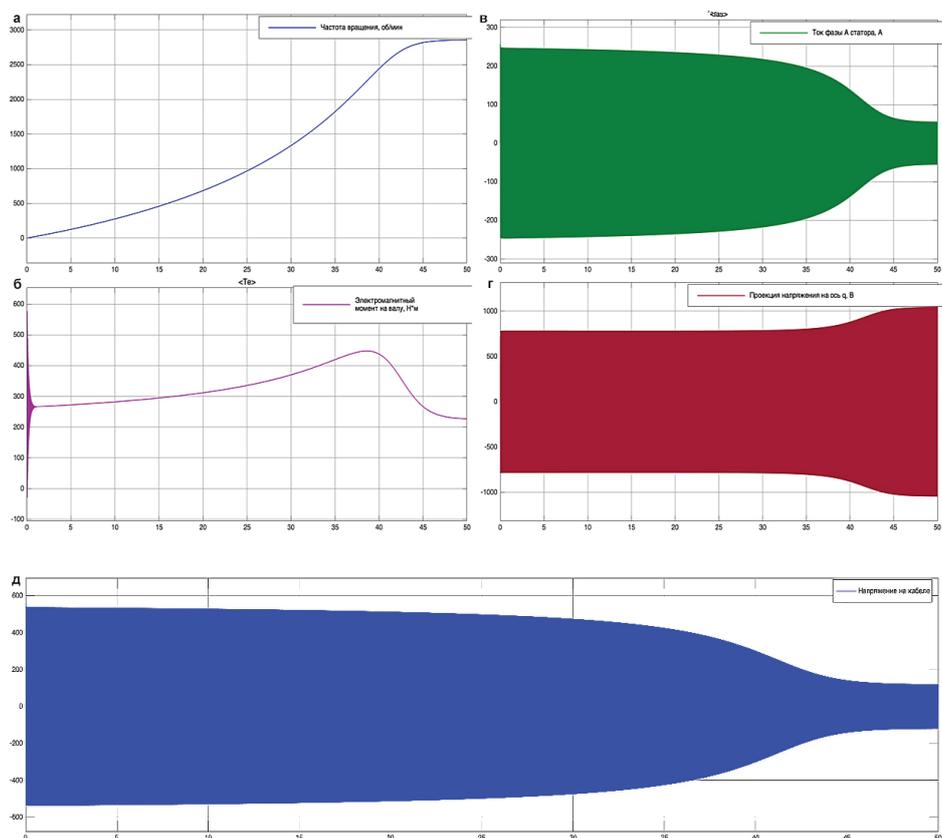


Рис. 4. Динамика пуска ЭТК УЭЦН при температуре внешней среды 25 °С, а — частота вращения; б — момент электромагнитный; в — фазный ток; г — напряжение на входной колодке ПЭД; д — падение напряжения на кабеле

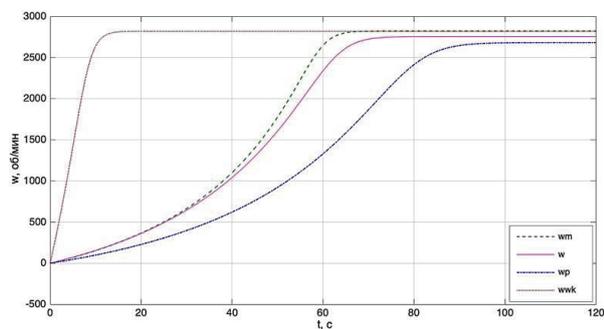


Рис. 5. Частота вращения насоса ЭТК УЭЦН при температуре пластовой жидкости 70 °С;  $w$  — вычислительный эксперимент № 7;  $w_p$  — вычислительный эксперимент № 8;  $w_m$  — вычислительный эксперимент № 9;  $w_{wk}$  — вычислительный эксперимент, параметры модели ПЭД соответствуют паспортным, температура активной части ПЭД 150 °С, падение напряжения на кабеле не учитывается

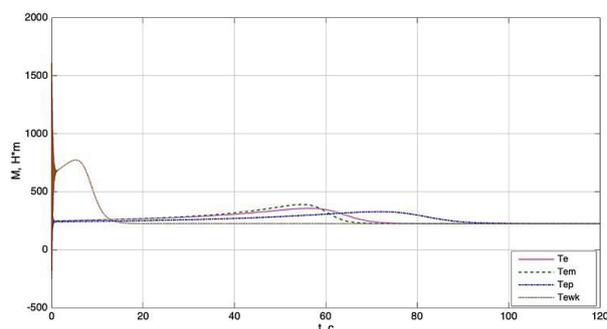


Рис. 6. Момент электромагнитный при пуске ЭТК УЭЦН при температуре пластовой жидкости 70 °С;  $T_e$  — вычислительный эксперимент № 7;  $T_{ep}$  — вычислительный эксперимент № 8;  $T_{em}$  — вычислительный эксперимент № 9;  $T_{ewk}$  — вычислительный эксперимент, параметры модели ПЭД соответствуют паспортным, температура активной части ПЭД 150 °С, падение напряжения на кабеле не учитывается

