

УДК 621.313.333:62–83

## РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА С ОПЕРАТИВНЫМ МОНИТОРИНГОМ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Глазырин Александр Савельевич<sup>1</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Афанасьев Кирилл Сергеевич<sup>1</sup>,  
afanks@tpu.ru

Тимошкин Вадим Владимирович<sup>1</sup>,  
timoshkinvv@tpu.ru

Слепнёв Иван Георгиевич<sup>1</sup>,  
slepnev.i@mail.ru

Полищук Владимир Иосифович<sup>2</sup>,  
polischuk\_vi@mail.ru

Sándor Halász<sup>3</sup>,  
halasz.sandor@vet.bme.hu

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет,  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

<sup>3</sup> Будапештский университет технологии и экономики,  
Венгрия, H-1111, Будапешт, Jozef út. 18.

**Актуальность.** Эксплуатация установок электроцентробежных насосов для скважинной добычи нефти осложняется рядом факторов, к которым в первую очередь следует отнести газовые включения в откачиваемой жидкости, присутствие асфальтосмолопарафиновых отложений, вынос песка и других абразивных частиц, осаждение различных солей на рабочие органы погружных насосов, в частности таких, как карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$ , сульфат кальция  $\text{CaSO}_4$ , сульфат бария  $\text{BaSO}_4$  и хлорид натрия  $\text{NaCl}$ . По мере работы погружного насоса в этих условиях постепенно увеличивается момент сопротивления нагрузки с общим снижением коэффициента полезного действия насоса вплоть до частичного или полного заклинивания вала. Увеличение момента сопротивления при подклинивании дополнительно статически нагружает и стенки насосно-компрессорных труб. Наличие газовых включений приводит к нарушению стационарности потока закачиваемой жидкости, и вследствие этого появляются дополнительные напряжения знакопеременного характера в стенках насосно-компрессорных труб. В ряде случаев происходит усталостное разрушение насосно-компрессорных труб и «полёт» погружного оборудования в устье скважины. Исходя из вышеописанного, появляется необходимость разработки методов и средств мониторинга момента сопротивления нагрузки на валу погружного асинхронного двигателя в режиме реального времени. Прямое измерение с помощью датчика момента или восстановления оценок момента по электрическим измерениям непосредственно на клеммах погружного асинхронного двигателя не представляется целесообразным по технико-экономическим соображениям. Наиболее перспективным является разработка наблюдателя полного порядка, учитывающего свойства погружного кабеля с помощью замеров токов и напряжений на выходе повышающего трансформатора – на входе кабельной линии. Исследование работоспособности такого наблюдателя оригинальной структуры представляет научный и практический интерес.

**Цель исследования:** разработка и апробирование на математических моделях оригинальной структуры наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления нагрузки для погружных асинхронных двигателей, подключенных к источнику питания по длинному кабелю.

**Методы** исследования основаны на использовании теории наблюдателей полного порядка, численных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, методов численного интегрирования, теории автоматического управления, теории фильтрации сигналов.

**Результаты.** Предложена оригинальная структура наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления нагрузки на валу погружного асинхронного двигателя, подключенного к источнику питания по длинному кабелю. Для функционирования наблюдателя необходима информация о величине токов и напряжений на входе питающего кабеля, а также сигналы об оценках параметров схемы замещения и момента инерции от дополнительного устройства – идентификатора параметров (в данной статье не рассматривался). Продемонстрировано, что структура наблюдателя предоставляет пользователю оценки ортогональных проекций в осях  $\alpha$ ,  $\beta$  потокосцепления ротора, угловой частоты вращения, крутящего момента и момента сопротивления нагрузки на валу погружного асинхронного двигателя в реальном времени, как в установившихся, так и в переходных режимах: пуска, наброса и сброса нагрузки. Достоинствами наблюдателя являются высокие показатели качества оценивания при малом количестве настраиваемых параметров и относительной простоте настройки. Показано, что применение фильтров-постфильтрато-

ров по схеме Баттерворта улучшает качество оценки момента сопротивления нагрузки на валу погружного электродвигателя. Наличие сигналов оценок проекций потокоцепления ротора и угловой частоты вращения ротора позволяет рекомендовать такой наблюдатель для электроприводов, выполненных по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель». Исследования показали, что интегральные погрешности оценивания при отработке наблюдателем затяжных переходных процессов находятся на приемлемом уровне: по оценке угловой скорости, не превышают 0,5 %, а по оценке момента нагрузки на валу не более 19 %. Ошибка оценивания в установившихся режимах и при отсутствии изменений параметров составляет менее 1 %.

**Ключевые слова:**

Скважина, электроцентробежный насос, длинный кабель, погружной асинхронный двигатель, наблюдатель полного порядка, оценка угловой скорости, оценки проекций потокоцепления ротора в ортогональной системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ , мониторинг момента сопротивления.

**Введение**

Российская федерация является крупным экспортером газа и нефти. На мировом рынке доля России по экспорту нефтепродуктов составляет 10 % от общего объема [1]. Современные прогнозы показали, что спрос на энергоресурсы с каждым годом увеличивается.

На данный момент положение России на мировом рынке «черного золота» можно охарактеризовать как сложное. В 2016 г. цены на нефть опускались до 27 долларов за баррель [2]. Крупные нефтедобывающие компании на территории России пришли к выводу – чтобы остаться на плаву необходимо снижать себестоимость добычи нефти. Конкурировать России по добыче «черного золота» со странами Персидского залива достаточно сложно ввиду более благоприятных условий в этом регионе: преобладание легких фракций в составе нефти, низкая глубина её залегаания, теплый климат, транспортная доступность месторождений.

