

УДК 681.5.075, 621.313.3

DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5396

Шифр специальности ВАК: 2.3.1, 2.3.3, 2.4.2

Научная статья



Разработка и исследование наблюдателя полного порядка динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами» в дискретном времени

А.С. Глазырин^{1,2}, Е.И. Попов^{3,1✉}, В.А. Копырин³, Р.Н. Хамитов^{3,1},
В.З. Ковалев², А.А. Филипас¹, А.А. Щипков^{4,1}, Ю.О. Кулеш^{1,4}, С.С. Попов^{1,5},
Е.В. Боловин^{1,3}, Е.А. Беляускене^{1,3}, О.В. Архипова², Э.И. Хусаинов²,

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

³ Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск

⁵ ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск

✉ popovei72@mail.ru

Аннотация. Актуальность. В настоящее время возрастает доля установок центробежных электронасосов, эксплуатирующихся в прерывистых режимах, что позволяет повысить добычу нефти для мало- и среднедебитных скважин. Это достигается путем перевода скважины на двухпозиционные режимы управления с отдельными циклами откачки и накопления жидкости. Однако в этом случае существенно сокращается время разгона погружного электродвигателя, которое может достигать нескольких минут. Такой подход ведет к сокращению наработки на отказ как электродвигателей, так и компонентов погружной части установки вследствие повышения амплитуды вибраций и крутильных колебаний в сравнении с квазистационарными процессами в случае непрерывной эксплуатации скважины. Достичь снижения влияния пусковых токов и моментов, приводящих к избыточному усталостному износу элементов погружной части установки, можно путем применения замкнутых бездатчиковых систем управления электроприводов погружных электродвигателей. Это обуславливает актуальность разработки методов идентификации неизмеряемых переменных состояния погружных электродвигателей, таких как вектор потокосцепления и угловая скорость ротора, на основе наблюдателей состояния полного порядка. **Цель.** Разработка и исследование наблюдателя полного порядка угловой скорости и момента сопротивления на валу для динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами» на основе явных математических моделей в дискретном времени для реализации замкнутых бездатчиковых систем управления электроприводом установок центробежных электронасосов. **Методы.** Методы системного анализа и структурно-параметрического синтеза динамических систем, методы идентификации неизмеряемых переменных состояния динамических систем на основе наблюдателей состояния, методы численного математического моделирования динамических систем, описываемых системами жестких дифференциальных уравнений, и методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений. **Результаты.** Разработана настраиваемая математическая модель наблюдателя полного порядка угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу для динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами». Исследована работоспособность наблюдателя при отработке типовых режимов и при отклонении параметров его настраиваемой модели от эталонных. Для всех режимов относительная ошибка оценивания угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу составили менее 1,5 и 1 % соответственно.

Ключевые слова: установки центробежных электронасосов, наблюдатель полного порядка, бездатчиковые системы электропривода, динамическая система «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами», идентификация переменных состояния динамических систем, прерывистые режимы эксплуатации нефтяных скважин

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Для цитирования: Разработка и исследование наблюдателя полного порядка динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами» в дискретном времени / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.А. Филипас, А.А. Щипков, Ю.О. Кулеш, С.С. Попов, Е.В. Боловин, Е.А. Беляускене, О.В. Архипова, Э.И. Хусаинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 11. – С. 226–241. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5396

UDC 681.5.075, 621.313.3
DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5396
Scientific paper



Development and research of a full-order observer for the dynamic system «cable line – permanent magnet synchronous motor» in discrete time

A.S. Glazyrin^{1,2}, E.I. Popov^{3,1✉}, V.A. Kopyrin³, R.N. Khamitov^{3,1}, V.Z. Kovalev²,
A.A. Filipas¹, A.A. Shchipkov^{4,1}, Yu.O. Kulesh^{1,4}, S.S. Popov^{1,5}, E.V. Bolovin^{1,3},
E.A. Beliauskene^{1,3}, O.V. Arkhipova², E.I. Khusainov²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

³ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

⁴ Seversk Technological Institute of the National Re-search Nuclear University “MEPhI”, Seversk, Russian Federation

⁵ «NPF Mechatronica-Pro» LTD, Tomsk, Russian Federation

✉ popovei72@mail.ru

Abstract. Relevance. Currently, the share of centrifugal electric pumps operating in intermittent modes is increasing, allowing for increased oil production from low- and medium-flow wells. This is achieved by switching the well to two-position control modes with separate pumping and fluid accumulation cycles. However, this significantly reduces the time it takes to bring the well up to operating mode, which can reach several minutes. This approach reduces the mean time between failures of submersible electric motors and components of the submersible section of the unit due to increased vibration amplitude and torsional oscillations compared to quasi-stationary processes during continuous well operation. The impact of starting currents and torques, which lead to excessive fatigue wear of the submersible section components, can be reduced by using closed-loop sensorless control systems for submersible electric motor drives. This necessitates the development of methods for identifying unmeasured state variables of submersible electric motors, such as the flux vector and rotor angular velocity, using full-order state observers. **Aim.** Development and research of a rotor speed and load torque full-order observer for the dynamic system «cable line – permanent magnet synchronous motor» based on explicit mathematical models in discrete time for the implementation of closed-loop sensorless control systems for the electric drive of centrifugal electric pump units. **Methods.** The work used methods of system analysis and structural-parametric synthesis of dynamic systems, methods of identifying unmeasured state variables of dynamic systems based on state observers, methods of numerical mathematical modeling of dynamic systems described by systems of stiff differential equations, and methods of solving systems of nonlinear algebraic equations. **Results.** The authors have developed the adaptive mathematical model of a rotor speed and load torque full-order observer for the dynamic system «cable line – permanent magnet synchronous motor». The observer performance was studied under typical operating conditions and when the parameters of its customizable model deviated from the reference values. For all operating conditions, the relative errors in estimating the rotor angular velocity and shaft drag torque were less than 1.5 and 1%, respectively.

Keywords: centrifugal electric pump installations, full-order observer, sensorless electric drive systems, dynamic system «cable line – permanent magnet synchronous motor», identification of state variables of dynamic systems, intermittent modes of operation of oil wells

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. FENG-2023-0001 "Predictive control of energy flows of power generating complexes of the Arctic and the Far North, with stochastic nature of consumption and generation of electrical energy: theory, synthesis, experiment").