«Откл–25» — параметры модели ПЭД отклоняются от паспортных в меньшую сторону на 25 %;  
 $t_{K1}$ , °С — установившаяся температура кабеля;  
 $t_{D1}$ , °С — установившаяся температура активной части ПЭД;  
 $\Delta t_{ycm}$ , % — отклонение времени выхода на установившийся режим.

Фрагменты вычислительных экспериментов при условии постоянного действующего значения тока ЭТК УЭЦН приведены в табл. 3.

**Обсуждение результатов исследования.** Среднеквадратичные отклонения выходных параметров ЭТК УЭЦН, полученных по паспортным данным, от

оценок, полученных по параметрам модели, идентифицированной с учетом температурных флуктуаций, составляют по скольжению 17,0 %, по мощности на валу 3,7 %, в диапазоне температур от 25 °С до 150 °С, при поддержании неизменным действующего значения тока в силовой цепи ЭТК УЭЦН. Отклонения существенно варьируются в зависимости от задачи решаемой ЭТК УЭЦН: поддержание заданного момента, изменение частоты вращения при выходе на заданный режим, расклинивание и другие.

**Выводы.** В результате проделанной работы по исследованию функционирования ЭТК УЭЦН при

Вычислительный эксперимент. Отклонения параметров ЭТК УЭЦН при вариациях внешних температурных воздействий

№ эксперимента	$t_{кр}$ , °C	$t_{пр}$ , °C	Тип модели ПЭД	$\Delta U_{гв}$ , В	$\Delta U_{гв}^{пуск}$ , В	$\Delta U_{кв}$ , В	$I_{усм}$ , А	$s$ , %	$M_{max}$ , Н×м	$t_{усм}$ , сек	$\Delta t_{усм}$ , %
1	25	25	«Ном»	740,4	556	85,55	39,24	4,86	447	49,8	
2	25	25	Откл + 25	740,7	602	83,03	38,09	6,03	413	59,7	+20
3	25	25	Откл - 25	739,5	492	91,41	41,93	3,53	483	48,9	-2
4	70	100	«Ном»	722,4	521	104,6	40,24	6,70	386	64,5	
5	70	100	Откл + 25	717,4	556	107,9	39,52	8,70	352	83,2	+29
6	70	100	Откл - 25	726,7	472	104,9	42,46	4,90	424	56,1	-13
7	100	150	«Ном»	711,4	507	116,2	40,9	8,13	356	77,6	
8	100	150	Откл + 25	705,4	542	120,5	40,41	10,56	327	102	+31
9	100	150	Откл - 25	716,2	462	115,8	42,92	3,90	389	68	-12

Таблица 3

Отклонения параметров ЭТК УЭЦН при вариациях внешних температурных воздействий, при действующем значении тока 26 А

	Погружной электродвигатель ЭДТ45	$I$ , А	$\Delta U_{кабелл}$ , В	$U_{пэд}$ , В	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %	$n_2$ , об/мин	$s$ , о.е.
$t = 25^\circ\text{C}$	паспорт	26	58,15	941,8	30,86	83,71	2881,8	0,0394
	эксперимент	26	59,36	940,6	29,43	82,55	2909,7	0,0301
Отклонение при 25 °C, %			2,08	0,13	4,63	1,39	0,97	23,60
$t = 100^\circ\text{C}$	паспорт	26	75,26	924,7	28,87	82,03	2839,5	0,0535
	эксперимент	26	76,94	923,1	28,38	80,12	2845,5	0,0515
Отклонение при 100 °C, %			2,23	0,17	1,70	2,33	0,21	3,74
$t = 150^\circ\text{C}$	паспорт	26	86,66	913,3	28,3	80,71	2810,9	0,0630333
	эксперимент	26	88,67	911,3	27,76	78,89	2817	0,061
Отклонение при 150 °C, %			2,32	0,22	1,91	2,25	0,22	3,23

вариациях внешних температурных воздействий показано, что:

— рациональный подбор элементов ЭТК УЭЦН, учитывающих реальные энергетические характеристики ПЭД в их взаимосвязях, имеет важнейшее значение для обеспечения качества функционирования всего ЭТК УЭЦН добычи нефти;

— построение электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем требует наличия подблока идентификации параметров

и блока оценивания переменных состояния ПЭД, что позволит достоверно прогнозировать влияние внешних воздействий, в том числе и температурных, на характеристики ЭТК УЭЦН.