Для повышения эффективности в нефтяной промышленности необходимо повышать надежность, энергосбережение и качество регулирования силовых установок [3].

К перспективным направлениям исследований относится повышение эффективности эксплуатации установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). При работе в агрессивных условиях технико-экономические показатели УЭЦН меняются, что приводит к увеличению затрат и к снижению общего объема добычи нефти на месторождении. Продолжительная эксплуатация УЭЦН в неблагоприятных условиях может привести к выходу установки из строя ранее срока его службы. Анализ работы [4] показал, что основными причинами отказов УЭЦН являются: 8...22,5 % засорение электроцентробежных насосов (ЭЦН) механическими примесями; засорение ЭЦН пропантом 5...10 %, снижение сопротивление изоляции 8...10 % [5]; снижение производительности (износ) 6...17,5 %; заклинивание установки 9...18 %, негерметичность насосно-компрессорных труб (НКТ) 6...8 %; снижение притока из пласта 4...7 %; другие причины 7...15 %.

Существует два основных типа заклинивания вала насоса – мягкое и жесткое. К жесткому заклиниванию вала УЭЦН относится образование солеотложений в рабочих органах центробежного насоса. При попытке устранить такое заклинива-

ние может произойти срез шпонок или деформация вала [6]. Мягкое заклинивание обычно вызвано заиливанием, засорением и устраняется путем реверса погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД) с постепенным увеличением момента. Подобная проблема заклинивания роторов (их взаимного сцепления) возникает и в центрифугах со шнековой выгрузкой осадка при подготовке буровых растворов, а также при очистке растворов урана от механических примесей в ядерно-химической отрасли [7].

Анализ механических характеристик насоса и погружного двигателя при заклинивании показал, что увеличение момента на валу двигателя возможно до максимального значения, равного критическому моменту. В предельных режимах работы обмотки погружного электродвигателя подвержены сильному тепловому нагреву, что снижает допустимую продолжительность работы ПЭД в режиме перегрузки по току и моменту [8]. Помимо этого существенные знакопеременные колебания момента на валу двигателя воспринимаются колонной НКТ, в стенках которых постепенно накапливаются усталостные напряжения, что в конечном итоге может привести к аварийному разрыву труб по самому нагруженному сечению и к так называемому «полету», т. е. неконтролируемому падению части НКТ с ПЭД в скважину.

Для контроля расклинивания вала ЭЦН необходимо измерять момент на валу ПЭД и его угловую скорость. Установка дополнительного датчика момента и датчика угловой скорости на вал погружного двигателя приведет как к дополнительным трудностям в наладке и эксплуатации блока погружной телеметрии, так и к значительному увеличению стоимости УЭЦН [9]. Зарубежные [10–14] и отечественные работы показали [15–17], что момент на валу двигателя и угловую скорость можно успешно определять косвенными методами с помощью наблюдателя на основе измеренных данных с датчиков токов и напряжений. В упомянутых исследованиях влияние кабельной линии на работу наблюдателя подробно не рассматривалось. В виду того, что длина кабельной линии может достигать величины более двух километров, измеренные на поверхности токи и напряжения на входе питающего кабеля будут отличаться от тех же величин, которые были бы получены путем непосредственного измерения на клеммах по-

грузного двигателя. Для решения данной проблемы необходимо разработать работоспособную структуру наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей с учетом влияния кабельной линии и проверить эту структуру на адекватность получаемых оценок.

**Разработка и проверка работоспособности метода оценивания угловой скорости и момента на валу погружного двигателя**

Математическая модель наблюдателя момента нагрузки и угловой частоты вращения представлена в виде двух систем дифференциальных уравнений (1) и (2), где в (1) учитываются особенности погружного асинхронного двигателя, а в (2) – особенности кабельной линии.

Система дифференциальных уравнений (1) имеет пять переменных состояния: оценка проекций вектора тока статора  $\hat{i}_{1\alpha}, \hat{i}_{1\beta}$ , оценки проекции вектора потокосцепления ротора  $\hat{\Psi}_{2\alpha}, \hat{\Psi}_{2\beta}$ , оценка угловой скорости  $\hat{\omega}$  ротора АД, выходной сигнал интегратора  $\hat{U}_{л2.и}$ , который позволяет добиться приемлемых показателей оценивания частоты вращения и момента нагрузки.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\hat{i}_{1\alpha}(t)}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} \hat{U}_{1\alpha-k}(t) - \frac{R_2}{\sigma L_1} \hat{i}_{1\alpha}(t) + \frac{R_2' L_m}{\sigma L_1 L_2} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \\ &+ \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \frac{k_{л1\alpha}}{\sigma L_1} (\hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \hat{i}_{1\alpha}(t)); \\ \frac{d\hat{i}_{1\beta}(t)}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_1} \hat{U}_{1\beta-k}(t) - \frac{R_2}{\sigma L_1} \hat{i}_{1\beta}(t) + \frac{R_2' L_m}{\sigma L_1 L_2} \hat{\Psi}_{2\beta}(t) - \\ &- \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \frac{k_{л1\beta}}{L_1} (\hat{i}_{1k-\beta}(t) - \hat{i}_{1\beta}(t)); \\ \frac{d\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)}{dt} &= -\frac{R_2'}{L_2} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{i}_{1\alpha}(t) - z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\beta}(t); \\ \frac{d\hat{\Psi}_{2\beta}(t)}{dt} &= -\frac{R_2'}{L_2} \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \frac{R_2' L_m}{L_2} \hat{i}_{1\beta}(t) + z_p \hat{\omega} \hat{\Psi}_{2\alpha}(t); \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} &= \frac{3L_m z_p k_{л2}}{2J_2 L_2} \left( \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) (\hat{i}_{1k-\beta}(t) - \hat{i}_{1\beta}(t)) - \right. \\ &\left. - \hat{\Psi}_{2\beta}(t) (\hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \hat{i}_{1\alpha}(t)) \right) + \\ &+ U_{л2.и}(t); \\ \frac{d\hat{U}_{л2.и}(t)}{dt} &= \frac{1}{T_{л2}} \frac{3L_m z_p}{2J_2 L_2} \left( \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) (\hat{i}_{1k-\beta}(t) - \hat{i}_{1\beta}(t)) - \right. \\ &\left. - \hat{\Psi}_{2\beta}(t) (\hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \hat{i}_{1\alpha}(t)) \right), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\hat{U}_{1\alpha-k}(t), \hat{U}_{1\beta-k}(t)$  – оценки проекций вектора напряжения в осях  $\alpha, \beta$  на клеммах погружного асинхронного двигателя – на выходе кабельной линии;  $T_{л2}, k_{л1\alpha}, k_{л1\beta}, k_{л2}$  – настроечные коэффициенты наблюдателя;  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки статора;  $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки ротора;  $L_{1\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора;  $L_{2\sigma}'$  – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора;  $L_m$  – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воз-