For citation: Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Filipas A.A., Shchipkov A.A., Kulesh Yu.O., Popov S.S., Bolovin E.V., Beliauskene E.A., Arkhipova O.V., Khusainov E.I. Development and research of a full-order observer for the dynamic system «cable line – permanent magnet synchronous motor» in discrete time. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 11, pp. 226–241. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5396

Введение

В настоящее время все большее число мало- и среднедебитных нефтяных скважин, оборудованных установками центробежных электронасосов (УЭЦН), переводятся в режимы прерывистой эксплуатации [1–5], включающие в себя сменяющиеся

циклы откачки и накопления жидкости. Управление циклами, как правило, выполнено по двухпозиционному принципу: цикл заполнения скважины жидкостью из пласта до достижения некоторого статического уровня $H_{ст}$ и цикл откачки жидкости до критического уровня $H_{кр}$ [6]. В работе [7] было

показано, что преимущества перехода к режимам прерывистой эксплуатации скважин (ПЭС) по дебиту и энергоэффективности могут быть в значительной степени ухудшены снижением остаточного ресурса и наработки на отказ погружных электродвигателей (ПЭД) и компонентов погружной части УЭЦН, что связано с существенным снижением времени разгона ПЭД до нескольких минут [3], в отличие от квазистационарного режима вывода скважины в непрерывный режим эксплуатации, длительность которого может варьироваться от нескольких десятков минут до нескольких часов [8–10]. Уменьшение длительности пуска влечет за собой рост и изменение формы пускового тока и электромагнитного момента ПЭД, что может приводить к возрастанию механических нагрузок в компонентах погружной части УЭЦН и накоплению в них избыточного усталостного износа, а также к появлению резонансных явлений в конструкции насосно-компрессорных труб [7].

Решение задачи увеличения межремонтного периода погружных электродвигателей, находящихся в составе УЭЦН, в условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации, может быть достигнуто путем управления величиной и формой токов и крутящего момента ПЭД в переходных режимах [11, 12]. Высокие значения пусковых токов и моментов ПЭД связаны с особенностями работы скалярных разомкнутых систем управления электроприводов УЭЦН. Системы вольт-частотного управления электроприводов, широко распространенные в установках механизированной добычи нефти и известные также как системы «плавного пуска», не позволяют контролировать и ограничивать величину и форму токов ПЭД. Вследствие этого естественным направлением развития электропривода УЭЦН, по мнению авторов, является переход на бездатчиковые системы управления электроприводов, замкнутые по наблюдателю состояния.

Необходимость применения наблюдателей состояния обусловлена особенностями технологического процесса добычи нефти установок центробежных электронасосов, так как в типовой компоновке УЭЦН отсутствуют технические решения для измерения угловой скорости ротора ПЭД, потокоцеплений и момента сопротивления на валу [13]. Такой подход был общепринят для установок, эксплуатирующихся в непрерывном режиме, где не было необходимости в постановке задачи оптимизации динамических режимов разгона ПЭД [14]. В свою очередь задача оптимизации статических режимов по критерию энергоэффективности успешно решалась выбором частоты питающего напряжения с учетом взаимного влияния технических и технологических параметров гидро- и электромеханиче-

ской подсистем УЭЦН [15], но этого подхода недостаточно для задач управления УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации.

В научно-технической литературе известно большое количество различных методов идентификации переменных состояния электроприводов переменного тока на основе наблюдателей состояния или нелинейных настраиваемых моделей. Среди наиболее распространенных подходов к построению наблюдателей состояния можно выделить наблюдатели Люенбергера [16–18], отличающиеся относительно простым математическим аппаратом, но требующие линеаризации нелинейной модели объекта, что может впоследствии затруднять настройку наблюдателя. Более совершенным подходом являются методы идентификации на основе калмановской фильтрации: расширенные [19–21] и сигма-точечные [22, 23] фильтры Калмана. Стохастическая модель фильтра позволяет естественным образом учитывать помехи измерений и адаптивно настраивать коэффициенты наблюдателя на каждом шаге дискретизации, однако при негауссовом характере шумов могут возникать определенные трудности с заполнением ковариационных матриц. Известны также наблюдатели на основе скользящих режимов [24–26] и адаптивных эталонных моделей [27–29]. Первый тип наблюдателей состояния отличается высокой параметрической робастностью, но проблема высокочастотных пульсаций оценок переменных состояния требует решения задачи построения нелинейных фильтров-постфильтраторов. Во втором случае возникает обратная ситуация: реализация адаптивных алгоритмов оценивания переменных состояния требует достаточно точного задания параметров объекта, что в инженерной практике не всегда осуществимо. Наилучшим подходом для синтеза и обучения нелинейных регрессоров являются метаэвристические алгоритмы [30–32], построение которых, по существу, является непараметрической идентификацией моделей электропривода. Однако среди основных недостатков данного подхода к наиболее существенным можно отнести необходимость в обширной обучающей выборке для избежания эффектов переобучения и значительные вычислительные затраты как на обучение подобных моделей, так и их дальнейшее применение в инженерной практике.

В ряде работ [33–35] рассмотрены модели наблюдателей состояния угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу синхронных и асинхронных погружных электродвигателей в непрерывном времени на основе явных математических моделей [36]. При этом применение наблюдателей в реальных цифровых системах управления требует дискретизации моделей и представления их в разностной форме для реализации на цифровых сигнальных процессорах станций управления УЭЦН.

Известно множество методов перехода от моделей в непрерывном времени к моделям в дискретном [37], использующихся для решения как прямых, так и обратных задач теории управления [38, 39]. Одним из наиболее эффективных подходов к построению дискретных моделей с точки зрения отношения точности аппроксимации непрерывных моделей как во временной, так и в частотной (в особенности для средних и высоких частот) областях к вычислительным затратам является метод билинейного преобразования (также известный как метод Тастина) [40–42].

В научно-технической литературе среди методов дискретизации моделей в непрерывном времени широкое распространение получил явный метод Эйлера (прямой разности), имеющий наиболее низкие вычислительные затраты среди всех методов и отсутствие громоздкости математических выкладок при приемлемой точности в большинстве инженерных задач. Метод Тастина использует неявную разностную схему, которая требует решения систем линейных или нелинейных алгебраических уравнений на каждом шаге численного интегрирования, что влечет за собой дополнительную вычислительную нагрузку на микроконтроллер.

Среди наиболее известных и распространенных методов решения систем нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) можно выделить метод Ньютона, группу квазиньютоновских методов (например, семейство методов Бройдена), методы на основе применения доверительных областей (включая, например, алгоритм Левенберга–Марквардта) и другие [43–45]. Поскольку в работе ставится задача численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений неявными разностными схемами в режиме реального времени средствами цифрового сигнального процессора, к методу решения СНАУ можно сформировать следующие требования: отсутствие необходимости вычисления гессиана функции из соображений экономии вычислительных ресурсов микроконтроллера и эффективность решения задачи с относительной разреженностью системы невысокого порядка (порядка 25–30 для настраиваемой модели электротехнической подсистемы УЭЦН [14]). В качестве основного метода решения СНАУ выберем метод Ньютона.

Математическая модель динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами»

При составлении математической модели динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами» (КЛ–СДПМ) были приняты следующие допущения [46, 47]:

- рассматривается неявнополюсная синхронная машина;
- статорная обмотка симметрична;

- магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами ротора, не зависит от токов статора и принимается постоянным во времени;
- питание осуществляется от симметричного идеального источника трехфазного напряжения;
- в магнитной цепи синхронной машины отсутствует насыщение, гистерезис и вихревые токи;
- УЭЦН эксплуатируется в режиме подъема пластовой жидкости, турбинное вращение не рассматривается;
- распределение температуры вдоль кабельной линии принимается равномерным за счет размещения внутри колонны насосно-компрессорных труб греющего кабеля [48];
- моделирование производится в рамках теории цепей с сосредоточенными параметрами;
- ЭДС СДПМ принимается синусоидальной;
- измерения на входе кабельной линии передаются в станцию управления через идеальные измерительные каналы.