#### Библиографический список

1. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2000. 654 с.

2. Аникин В. В., Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М. Электро-технологические установки для нефтедобычи: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 160 с.
3. Гарганеев А. Г., Каракулов А. С., Ланграф С. В. Электропривод запорной арматуры: моногр. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 157 с.
4. Букреев В. Г., Сипайлова Н. Ю., Сипайлов В. А. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 3. С. 75–84.
5. Глазырин А. Н., Аникин В. В., Буньков Д. С., Антяскин Д. И., Старцева Ю. Н., Ковалев В. З., Хамитов Р. Н., Кладиев С. Н., Филипас А. А. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 1. С. 148–157. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2456.
6. Ковалев В. З., Хамитов Р. Н., Кузнецов Е. М., Аникин В. В., Бессонов В. О. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 36–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-36-40.
7. Ковалев В. З., Щербаков А. Г., Архипов А. В., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. Идентификация параметров схемы замещения погружных асинхронных двигателей // Промышленная энергетика. 2012. № 1. С. 38–41.
8. Anikin V. V., Kuznetsov Ye. M. Determining computational aspects of submersible electric centrifugal pump installations electric motors parameters // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. 16602427. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819034.
9. Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Рулевский В. М. Нелинейная модель системы электропитания погружных объектов с учетом изменения длины кабель-троса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 11. С. 114–123.
10. Kovalev V. Z., Arhipova O. V., Esin S. S., Scherbakov A. G., Tatevosyan A. A. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.
11. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
12. Беспалов В. Я., Мощинский Ю. А., Петров А. П. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат // Электричество. 2002. № 8. С. 33–39.
13. Ковалев В. З., Бородацкий Е. Г. Эффективное использование энергии в насосных установках нефтеперекачивающих станций // Промышленная энергетика. 2000. № 1. С. 26–28.
14. Sukhachev I. S., Gladkikh T. D., Sushkov V. V. An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. P. 1–5. 16602457. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819089.
15. Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed-loop control system for rotating field machines // Siemens Review. 1972. Vol. 34, no. 3. P. 217–220.
16. Kovalev V. Z., Bessonov V. O., Kuznetsov Y. M., Pavlov D. O. Direct measurement of rotational rate of asynchronous electrical submersible motors for oil production // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.86014718601471.
17. Godovnikov E. A., Kovalev V. Z., Usmanov R. T., Andreeva E. G. Identification of parameters of power circuits pulse energy conversion systems of electromechanical equipment // Journal of Physics: Conference Series. 2019. 052007. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052007.
18. Castellanos M. B., Serpa A. L., Biazussi J. L. [et al.]. Fault identification using a chain of decision trees in an electrical submersible pump operating in a liquid-gas flow // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 184. 203945066. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106490.
19. Xu Y., Yang Y., Ai M. Research on heat transfer of submersible motor based on fluid network decoupling // International journal of heat and mass transfer. 2019. Vol. 136. P. 213–222. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.002.

---

**ХАМИТОВ Рустам Нуриманович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).  
 SPIN-код: 9576-1114  
 AuthorID (РИНЦ): 548158  
 ORCID: 0000-0001-9876-5471  
 AuthorID (SCOPUS): 24467903000  
 ResearcherID: D-1001-2016  
 Адрес для переписки: apple\_27@list.ru

**АНИКИН Василий Владимирович**, соискатель по кафедре «Электрическая техника» ОмГТУ.  
**КОВАЛЕВ Владимир Захарович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Энергетика» Югорского государственного университета (ЮГУ), г. Ханты-Мансийск.  
 SPIN-код: 4571-7212  
 AuthorID (РИНЦ): 345037  
 ORCID: 0000-0002-4512-6868  
 ResearcherID: K-6022-2012  
 Адрес для переписки: vz\_kovalev@mail.ru

**ПАРАМЗИН Александр Олегович**, магистрант направления «Электроэнергетика и электротехника», младший научный сотрудник ЮГУ, г. Ханты-Мансийск.  
 SPIN-код: 2889-8437  
 AuthorID (РИНЦ): 1021763  
 Адрес для переписки: prado1404@yandex.ru

#### Для цитирования

Хамитов Р. Н., Аникин В. В., Ковалев В. З., Парамзин А. О. Исследование функционирования электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов при вариациях внешних температурных воздействий // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 19–25. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-19-25.

Статья поступила в редакцию 16.06.2020 г.

© Р. Н. Хамитов, В. В. Аникин, В. З. Ковалев, А. О. Парамзин