душном зазоре машины;  $R_2'$  – приведенное сопротивление ротора;  $R_1$  – активное сопротивление статора;  $z_p$  – число пар полюсов;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$  – коэф-

фициент рассеяния;  $R_2 = R_1 + R_2' \frac{L_m^2}{L_2^2}$  – эквивалентное активное фазное омическое сопротивление;  $T_2 = \frac{\sigma L_1}{R_2}$  – электромагнитная постоянная времени статора.

Общая система дифференциальных уравнений, учитывающая влияние кабельной линии в нормальной форме Коши:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\hat{i}_{1k-\alpha}(t)}{dt} &= \\ &= \frac{1}{L_K} [U_{вх-\alpha}(t) - \hat{i}_{1k-\alpha}(t) R_{1K} - \hat{U}_{1\alpha-k}(t)]; \\ \frac{d\hat{U}_{1\alpha-k}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_K} \left[ \hat{i}_{1k-\alpha}(t) - \frac{\hat{U}_{1\alpha-k}(t)}{R_{2K}} - \hat{i}_{1\alpha}(t) \right]; \\ \frac{d\hat{i}_{1k-\beta}(t)}{dt} &= \\ &= \frac{1}{L_K} [U_{вх-\beta}(t) - \hat{i}_{1k-\beta}(t) R_{1K} - \hat{U}_{1\beta-k}(t)]; \\ \frac{d\hat{U}_{1\beta-k}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_K} \left[ \hat{i}_{1k-\beta}(t) - \frac{\hat{U}_{1\beta-k}(t)}{R_{2K}} - \hat{i}_{1\beta}(t) \right], \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $\hat{i}_{1k-\alpha}(t), \hat{i}_{1k-\beta}(t)$  – оценки проекций вектора тока в кабельной линии;  $\hat{U}_{1\alpha-k}(t), \hat{U}_{1\beta-k}(t)$  – оценки проекций вектора напряжения на выходе кабельной линии;  $R_{1K}$  – активное сопротивление кабельной линии;  $L_K$  – индуктивное сопротивление кабельной линии;  $C_K$  – емкостное сопротивление кабельной линии;  $R_{2K}$  – сопротивление изоляции.

На основе дифференциальных уравнений составлена структурная схема наблюдателя (рис. 1), где электромагнитная постоянная времени ротора

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}.$$

**Проверка адекватности работы идентификатора угловой скорости и момента на валу погружного двигателя на имитационной модели**

Для проверки работоспособности наблюдателя угловой скорости был выбран погружной электродвигатель ПЭДН 40–117 [18] с параметрами схемы замещения, приведёнными в табл. 1.

При моделировании был выбран погружной кабель КЛБП-90 с параметрами, представленными в табл. 2, который активно используется для погружных электродвигателей в нефтяной промышленности. Электрическое сопротивление изоляции, пересчитанное из погонного сопротивления на 1 км длины, составило 2500 МОм.