Питание погружного электродвигателя в составе УЭЦН осуществляется через нефтепогружную кабельную линию, длина которой может достигать нескольких километров. Это вызывает не только амплитудные, но и фазовые искажения напряжения при питании ПЭД от наземной станции управления. Как следствие, необходим учет кабеля в настраиваемой математической модели электротехнической подсистемы УЭЦН. Согласно методике, представленной в [49, 50], математическая модель длинного кабеля может быть разбита на несколько звеньев редуцированной модели в расчете 1 звено на 1 км кабельной линии.

Рассматривая каждое звено редуцированной модели кабельной линии в виде четырехполюсника с Г-образной схемой замещения, запишем в матричной форме уравнение связи входа и выхода для одного звена:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_{\text{зв}}^{(j)}(t) = \mathbf{A}_{\text{зв}}(t) \cdot \mathbf{x}_{\text{зв}}^{(j)}(t) + \mathbf{B}_{\text{зв}}(t), \quad (1)$$

где

$$\mathbf{x}_{\text{зв}}^{(j)}(t) = \begin{pmatrix} i_{d_{\text{зв}}}^{(j)}(t) \\ i_{q_{\text{зв}}}^{(j)}(t) \\ U_{d_{\text{вых}}}^{(j)}(t) \\ U_{q_{\text{вых}}}^{(j)}(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\text{зв}}(t) = \begin{pmatrix} \frac{U_{d_{\text{вх}}}^{(j)}(t)}{L_{\text{каб}}/n} \\ \frac{U_{q_{\text{вх}}}^{(j)}(t)}{L_{\text{каб}}/n} \\ -i_{d_{\text{зв}}}^{(j+1)}(t) \\ \frac{C_{\text{каб}}/n}{-i_{q_{\text{зв}}}^{(j+1)}(t)} \\ \frac{C_{\text{каб}}/n}{-i_{q_{\text{зв}}}^{(j+1)}(t)} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{3в}(t) = \begin{pmatrix} -\frac{R_{каб}}{L_{каб}} & \omega_e(t) & -1 & 0 \\ \omega_e(t) & -\frac{R_{каб}}{L_{каб}} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -\frac{G_{каб}}{C_{каб}} & \omega_e(t) \\ 0 & 1 & \omega_e(t) & -\frac{G_{каб}}{C_{каб}} \end{pmatrix},$$

(*j*) – номер звена редуцированной модели длинного кабеля; *n* – количество звеньев редуцированной модели длинного кабеля; $U_{d_вх}^{(j)}(t)$, $U_{q_вх}^{(j)}(t)$ – проекции вектора напряжения на входе *j*-го звена редуцированной модели длинного кабеля в осях *dq*, В; $i_{d_зв}^{(j)}(t)$, $i_{q_зв}^{(j)}(t)$ – проекции вектора тока в продольной составляющей *j*-го звена редуцированной модели длинного кабеля в осях *dq*, А; $U_{d_вых}^{(j)}(t)$, $U_{q_вых}^{(j)}(t)$ – проекции вектора напряжения на выходе *j*-го звена редуцированной модели длинного кабеля в осях *dq*, В; $\omega_e(t)$ – электрическая угловая скорость, $\omega_e(t) = z_p \omega_r$, рад/с; z_p – число пар полюсов СДПМ; $\omega_r(t)$ – угловая скорость ротора СДПМ, рад/с; $R_{каб}$ – активное сопротивление токоведущих жил кабельной линии, Ом; $L_{каб}$ – индуктивность токоведущих жил кабельной линии, Гн; $C_{каб}$ – эквивалентная емкость фазы кабельной линии относительно двух других фаз и брони, Ф; $G_{каб}$ – эквивалентная проводимость изоляции кабельной линии, См.

Каждое *j*-е звено редуцированной модели кабельной линии относительно переменной напряжения входа и выхода звена связано с последующим согласно соотношению $U_{dq_вых}^{(j)} = U_{dq_вх}^{(j+1)}$. Входным напряжением для первого звена редуцированной модели является напряжение питания на выходе частотного преобразователя $U_{dq_вх}^{(1)}(t) = U_{dq}(t)$, формируемое системой векторного управления [51, 52].

Модель электромагнитных процессов СДПМ в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_s(t) = \mathbf{A}_s(t) \cdot \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s(t), \quad (2) \quad \text{где}$$

где

$$\mathbf{x}_s(t) = \begin{pmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_s(t) = \begin{pmatrix} \frac{U_{d_вых}^{(n)}(t)}{L} \\ \frac{U_{q_вых}^{(n)}(t) - \psi_m \omega_e(t)}{L} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_s(t) = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_e(t) \\ -\omega_e(t) & -\frac{R}{L} \end{pmatrix},$$

$i_d(t)$, $i_q(t)$ – проекции вектора тока статора СДПМ в осях *dq*, А; R – активное сопротивление статорной обмотки, Ом; L – индуктивность статорной обмотки, Гн; ψ_m – потокосцепление постоянного магнита, Вб;

Модель (2) дополняется дифференциальным уравнением электромеханического равновесия на валу СДПМ:

$$\frac{d}{dt} \omega_r(t) = \frac{1}{J_\Sigma} \left(\frac{3}{2} z_p \psi_m i_q(t) - M_c(t) \right), \quad (3)$$

где J_Σ – эквивалентный момент инерции приведенный к валу СДПМ, кг·м²; $M_c(t)$ – момент сопротивления на валу, Н·м.

Совокупность уравнений (1)–(3) образуют систему, описывающую электромагнитные и электромеханические процессы в динамической системе «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами». Необходимо отметить, что обозначение $\mathbf{A}(t)$ связано не с нестационарностью исследуемой модели, а с наличием переменной состояния динамической системы в матрице состояния.

Разработка наблюдателя полного порядка угловой скорости и момента сопротивления на валу в дискретном времени

В работе [33] предложена оригинальная структура и математическая модель наблюдателя полного порядка (НПП) угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу нестационарной динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами» в непрерывном времени. В векторно-матричной форме она может быть записана в виде следующей системы:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}}_{3в}^{(j)}(t) = \hat{\mathbf{A}}_{3в}(t) \cdot \hat{\mathbf{x}}_{3в(j)}(t) + \hat{\mathbf{B}}_{3в}(t), \\ \frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}}_s(t) = \hat{\mathbf{A}}_s(t) \cdot \hat{\mathbf{x}}_s(t) + \hat{\mathbf{B}}_s(t), \\ \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r(t) = \frac{1}{J_\Sigma} \left(\frac{3}{2} z_p \hat{i}_q(t) \psi_m + k_I \Delta i_{q_каб}(t) + \hat{M}_c(t) \right), \\ \frac{d\hat{M}_c(t)}{dt} = \frac{1}{T_I} \Delta i_{q_каб}(t), \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{B}}_{3в}(t) = \begin{pmatrix} \frac{\hat{U}_{d_вх}^{(j)}(t) - k_{(j)d} \Delta i_{d_каб}(t)}{L_{каб} / n} \\ \frac{\hat{U}_{q_вх}^{(j)}(t) - k_{(j)q} \Delta i_{q_каб}(t)}{L_{каб} / n} \\ -\frac{\hat{i}_{d_зв}^{(j+1)}(t)}{C_{каб} / n} \\ -\frac{\hat{i}_{q_зв}^{(j+1)}(t)}{C_{каб} / n} \end{pmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{B}}_s(t) = \begin{pmatrix} \frac{\hat{U}_{d_вых}^{(n)}(t) - k_{sd} \Delta i_{d_каб}(t)}{L} \\ \frac{\hat{U}_{q_вых}^{(n)}(t) - \psi_m \hat{\omega}_e(t) - k_{sq} \Delta i_{q_каб}(t)}{L} \end{pmatrix};$$