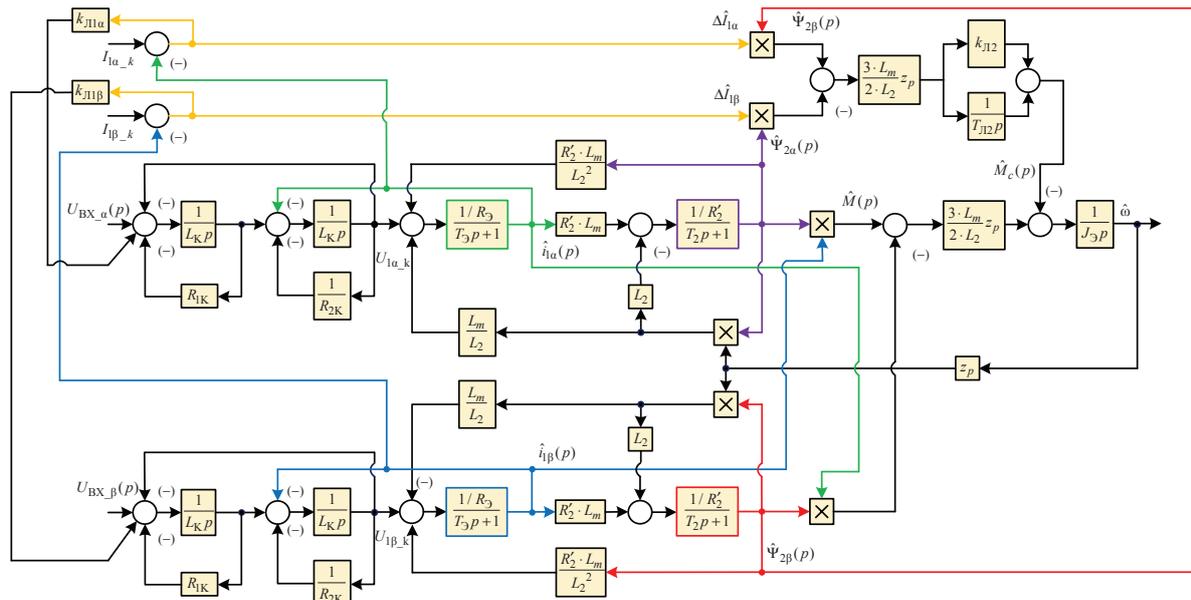


Рис. 1. Структурная схема наблюдателя полного порядка для погружного асинхронного двигателя, подключенного к источнику питания по длинному кабелю

Fig. 1. Schematic structure of a full order state observer for submersible induction motor power supplying from long cable

Таблица 1. Параметры погружного асинхронного электродвигателя ПЭДН 40–117

Table 1. Parameters of submersible induction motor PEDN 40–117

$R_1$ , Ом/Ohm	$L_{1\sigma}$ , мГн/mH	$R_2'$ , Ом/Ohm	$L_{2\sigma}'$ , мГн/mH	$L_m$ , мГн/mH	$J$ , кг·м <sup>2</sup> /kg·m <sup>2</sup>	$Z_p$
2,995	8,493	1,167	0,011	0,211	2,63	2

Таблица 2. Параметры схемы замещения погружного кабеля марки КПБП

Table 2. Parameters of circuit diagram for KPBP type long cable

Длина, м/Length, m	$R_{1к}$ , Ом/Ohm	$L_k$ , мГн/mH	$C_k$ , мкФ/μF
2000	2,2	1,23	1,19

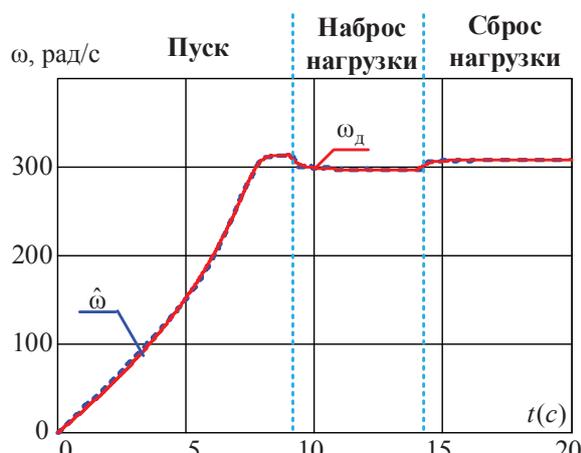


Рис. 2. Переходные процессы угловой скорости ротора ПЭД и ее оценки

Fig. 2. Transient processes of submersible induction motor speed and speed estimation

На рис. 2 представлены переходные процессы угловой скорости ротора ПЭД и ее оценки, из которых видно, что наблюдатель обрабатывает траекторию пуска, наброса и сброса нагрузки. Максимум частичного интеграла для расчёта ошибки оценивания по угловой скорости наблюдателя находится в начале процесса пуска, затем величина частичного интеграла постепенно снижается (рис. 3).

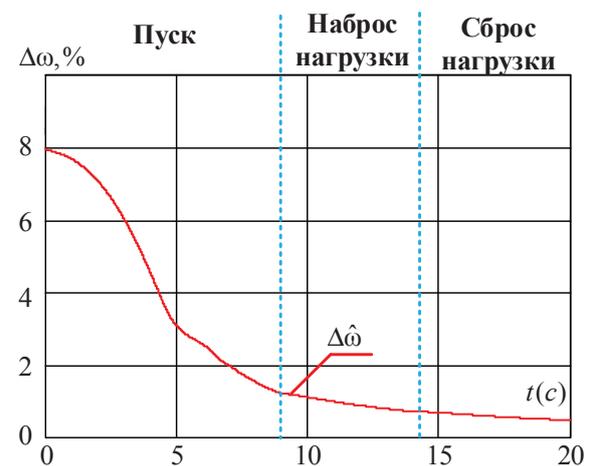


Рис. 3. Переходный процесс частичных интегралов для расчета интегральной ошибки оценивания по скорости

Fig. 3. Transient process of partial integrals for calculating the integral error of speed estimation

Из рис. 4 видно, что в переходном процессе оценки момента сопротивления нагрузки присутствует колебательная составляющая, которая существенно влияет на интегральную ошибку оценивания (рис. 5). Для уменьшения ошибки оценива-

ния было предложено ввести постфильтрацию сигнала оценивания момента сопротивления нагрузки по схеме Баттерворта. На рис. 4, 5 представлены сигналы оценки  $M_{c01}$  и интегральной ошибки  $\Delta M_{c01}$  без фильтрации,  $M_{c02}$ ,  $\Delta M_{c02}$  – сигналы, полученные с первой ступени фильтра-постфильтратора, где постоянная времени фильтра  $T_{\Phi 1}=0,1$  с;  $M_{c03}$ ,  $\Delta M_{c03}$  – сигналы, полученные со второй ступени фильтра-постфильтратора, где постоянные времени первой и второй ступеней  $T_{\Phi 1}=0,1$  с,  $T_{\Phi 2}=0,1$  с;  $M_{c04}$ ,  $\Delta M_{c04}$  – сигналы, полученные с третьей ступени фильтра-постфильтратора, где постоянные времени первой, второй и третьей ступеней  $T_{\Phi 1}=0,1$  с,  $T_{\Phi 2}=0,1$  с,  $T_{\Phi 3}=0,1$  с.

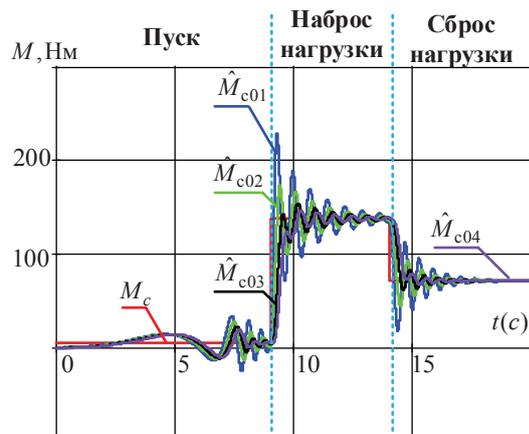


Рис. 4. Переходные процессы сигнала момента нагрузки на валу и его оценок на различных ступенях фильтра-постфильтратора

Fig. 4. Transient processes of the load torque signal on the shaft and its estimations at different stages of the filter-post-filter

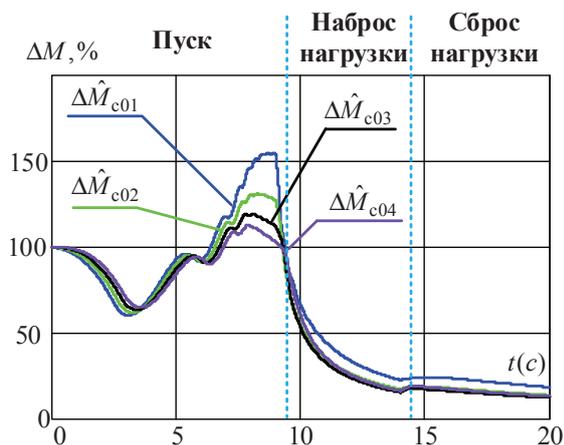


Рис. 5. Переходные процессы частичных интегралов для расчета интегральной ошибки оценивания момента нагрузки на различных ступенях постфильтратора

Fig. 5. Transient process of partial integrals for calculating the integral error of the load torque estimation at different stages of the filter-post-filter

На рис. 6. представлены переходные процессы вспомогательных координат для получения итоговых оценок угловой частоты вращения и момента нагрузки. Как в оценке результирующего модуля

тока, так и в оценке потокосцепления присутствует небольшие колебания.

Рис. 7 показывает, что с учётом влияния кабельной линии напряжение на клеммах двигателя меняется в зависимости от текущей нагрузки на валу двигателя.

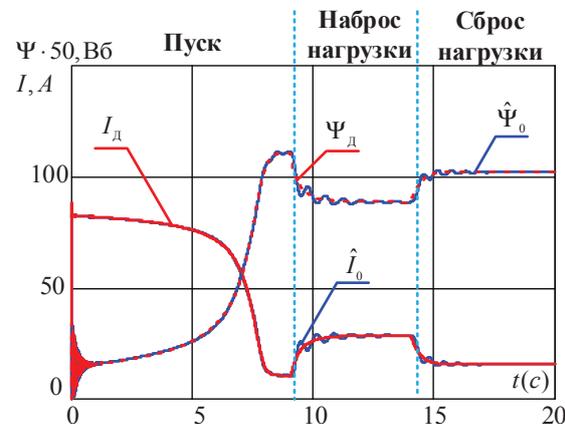


Рис. 6. Переходные процессы результирующих модулей векторов тока статора и потокосцепления ротора и их оценок

Fig. 6. Transient processes of resulting modules of stator current vectors and rotor flux vectors and their estimations

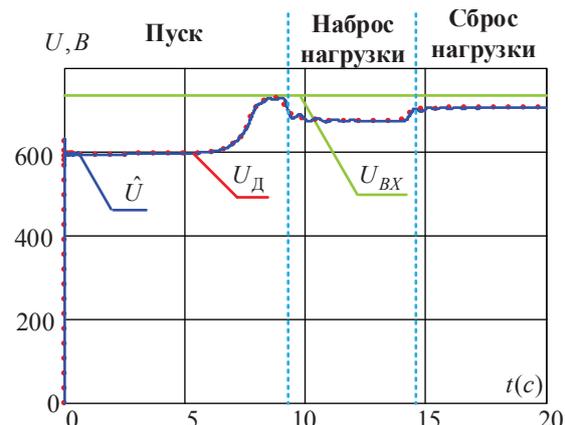


Рис. 7. Переходные процессы результирующих модулей векторов питающего напряжения, напряжения на клеммах погружного асинхронного двигателя и его оценки

Fig. 7. Transient processes of the resulting modules of supply voltage vectors, voltage at the terminals post of a submersible induction motor and their estimations

Эффективность работы наблюдателя угловой скорости и момента нагрузки подтверждают данные табл. 3. Максимальная ошибка оценивания угловой скорости и момента нагрузки в статике не превышает 1 %, а в динамике не более 20 %. Вычисление интегральной ошибки в динамике производилось по следующему выражению:

$$\Delta \omega_{\text{и}} = \frac{\int_{t_{\text{НАЧ}}}^{t_{\text{КОНЕЧ}}} |\omega(t) - \hat{\omega}(t)| dt}{\int_{t_{\text{НАЧ}}}^{t_{\text{КОНЕЧ}}} |\omega(t)| dt} \cdot 100 \%,$$

где  $t_{нач}$  и  $t_{конеч}$  – начальный и конечный момент интервала интегрирования в течение переходного процесса.