$\hat{\cdot}$ – символ оценки; $\Delta i_{d_каб}(t) = \hat{i}_{d_зв}^{(1)}(t) - i_{d_зв}^{(1)}(t)$,

$\Delta i_{q_каб}(t) = \hat{i}_{q_зв}^{(1)}(t) - i_{q_зв}^{(1)}(t)$ – невязки по проекциям вектора продольной составляющей тока первого звена редуцированной модели кабельной линии в осях dq , А; $k_{(j)d}$, $k_{(j)q}$ – коэффициенты пропорциональной отработки невязки для уравнений j -го звена в осях dq , Ом; k_{sd} , k_{sq} – коэффициенты пропорциональной отработки невязки для уравнений статора в осях dq , Ом; k_I – коэффициент пропорциональной составляющей компенсации момента сопротивления, Вб; $\hat{M}_c(t)$ – интегральная составляющая компенсации момента сопротивления, Н·м; T_I – постоянная времени интегральной составляющей компенсации момента сопротивления, Вб/с; $\hat{U}_{dq_вых}^{(1)}(t) = U_{dq}(t)$.

Для перехода в дискретное время воспользуемся билинейным преобразованием (методом Тастина) [40]. В разностной форме система (4) согласно методу Тастина имеет вид [53, 54]:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{зв}^{(j)}[k] - \hat{\mathbf{x}}_{зв}^{(j)}[k-1] - \\ - \frac{\Delta t}{2} \left(\hat{\mathbf{A}}_{зв}^{(j)}[k] \cdot \hat{\mathbf{x}}_{зв}^{(j)}[k] + \hat{\mathbf{B}}_{зв}^{(j)}[k] + \right. \\ \left. + \hat{\mathbf{A}}_{зв}^{(j)}[k-1] \cdot \hat{\mathbf{x}}_{зв}^{(j)}[k-1] + \hat{\mathbf{B}}_{зв}^{(j)}[k-1] \right) = 0, \\ \hat{\mathbf{x}}_s[k] - \hat{\mathbf{x}}_s[k-1] - \\ - \frac{\Delta t}{2} \left(\hat{\mathbf{A}}_s[k] \cdot \hat{\mathbf{x}}_s[k] + \hat{\mathbf{B}}_s[k] + \right. \\ \left. + \hat{\mathbf{A}}_s[k-1] \cdot \hat{\mathbf{x}}_s[k-1] + \hat{\mathbf{B}}_s[k-1] \right) = 0, \\ \hat{\omega}_r[k] - \hat{\omega}_r[k-1] - \\ - \frac{\Delta t}{2J_\varphi} \left(\frac{3}{2} z_p \psi_m (\hat{i}_q[k] + \hat{i}_q[k-1]) + \right. \\ \left. + k_I (\Delta i_{q_каб}[k] + \Delta i_{q_каб}[k-1]) + \right. \\ \left. + \hat{M}_c[k] + \hat{M}_c[k-1] \right) = 0, \\ \hat{M}_c[k] - \hat{M}_c[k-1] - \\ - \frac{\Delta t}{2T_I} (\Delta i_{q_каб}[k] + \Delta i_{q_каб}[k-1]) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где k – шаг дискретизации; Δt – период дискретизации, с.

Выражение (5) представляет собой систему нелинейных разностных уравнений, и для нахождения вектора переменных состояния на текущем шаге дис-

кретизации $(\hat{\mathbf{x}}_{зв}^{(1)}[k] \dots \hat{\mathbf{x}}_{зв}^{(n)}[k] \hat{\mathbf{x}}_s[k] \hat{\omega}_r[k] \hat{M}_c[k])^T$

требуется решение системы нелинейных алгебраических уравнений. Минимизация нормы вектора левой части системы уравнения (5) выполнялось методом Ньютона [43, 45].

Исследование и проверка на параметрическую робастность наблюдателя полного порядка в дискретном времени

Выполним исследование работоспособности предложенного наблюдателя полного порядка в дискретном времени. В качестве синхронного двигателя с постоянными магнитами принят вентильный погружной электродвигатель марки ВПЭД42-117 [55], питающийся через кабельную линию марки КПБК-90 3×16 [56]. Параметры математической модели динамической системы «КЛ-СДПМ» и коэффициенты настройки наблюдателя сведены в табл. 1.

Кабельная линия в данной работе представлена тремя звеньями редуцированной математической модели, длина кабеля принята равной 3 км. Коэффициенты пропорциональной отработки невязки для второго и третьего звеньев редуцированной модели длинного кабеля приняты равными нулю для упрощения расчетов. Коэффициенты наблюдателя, приведенные в табл. 1, были получены эмпирическим путем. На практике настройка коэффициентов инженерно-техническим персоналом может быть затруднительна, в связи с чем актуальной задачей является разработка адаптивных алгоритмов самонастройки коэффициентов наблюдателя, например, методами глобальной оптимизации [45, 50, 56].

Эталонная модель динамической системы (1)–(3) была рассчитана неявным методом Розенброка 3-го порядка [58] с шагом интегрирования 5 мкс. Для дискретной модели шаг дискретизации был принят равным $\Delta t = 40$ мкс, что соответствует частоте дискретизации 25 кГц. Наброс нагрузки при математическом моделировании выполнялся скачкообразно, что противоречит реальным условиям. Такой подход был выбран из соображений проверки устойчивости наблюдателя полного порядка в наиболее тяжелых условиях при отработке типовых для теории автоматического управления воздействий [59]. В данном случае входное воздействие по моменту сопротивления представляет собой задержанную функцию Хевисайда.