**Таблица 3.** Сводная таблица погрешностей оценивания угловой скорости и момента нагрузки на валу погружного электродвигателя в статике и динамике

**Table 3.** Table of errors in estimation of speed and load torque on the shaft of a submersible induction motor in static and dynamic

Статика/Static		Динамика/Dynamic	
$\Delta\omega_{и}$	$\Delta M$	$\Delta\omega_{и}$	$\Delta M_{и}$
%			
0,002	0,1777	0,4774	18,62
0,002	0,1529	0,4774	13,99
0,002	0,024	0,4774	12,54
0,002	0,033	0,4774	13,39

#### Рекомендуемые меры по повышению эффективности разработанного наблюдателя при программно-алгоритмической реализации

Внедрение предложенного наблюдателя в технологический процесс механизированной добычи нефти с помощью установок ЭЦН предполагает большие перспективы повышения эффективности добычи при учёте особенностей компоновки силового канала электропривода. При программно-алгоритмической реализации разработанного наблюдателя необходимо учитывать следующие рекомендации:

1. Следует обеспечить существенное преобладание основной гармоники в спектральных составах тока и напряжения в питающем кабеле и в статоре погружного асинхронного двигателя. В настоящее время для этого во многих отечественных и зарубежных УЭЦН применяют специальные устройства, так называемые «синус-фильтры», которые включаются между выходами автономного инвертора напряжения, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции, и входными обмотками повышающего трансформатора [19, 20]. Несоблюдение этого требования может вызвать необходимость рассмотрения волновых процессов в погружном кабеле, что существенно усложнит как структуру наблюдателя, так и процесс его настройки.
2. Работоспособность наблюдателя предложенной структуры может быть гарантирована только при условии поступления в наблюдатель в ре-

жиме реального времени сигналов об оценках параметров схемы замещения и момента инерции от дополнительного устройства – идентификатора параметров (в данной статье не рассматривался). Этот идентификатор авторы рекомендуют выполнять по методике, изложенной в статье [21].

#### Выводы

1. Показана актуальность и целесообразность разработки наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей, как перспективного средства профилактики заклинивания вала электроцентробежных насосов при добыче нефти в осложнённых условиях.
2. Разработана структура наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей, учитывающая параметры схемы замещения и переменные состояния питающего кабеля – тока на входе и напряжения на выходе.
3. Проверка работоспособности разработанного наблюдателя на основе математического моделирования погружных асинхронных электродвигателей с учётом влияния длинного кабеля показала, что полученные оценки момента сопротивления на валу являются устойчивыми и несмещёнными, интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания при отработке переходных процессов находится на приемлемом для практики уровне: интегральная погрешность оценивания момента сопротивления нагрузки на валу ПЭД в статике не превышает 0,2%, а в динамике – не более 19%; интегральная погрешность оценивания угловой частоты вращения вала ПЭД в статике не превышает 0,002%, а в динамике – не более 0,5%.
4. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный наблюдатель к внедрению в случаях подавляющего преобладания основной гармоники в спектре напряжения на входе питающего ПЭД кабеля, что в настоящее время в основном обеспечивается в интеллектуальных станциях управления УЭЦН, оборудованных синус-фильтрами на выходе автономного инвертора напряжения, работающего в режиме ШИМ-модуляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыженко В.Ю. Нефтяная промышленность России: состояние и проблемы // Перспективы Науки и Образования. – 2014. – № 1. – С. 300–308.
2. Етирмишли К.Э. Причины падения цен на нефть // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. – 2016. – № 6-1. – С. 115–117.
3. 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.

4. Корабельников М.И., Корабельников А.М. Об основных причинах отказа УЭЦН и методах увеличения наработки на отказ на месторождениях Западной Сибири // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: Материалы V региональной научно-практической конференции обучающихся ВО, аспирантов и ученых. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 241–249.
5. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добы-

- чи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений // В.В. Сушков, В.В. Тимошкин, И.С. Сухачев, С.В. Сидоров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 74–80.
6. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – V. 60. – P. 1–8.
  7. Kladijev S.N., Slobodyan S.M., Pishchulin V.P. Automation of preparation of uranium solutions // *Tsvetnye Metally*. – 2014. – № 8. – P. 77–82.
  8. Research on intelligent power supply control based on sensor-less temperature identification of Electric Submersible Motor / H. Zhang, J. Yu, Q. Jiang, L. Wang, D. Xu // *Green World with Power Electronics: 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics – ECCE Asia*. – Seoul, Korea, 2015. – Paper № 7168168. – P. 2802–2807.
  9. Ведерников В.А., Гапанович В.С., Козлов В.В. Особенности применения погружных электроцентробежных насосов на нефтяных месторождениях Среднего Приобья // *Вестник кибернетики*. – 2008. – № 7. – С. 27–32.
  10. Herman I., Vaclavek P. Load torque and moment of inertia observability analysis for alternating current drive sensorless control // *Industrial Electronics Conference (IECON) Proc.* – Montreal, Quebec, Canada, 2012. – Paper № 6388917. – P. 1864–1869.
  11. Binder B.J.T., Pavlov A., Johansen T.A. Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation // *IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production, OOGP 2015 Proc.* – Florianopolis, Brazil, 2015. – V. 28. – Iss. 6. – P. 140–146.
  12. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps // *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC*. – Miami, FL, USA, 2017. – Conference Paper № 8002199. – P. 1–8.
  13. Messaoudi M., Sbita L. Sensorless direct torque and flux control of induction motor based on MRAS and Luenberger observer // *International Conference on Green Energy and Conversion Systems, GECS 2017*. – Hammamet, Tunisia, 2017. – Conference Paper № 8066224. – P. 1–7.
  14. Online robust estimation of flux and load torque in induction motors / M. Bahloul, L. Chrifi-Alaoui, A.N. Vargas, M. Chaabane, S. Drid // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – V. 94 (5–8). – P. 2703–2713.
  15. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Наблюдатель полного вектора состояния и момента нагрузки асинхронного электродвигателя // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2013. – № 4. – С. 24–30.
  16. Лысенко О.А. Наблюдатель момента нагрузки асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой ротора // *Омский научный вестник*. – 2016. – № 5. – С. 85–89.
  17. Серьёзов Ю.В. Моделирование электропривода с наблюдателем // *Science Time*. – 2016. – № 11. – С. 466–470.
  18. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины / А.В. Федотов, В.Г. Хомченко, В.В. Жильцов, А.Н. Компанейц, Н.Г. Скабкин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 175 с.
  19. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications / J. Liu, J. Dai, S. Royak, P. Schmidt, E. Al-Nabi, T. Nondahl // *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2017*. – Tampa, FL, USA, 2017. – Conference Paper № 7930752. – P. 578–584.
  20. Guzinski J., Abu-Rub H. Sensorless induction motor drive with voltage inverter and sine-wave filter // *IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics*. – München, Germany, 2013. – Conference Paper № 6684503. – P. 1–8.
  21. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.