Переходные характеристики оценок угловой скорости и момента сопротивления на валу, восстановленные наблюдателем полного порядка, в сравнении с эталонными представлены на рис. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели

Table 1. Mathematical model parameters

Параметры ВПЭД42-117/Parameters of VPED42-117						
$U_{ном}, В$ U_{nom}, V	$P_{ном}, кВт$ P_{nom}, kW	$R, Ом$ R, Ohm	$L, мГн$ L, mH	$E, В/(об/мин)$ $E, V/гpm$	$J, кг·м^2$ $kg·m^2$	z_p
1470/√3	42	2,528	4,5	0,440	0,08	1
Параметры кабеля марки КРВК-90 3×16/Parameters of КРВК-90 3×16 cable						
$R_{каб}, Ом/R_{cab}, Ohm$	$L_{каб}, мГн/L_{cab}, mH$		$C_{каб}, мкФ/C_{cab}, μF$	$G_{каб}, мкСм/G_{cab}, μS$		
1,204	0,300676		0,2125	1		
Коэффициенты отработки невязки настраиваемой модели наблюдателя Gain coefficients for the error correction of the adaptive observer model						
k_{1d}	k_{1q}	k_{sd}	k_{sq}	$k_i, Вб/Вb$		$T_i, Вб/с Wb/sec$
Ом/Ohm						
0,1·R _{каб} =0,048	0,1·R _{каб} =0,048	0,5·R _{каб} =0,24	0,5·R _{каб} =0,24	1,05·10 ³		6,5·10 ⁻⁴

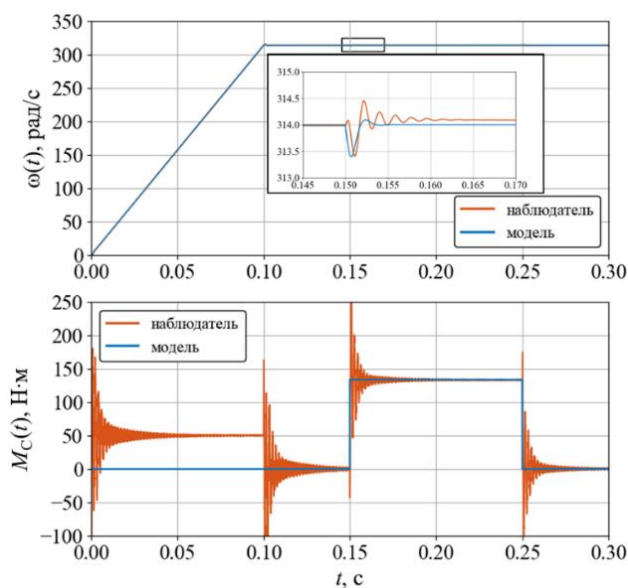


Рис. 1. Переходные характеристики по угловой скорости и моменту сопротивления на валу эталонной модели и наблюдателя

Fig. 1. Transient responses of rotor speed and load torque of the reference model and the observer

Выполним проверку работоспособности наблюдателя полного порядка при рассогласовании ненулевых начальных условий по угловой скорости ротора. Начальные значения оценки угловой скорости НПП приняты равными ± 100 рад/с. Переходные характеристики по угловой скорости ротора представлены на рис. 2.

При рассогласовании начальных условий по угловой скорости ротора в режиме частотного пуска оценка угловой скорости ротора асимптотически приближается к эталонной траектории по скорости за время 0,01 с, что существенно меньше времени переходного процесса.

В процессе работы ПЭД в условиях прерывистой эксплуатации скважин происходит непрерывное изменение его параметров: изменение активного сопротивления статора связано с циклами рабо-

ты и охлаждения ПЭД и может достигать 10 % в зависимости от типоразмера ПЭД, а засорение и заиливание рабочих органов центробежного электронасоса (ЭЦН) может привести к возрастанию момента инерции [60]. Кроме того, возможны ситуации изначально неверно заданных параметров настраиваемой математической модели наблюдателя обслуживающим персоналом в станции управления УЭЦН. В таких случаях наблюдатель должен сохранять устойчивость и не терять точностные характеристики оценивания.

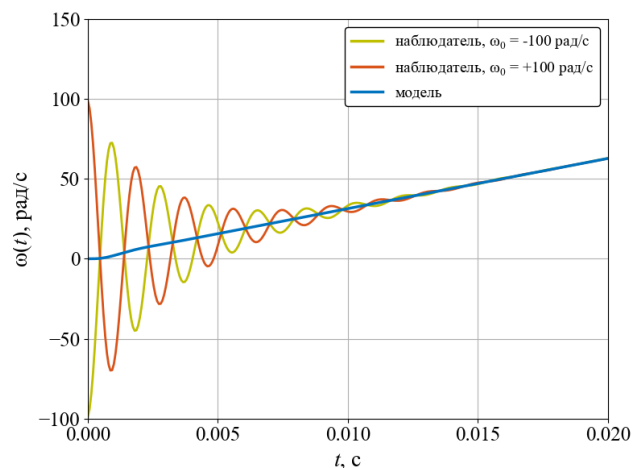


Рис. 2. Переходные характеристики угловой скорости ротора и ее оценки с помощью наблюдателя при рассогласовании начальных условий

Fig. 2. Transient responses of rotor speed and the estimation from observer under different initial conditions

Выполним проверку работоспособности наблюдателя полного порядка при отклонении параметров его настраиваемой математической модели от эталонных (проверку на параметрическую робастность). Для проверки были последовательно изменены на $\pm 20\%$ активные сопротивления статорной обмотки СДПМ в настраиваемой модели наблюдателя, затем активные сопротивления и статора, и кабельной линии. Пере-

ходные характеристики оценок при отклонении активных сопротивлений в настраиваемой модели приведены на рис. 3. Также был исследован случай при изменении эквивалентного момента инерции в широких пределах от $0,5 \cdot J_{\Sigma}$ до $2 \cdot J_{\Sigma}$. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

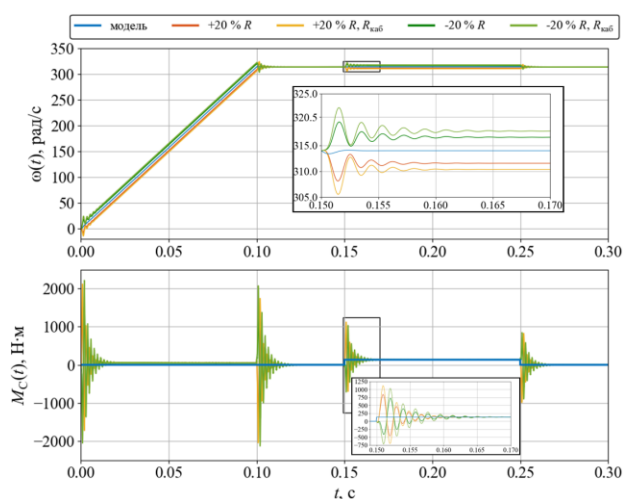


Рис. 3. Переходные характеристики оценок переменных состояния при отклонении параметров настраиваемой модели наблюдателя от эталонных

Fig. 3. Transient responses of state variables estimations under the deviation of the observer adaptive model parameters from the reference ones

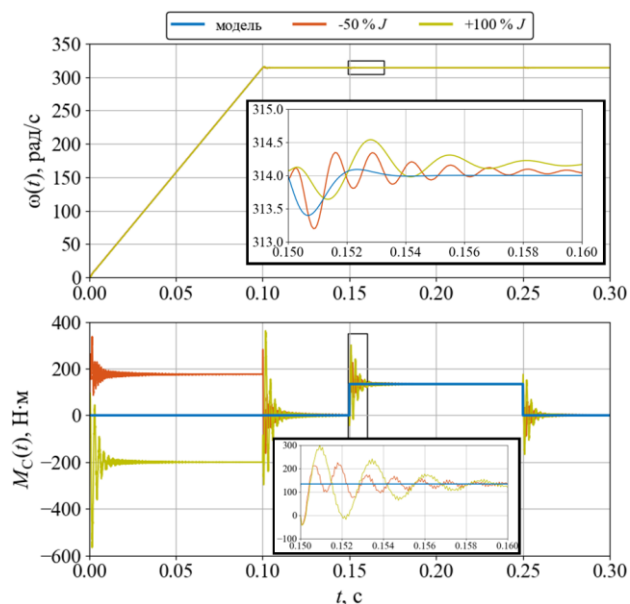


Рис. 4. Переходные характеристики оценок переменных состояния при отклонении эквивалентного момента инерции настраиваемой модели наблюдателя от эталонного

Fig. 4. Transient responses of state variables estimations under the deviation of the observer adaptive model equivalent moment of inertia from the reference one

Для количественной оценки эффективности работы наблюдателя выполним расчет относительных и интегральных ошибок оценивания угловой скорости и момента сопротивления на валу в различных режимах работы. Статические и интегральные ошибки были рассчитаны по формулам (6), (7) соответственно и сведены в табл. 2.

$$\Delta_A = \frac{|A_{уст} - \hat{A}_{уст}|}{A_{уст}} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

$$\sigma_A = \frac{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |A(t) - \hat{A}(t)| dt}{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |A(t)| dt} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где $A(t)$ – угловая скорость ротора, или момент сопротивления на валу СДПМ; $A_{уст}$ – установившееся значение обобщенной переменной $A(t)$; $t_{кон}$, $t_{нач}$ – пределы интегрирования.

Обсуждение результатов

Как следует из анализа рис. 1, 2, наблюдатель обрабатывает эталонную траекторию по угловой скорости ротора, в том числе и в случае рассогласования ненулевых начальных условий. Относительная ошибка (табл. 2) оценивания угловой скорости ротора в режиме работы при номинальной нагрузке составляет 0,05 %, следовательно, полученная система является астатической. Относительная ошибка оценивания момента сопротивления на валу в нагрузочном режиме составила 0,2 %. При этом в режиме частотного пуска на холостом ходу присутствует значительное смещение (рис. 1) оценки момента сопротивления на валу, что связано с наличием пускового электромагнитного момента, однако значение оценки момента сопротивления на валу в этом режиме значительно меньше электромагнитного пускового момента эталонной модели СДПМ: 50 и 300 Н·м соответственно.

При отклонении значений активных сопротивлений статора и кабельной линии настраиваемой модели наблюдателя от эталонных значений в переходных характеристиках оценок угловой скорости ротора присутствует незначительное остаточное отклонение в режиме номинальной нагрузки (рис. 3). Относительная ошибка оценивания угловой скорости ротора составляет от 0,79 до 1,21 % (табл. 2), что допустимо в инженерной практике.

При этом отклонения по оценке момента сопротивления на валу составляют менее 0,5 % во всех случаях. Отклонение момента инерции настраиваемой модели наблюдателя от эталонного значения приводит к затягиванию переходных процессов по угловой скорости ротора, но асимптотическая сходимость оценок к эталонной траектории сохраняется (рис. 4).

Таблица 2. Ошибки оценивания угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу синхронного двигателя с постоянными магнитами, питающегося через кабельную линию

Table 2. Errors in estimating the rotor speed and the load torque of the permanent magnet synchronous motor rotor fed through the cable line

Режим работы Operation mode	$\Delta\omega$	σ_ω	ΔM_c	σ_{M_c}	Режим работы Operation mode	$\Delta\omega$	σ_ω	ΔM_c	σ_{M_c}
	%					%			
Без отклонения параметров Without parameters deviation					Рассогласование ненулевых начальных условий Mismatch of non-zero initial conditions				
1	0	0	–	–	+100 рад/с/rad/s	–	1,15	–	–
2	0,01	0,05	0,2	22,5	–100 рад/с/rad/s	–	1,16	–	–
3	0,02	0,04	–	–	–	–	–	–	–
+20 % R					+20 % $R, R_{\text{каб}}$				
1	0	3,6	–	–	1	0	5,3	–	–
2	0,79	0,77	0,23	112	2	1,17	1,1	0,22	154
3	0,01	0,23	–	–	3	0,02	0,31	–	–
–20 % R					–20 % $R, R_{\text{каб}}$				
1	0,01	3,63	–	–	1	0,01	5,35	–	–
2	0,81	0,83	0,39	123	2	1,19	1,21	0,48	191
3	0,02	0,02	–	–	3	0,02	0,36	–	–
–50 % J_Σ					+100 % J_Σ				
1	0,02	0,06	–	–	1	0,02	0,08	–	–
2	0,01	0,04	0,18	18	2	0,02	0,07	0,46	36,5
3	0,02	0,05	–	–	3	0,01	0,04	–	–

Примечание: 1-й режим – пуск на холостом ходу, $t_{нач}=0$ с, $t_{кон}=0,1$ с; 2-й режим – включение номинальной нагрузки, $t_{нач}=0,15$ с, $t_{кон}=0,16$ с; 3-й режим – выключение нагрузки, $t_{нач}=0,25$ с, $t_{кон}=0,26$ с.

Note: 1st mode is idle start, $t_{нач}=0$ s, $t_{кон}=0,1$ s; 2nd mode is nominal load surge, $t_{нач}=0,15$ s, $t_{кон}=0,16$ s; 3rd mode is nominal load shedding, $t_{нач}=0,25$ s, $t_{кон}=0,26$ s.

Для переходных характеристик по оценке момента сопротивления на валу во всех режимах (частотный пуск, выход на установившийся режим холостого хода, включение и выключение нагрузки) характерно появление высокочастотных колебаний оценок со значительной амплитудой, достигающей двукратного значения номинального момента (рис. 1). При отклонении параметров настраиваемой модели наблюдателя от эталонных амплитуда колебаний оценок существенно возрастает. При реализации наблюдателя в замкнутых системах управления с использованием обратных связей по оценке момента сопротивления необходимо осуществлять постфильтрацию оценок для компенсации пульсационных составляющих сигналов оценки переменных состояния [61]. Разработка современных эффективных структур фильтров с использованием адаптивных алгоритмов автонастройки параметров [62, 63] является отдельной сложной задачей, выходящей за рамки предмета исследования. Применение типовых линейных фильтров-постфильтраторов с глубоким подавлением пульсаций приводит к фазовой задержке сигналов, в связи с чем алгоритмы линейной фильтрации не могут быть рекомендованы к использованию в реальных системах управления электроприводами УЭЦН.

Выводы

1. В условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации возникает актуальная задача повышения надежности и нара-

ботки на отказ погружных электродвигателей путем применения бездатчиковых замкнутых систем управления электроприводов установок центробежных электронасосов для оптимизации пусковых режимов в циклах откачки жидкости. Наиболее эффективным подходом для косвенного оценивания неизмеряемых переменных состояния погружных электроприводов является применение наблюдателей состояния.

2. В статье разработана настраиваемая математическая модель наблюдателя полного порядка угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу, расширенного по вектору состояния, для динамической системы «кабельная линия – синхронный двигатель с постоянными магнитами» в дискретном времени. Конечноразностная форма настраиваемой модели наблюдателя позволяет выполнить его реализацию на цифровых сигнальных процессорах станции управления установок центробежных электронасосов.