Поступила 12.02.2018 г.

#### Информация об авторах

**Глазырин А.С.**, доктор технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кладиёв С.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Афанасьев К.С.**, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Тимошкин В.В.**, кандидат технических наук, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Слепнёв И.Г.**, магистрант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Полищук В.И.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий Самарского государственного технического университета.

**Sándor Halász**, PhD, профессор Будапештского университета технологии и экономики.

UDC 621.313.333:62–83

## DESIGN OF FULL ORDER OBSERVER WITH REAL TIME MONITORING OF LOAD TORQUE FOR SUBMERSIBLE INDUCTION MOTORS

**Alexander S. Glazyrin<sup>1</sup>,**

asglazyrin@tpu.ru

**Sergey N. Kladijev<sup>1</sup>,**

kladiev@tpu.ru

**Kirill S. Afanasiev<sup>1</sup>,**

afanks@tpu.ru

**Vadim V. Timoshkin<sup>1</sup>,**

timoshkinvv@tpu.ru

**Ivan G. Slepnev<sup>1</sup>,**

slepnev.i@mail.ru

**Vladimir I. Polishchuk<sup>2</sup>,**

polischuk\_vi@mail.ru

**Sándor Halász<sup>3</sup>,**

halasz.sandor@vet.bme.hu

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

<sup>3</sup> Budapest University of Technology and Economics,  
H-1111, Jozef út 18, Budapest, Hungary.

*The operation of electric submersible pump for oil wells is complicated by a number of factors, which include gas inclusions in the pumped liquid, the presence of asphalt and tar paraffin sedimentation, raising of sand and other abrasive particles, deposition of various salts on the working parts of submersible pumps, in particular, calcium carbonate  $\text{CaCO}_3$ , calcium sulfate  $\text{CaSO}_4$ , barium sulfate  $\text{BaSO}_4$  and sodium chloride  $\text{NaCl}$ . As the submersible pump operates under these conditions, the load torque gradually increases, with total decrease in the efficiency of the pump up to a partial or full jamming of the shaft. The increase in the load torque during the wedging additionally statically loads the walls of the tubing. The presence of gas inclusions leads to disturbance in the stationary of the flow of injected liquid, and as a consequence, additional stresses of alternating character appear in the walls of the tubing in a wide range of vibrations. In a number of cases the fatigue destruction of tubing and «downfall» of submersible equipment occur at the wellhead. Therefore, it is time to develop the methods and means for monitoring the load torque on the shaft of a submersible induction motor in real time. Direct measurement with the help of a torque sensor or the restoration of torque estimates by electrical measurements directly on the terminals of a submersible induction motor is not advisable for technical and economic reasons. The most promising is the development of a full order state observer, taking into account the properties of the submerged cable by measuring the currents and voltages at the output of the step-up transformer – at the input of the cable line. Setting up such an observer of the original structure is of scientific and practical interest.*

**The aim** of research is to develop and test the mathematical models of the original structure of the full-order state observer with the real time monitoring of the load torque for submerged induction motors feeding on a long submersible cable.

**The main material and studies** are based on the use of the theory of full order state observers, numerical methods for solving systems of ordinary differential equations, numerical integration methods, automatic control theory, and the theory of signal filtering.

**Conclusion and outlines.** The original structure of the full order state observer is proposed with on-line monitoring of the load torque on the shaft of a submersible induction motor power supplying from a long cable. For observer functioning, one need the information on the magnitude of currents and voltages at the input of the submersible motor cable, as well as signals on the estimates of parameters of the replacement circuit and the moment of inertia from the additional device, the parameter identifier (not discussed in this article). It is demonstrated that the structure of the observer provides the user with estimates of the orthogonal projections in the axes  $\alpha$ ,  $\beta$  of the rotor flux coupling, the speed, the torque and the load torque on the shaft of the submersible induction motor in real time, both in steady-state conditions and in transient regimes: starting motor, on-off loading. The advantage of the observer is a high indicator of the quality of the evaluation with a small number of configurable parameters and rather simple setting. It is shown that the use of filter-post filters according to the Butterworth scheme improves the quality of evaluation of the load torque on the shaft of a submersible motor. The presence of signals evaluating the projections of the rotor flux linkage and the speed of the rotor makes it possible to recommend such an observer for electric drives made according to the scheme «frequency converter – induction motor». The studies shown that the integral errors of estimation during the observer working out of protracted transient processes are at an acceptable level: according to the speed estimation, they do not exceed 0,5 %, and according to the estimation of the load torque on the shaft no more than 20 %. The estimation error in steady-state regimes and in the absence of parameter variations is less than 1 %.

**Key words:**

Oil well, electric submersible pump, long cable, submersible induction motor, full order state observer, speed estimation, estimation of the rotor flux-linkage projections in the orthogonal coordinate system  $\alpha, \beta$ , load torque monitoring.

**REFERENCES**

1. Ryzhenko V.Yu. Oil industry in Russia: state and problems. *Perspektivy Nauki i Obrazovaniya*, 2014, no. 1, pp. 300–308. In Rus.
2. Etirmishli K.Eh. The reasons for the fall in oil prices. *Novaya nauka: Opyt, traditsii, innovatsii*, 2016, no. 6–1, pp. 115–117. In Rus.
3. Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu., Sipaylov V.A. Control strategy in accordance with economical criterion for electrotechnical installation of mechanized oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 75–84. In Rus.
4. Korabelnikov M.I., Korabelnikov A.M. Ob osnovnykh prichinakh otkaza UEHCN i metodakh uvelicheniya narabotki na otkaz na mestorozhdeniyakh Zapadnoy Sibiri [On the main reasons for the failure of the ESP and the methods of increasing the time between failures in the fields of Western Siberia]. *Opyt, aktualnye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa. Materialy V regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya VO, aspirantov i uchenykh* [Experience, current problems and prospects for development of oil and gas complex. Materials of the V regional scientific and practical conference of students of VO, post-graduate students and scientists]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2015. pp. 241–249.
5. Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. Evaluation of submersible electric motor insulation residual resource in oil production electric centrifugal pumps under the influence of impulse overvoltages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 74–80. In Rus.
6. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 60, pp. 1–8.
7. Kladiyev S.N., Slobodyan S.M., Pishchulin V.P. Automation of preparation of uranium solutions. *Tsvetnye Metally*, 2014, no. 8, pp. 77–82.
8. Zhang H., Yu J., Jiang Q., Wang L., Xu D. Research on intelligent power supply control based on sensor-less temperature identification of Electric Submersible Motor. *Green World with Power Electronics. 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics – ECCE Asia*. Seoul, Korea, 2015. Conference Paper no. 7168168, pp. 2802–2807.
9. Vedernikov V.A., Gapanovich V.S., Kozlov V.V. Features of submersible electric centrifugal pumps application in the oil fields of the Middle Ob region. *Vestnik kibernetiki*, 2008, no. 7, pp. 27–32. In Rus.
10. Herman I., Vaclavik P. Load torque and moment of inertia observability analysis for alternating current drive sensorless control. *Industrial Electronics Conference (IECON) Proc.* Montreal, Quebec, Canada, 2012. Conference Paper no. 6388917, pp. 1864–1869.
11. Binder B.J.T., Pavlov A., Johansen T.A. Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation. *IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production, OOGP 2015 Proc.* Florianopolis, Brazil, 2015. Vol. 28, Iss. 6, pp. 140–146.
12. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. Conference Paper no. 8002199, pp. 1–8.
13. Messaoudi M., Sbita L. Sensorless direct torque and flux control of induction motor based on MRAS and Luenberger observer. *International Conference on Green Energy and Conversion Systems*. Hammamet, Tunisia, 2017. Conference Paper no. 8066224, pp. 1–7.
14. Bahloul M., Chrifi-Alaoui L., Vargas A.N., Chaabane M., Drid S. Online robust estimation of flux and load torque in induction motors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94 (5–8), pp. 2703–2713.
15. Afanasev K.S., Glazyrin A.S. The observer of the complete vector of the state and load moment of an induction motor. *Elektrotehnicheskiye komplekisy i sistemy upravleniya*, 2013, no. 4, pp. 24–30. In Rus.
16. Lysenko O.A. Observer of the load torque of an induction motor with a double squirrel cage of a rotor. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2016, no. 5, pp. 85–89. In Rus.
17. Seryoznov Yu.V. Simulation of electric drive with observer. *Science Time*, 2016, no. 11, pp. 466–470. In Rus.
18. Fedotov A.V., Khomchenko V.G., Zhiltsov V.V., Kompaneyts A.N., Skabkin N.G. *Modelirovaniye privoda pogrurnozhno nasosa intelektualnoy skvazhiny* [Modeling the drive of a submersible pump of an intellectual well]. Omsk, OmGTU Publ., 2012. 175 p.
19. Liu J., Dai J., Royak S., Schmidt P., Al-Nabi E., Nondahl T. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition Proc.* Tampa, FL, USA, 2017. Conference Paper no. 7930752, pp. 578–584.
20. Guzinski J., Abu-Rub H. Sensorless induction motor drive with voltage inverter and sine-wave filter. *IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics*. München, Germany, 2013. Conference Paper no. 6684503, pp. 1–8.
21. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.

Received: 12 February 2018.

**Information about the authors**

*Alexander S. Glazyrin*, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Sergey N. Kladiyev*, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Kirill S. Afanasiev*, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Vadim V. Timoshkin*, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Ivan G. Slepnev*, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Vladimir I. Polishchuk*, Dr. Sc., head of the department, Samara State Technical University.

*Sándor Halász*, PhD, professor, Budapest University of Technology and Economics.