3. В различных типовых рабочих режимах (частотный пуск, включение и выключение нагрузки), а также при отклонении параметров настраиваемой модели наблюдателя от параметров эталонной модели разработанный наблюдатель обеспечивает асимптотическую сходимость по угловой скорости ротора к эталонной траектории с интегральной ошибкой в динамических режимах менее 5,5 % и со статической ошибкой менее 1,5 %.

4. Показана эффективность наблюдателя состояния при восстановлении момента сопротивления на валу: статическая ошибка оценивания во всех рассмотренных режимах составила менее 1,5 %. Однако в переходных режимах возникают значительные высокочастотные пульсации с интегральной ошибкой до 191 %. Для применения данного сигнала в контурах с обратной связью необходима разработка адаптивных алгоритмов постфильтрации оценки момента сопротивления на валу.
5. Разработана теория для построения наблюдателей состояния в дискретном времени, предназначенных для реализации на промышленных контроллерах и создающая базу для проведения экспериментальных исследований и верификации моделей. Разработанный наблюдатель полного порядка рекомендован к использованию в бездатчиковых системах управления электроприводов погружных установок скважинной добычи нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные технико-экономические показатели добычи нефти по способам эксплуатации и категориям скважин // Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/pok107_Calendar1_2022.xls (дата обращения: 01.12.2024).
2. Калафат О.С. Применение кратковременного периодического режима работы установок электроцентробежных насосов на скважинах Горшковской площади Приобского месторождения // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск, 7–11 апреля 2014. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 2. – С. 92–94.
3. Учет условий эксплуатации при проектировании периодических режимов работы скважины, оборудованных УЭЦН / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, С.Б. Якимов, А.А. Клусов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2013. – № 6. – С. 33–39.
4. Камалетдинов Р.С. Эксплуатация малодобитных скважин в текущих реалиях: вызовы и возможности // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2022. – № 12. – С. 96–103.
5. Konopczynski M.R., Moore W.R., Hailstone J.J. ESPs and intelligent completions // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, 2002. – P. 1–13.
6. Тагирова К.Ф., Нугаев И.Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин // Мехатроника, автоматизация, управление – 2020. – Т. 21. – № 2. – С. 102–109. DOI: 10.17587/mau.21.102-109.
7. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачёва, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 54–58. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58.
8. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Электротехнологические установки для нефтедобычи. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 160 с.
9. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике и нефтегазовой промышленности // И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: Недра, 2007. – 478 с.
10. Станции управления Электрон-05. Руководство по эксплуатации. ЦТКД 388 РЭ. Версия 18.24 для асинхронного и вентильного двигателя. – Радужный: ЗАО «Электрон», 2017. – 169 с.
11. Bose B.K. Modern power electronics and AC drives. – Knoxville: Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.
12. Leonhard W. Control of electrical drives. – New York: Springer, 2001. – 474 p.
13. Феофилактов С. Высокоточные системы погружной телеметрии для проведения гидродинамических исследований // Нефтегазовая вертикаль. – 2011. – № 11. – С. 62–63.
14. О совершенствовании моделей АСУ ТП нижнего уровня УЭЦН в условиях перевода скважин в прерывистые режимы эксплуатации / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.А. Филипас, С.С. Попов, Е.В. Боловин, Е.А. Беляускене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 243–259. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5263.
15. Сипайлов В.А., Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю. Оптимальное управление установкой электроцентробежного насоса с частотно-регулируемым асинхронным приводом // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 66–69.
16. Luo R., Wang Z., Sun Y. Optimized Luenberger observer-based PMSM sensorless control by PSO // Modelling and Simulation in Engineering. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–17.
17. He L., Wang F. Zynq implemented Luenberger disturbance observer based predictive control scheme for PMSM drives // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2020. – Vol. 35. – Iss. 2. – P. 1770–1778.
18. Henwood N., Malaize J., Praly L. A robust nonlinear Luenberger observer for the sensorless control of SM-PMSM: rotor position and magnets flux estimation // 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – Montreal, Quebec, Canada, 2012. – P. 1625–1630.
19. Induction motor tachless fault detection in transient speeds using adaptive generalized Vold Kalman filter / M.F. Yakhni, S. Gauet, A. Sakout, H. Assoum, E. Etien, L. Rambaut, M. Ali, M. El-Gohari // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 24. – P. 1–13.
20. Xu Z., Rahman M.F. An extended Kalman filter observer for the direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – Singapore, 2003. – P. 686–691.
21. Tety P., Konate A., Asseu O. A robust extended Kalman filter for speed-sensorless control of a linearized and decoupled PMSM drive // Engineering. – 2015. – Vol. 7. – P. 691–699.

22. Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump / R. Iudin, A. Petrochenkov, E. Solodkiy, D. Vishnyakov, B. Krause, S. Salnikov // *IEEE Sensors Journal*. – 2024. – Vol. 24. – № 1. – P. 830–843. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331354.
23. Chen Z., Wang L., Liu X. Sensorless direct torque control of PMSM using unsected Kalman filter // *Proceedings of the 18th World Congress the International Federation of Automatic Control*. – Milano, Italy, 2011. – P. 4380–4385.
24. Нос О.В., Пудкова Т.В., Нос Н.И. Синтез наблюдателя электродвижущей силы вращения синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов с переключаемой структурой и самонастраивающимися подсистемами фильтрации и оценки углового положения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2024. – Т. 24. – № 3. – С. 415–423. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-415-423.
25. Wang G., Zhan H. A new speed adaptive estimation method based on an improved flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives // *ISA Transactions*. – 2022. – Vol. 128. – P. 675–685.
26. Speed sensorless control of a bearingless induction motor based on sliding mode observer and phase-locked loop / Z. Yang, Q. Ding, X. Sun, C. Lu, H. Zhu // *ISA Transactions*. – 2022. – Vol. 123. – P. 346–356.
27. Multi-sliding mode current disturbance suppression scheme based model reference adaptive system for sensorless control of permanent magnet synchronous motor / S. Zhang, A. Shen, X. Luo et al. // *ISA Transactions*. – 2023. – Vol. 137. – P. 615–628.
28. A ripple suppression of sensorless FOC of PMSM electrical drive system based on MRAS / X. Chi, C. Wang, Q. Wu, J. Yang // *Results in Engineering*. – 2023. – Vol. 20. – P. 1–9.
29. Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer / Y. Ren, R. Wang, S.J. Rind, P. Zeng, L. Jiang // *Control Engineering Practice*. – 2022. – Vol. 123. – P. 1–14.
30. Neural network dynamic surface position control of n-joint robot driven by PMSM with unknown load observer / Q. Yang, H. Yu, X. Meng, Y. Shang // *IET Control Theory & Applications*. – 2022. – Vol. 16. – P. 1208–1226.
31. Tan L.N., Cong T.P., Cong D.P. Neural network observers and sensorless robust optimal control for partially unknown PMSM with disturbances and saturating voltages // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2021. – Vol. 36. – Iss. 10. – P. 12045–12056.
32. Continuous-discrete time neural network observer for nonlinear dynamic systems application to vehicle systems / H.A. Ghani, H. Laghmara, S.A. Ali, S. Ainouz, X. Gao, R. Khemmar // *IFAC-PapersOnLine*. – 2023. – Vol. 56. – Iss. 2. – P. 5685–5690.
33. Разработка наблюдателя угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу регулируемого синхронного двигателя с постоянными магнитами, питающегося через длинный кабель / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, С.С. Попов, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, В.В. Тимошкин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 237–257. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4879.
34. Разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя / А.С. Глазырин, С.С. Попов, Е.И. Попов, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.А. Филипас, В.В. Тимошкин, Е.А. Беляускене, Ю.О. Кулеш, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, М.В. Денек // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 203–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826.
35. Разработка наблюдателя угловой скорости и момента сопротивления на валу для синхронных двигателей с постоянными магнитами с повышенной устойчивостью к параметрическим возмущениям / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, С.С. Попов, Е.В. Боловин // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2024. – № 4 (65). – С. 47–54. DOI: 10.18503/2311-8318-2024-4(65)-47-54.
36. Глазырин А.С. Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояний и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2016. – 376 с.
37. Пантелеев А.В., Якимов Ф.С., Босов А.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2001. – 376 с.
38. Попов Е.И., Глазырин А.С., Копырин В.А. Влияние методов дискретизации на обусловленность информационной матрицы и характер формирования гиперсфер ошибок в задачах оценивания параметров по малому числу наблюдений // *Системы анализа и обработки данных*. – 2025. – Т. 97. – № 1. – С. 85–104.
39. Holton T. Digital signal processing. Principles and applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – 1032 p.
40. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: ИД МЭИ, 2015. – 373 с.
41. Сравнительный анализ частотных характеристик вариантов построения цифровых моделей фильтров нижних частот компонентов электротехнических комплексов / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, С.С. Попов, В.А. Копырин, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, Н.А. Воронина, В.З. Ковалев // *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*. – 2023. – Т. 2. – № 3. – С. 9–19. DOI: 10.18799/29495407/2024/3/62.
42. Разработка математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами в дискретном времени / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, С.С. Попов, Р.Н. Хамитов, М.В. Денек // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2024. – Т. 12. – № 1. – С. 36–42. DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-1-36-42.
43. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 636 с.
44. Butt R. An introduction to numerical methods and analysis using MATLAB. – Saudi Arabia, Riyadh: King Saud University, 2021. – 319 p.
45. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 2005. – 544 с.
46. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков В.А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
47. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа. Логос, 2000. – 607 с.
48. Костарев Н.А., Труфанова Н.М. Применение численного моделирования для анализа эффективности греющего кабеля при добыче высоковязкой нефти // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 99–110. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3776.
49. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // *Известия*

- Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 154–167. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365.
50. Раков И.В. Методика оценивания параметров и переменных состояния электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» на основе баланса мгновенной потребляемой мощности: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2024. – 143 с.
51. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
52. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. – Blacksburg: CRC Press, 2010. – 564 p.
53. Устройство для получения сигнала оценки частоты вращения ротора и сигнала оценки момента сопротивления на валу синхронного двигателя с постоянными магнитами, питающегося через длинный кабель: пат. 2849168 РФ, № 2025112135; заявл. 12.05.2025, опубл. 23.10.2025.
54. Способ получения сигнала оценки частоты вращения ротора и сигнала оценки момента сопротивления на валу синхронного двигателя с постоянными магнитами, питающегося через длинный кабель: пат. 2849169 РФ, № 2025112206; заявл. 12.05.2025, опубл. 23.10.2025.
55. Погружные вентильные электродвигатели. URL: <https://nt-lift.com/catalog/element/pogruzhnye-ventilnye-elektrodvigateli/> (дата обращения: 14.11.2024).
56. ПОДОЛЬСКАБЕЛЬ КПБП-90, КПБК-90 Общее описание на кабели для питания нефтепогружных электронасосов. URL: <https://podolskab.nt-rt.ru/images/manuals/7-1.pdf> (дата обращения: 14.11.2024).
57. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы. – М.: Вузовская книга, 2013. – 244 с.
58. Hairer E., Wanner G. Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential algebraic problems. – Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 614 p.
59. Astrom K.J., Murray R.M. Feedback systems. An introduction for scientists and engineers. – Princeton: Princeton University Press, 2021. – 578 p.
60. Уразаков К.Р., Рукин М.В., Борисов А.О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 62–71. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959.
61. Афанасьев К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 106 с.
62. Liu D., Zhao H., Zhou Y. A class of robust censored regression adaptive filtering algorithms // Digital Signal Processing. – 2024. – Vol. 146. – P. 1–14.
63. Boguslavskiy J.A., Borodovsky M. Dynamic systems models. New method of parameter and state estimation. – Switzerland: Springer International Publ., 2016. – 201 p.

Информация об авторах

Александр Савельевич Глазырин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; ассистент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. asglazyrin@tpu.ru

Евгений Игоревич Попов, аспирант кафедры кибернетических систем, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского промышленного университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; porovei72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>.

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского промышленного университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. kopyrinva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>

Рустам Нуриманович Хамитов, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Тюменского промышленного университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; профессор отделения машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. apple_27@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Владимир Захарович Ковалев, доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; vz_kovalev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Александр Андреевич Щипков, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; AAShipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Юлия Олеговна Кулеш, ассистент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; аспирант кафедры электроники и автоматики физических установок Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. yok13@tpu.ru

Семен Семенович Попов, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск, пр. Фрунзе, 119е. ssp14@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>

Евгений Владимирович Боловин, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; доцент кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; orange@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>

Евгения Александровна Беляускене, старший преподаватель отделения математики и математической физики, Инженерная школа ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; аспирант кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; eam@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1638-4366>

Ольга Владимировна Архипова, старший преподаватель Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; arkh82@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8773-8846>

Эмиль Ильшатович Хусайнов, инженер Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; husainov-e@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1370-5972>

Поступила в редакцию: 10.10.2025

Поступила после рецензирования: 27.10.2025

Принята к публикации: 01.11.2025

REFERENCES

1. *Main technical and economic indicators of oil production by operating methods and well categories. Federal State Statistics Service.* Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/pok107_Calendar1_2022.xls. (accessed 1 December 2024).
2. Kalafat O.S. Application of short-term periodic operation mode of electric centrifugal pump units at wells of the Gorshkovskaya area of the Priobskoe field. *Problems of Geology and Development of Subsoil. Proc. of the XVIII International Symposium named after Academician M.A. Usov of Students and Young Scientists.* Tomsk, April, 7–11, 2014. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. Vol. 2, pp. 92–94. (In Russ.)
3. Ivanovsky V.N., Sabirov A.A., Yakimov S.B., Klusov A.A. Accounting for operating conditions in the design of periodic operating modes of wells equipped with ESP. *Equipment and technologies for the oil and gas complex*, 2013, no. 6, pp. 33–39. (In Russ.)
4. Kamaletdinov R.S. Operation of marginal wells in current realities: challenges and opportunities. *Business magazine Neftegaz.Ru*, 2022, no. 12, pp. 96–103. (In Russ.)
5. Konopczynski M. R., Moore W. R., Hailstone J. J. ESPs and intelligent completions. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* San Antonio, Texas, 2002. pp 1–13.
6. Tagirova K.F., Nugaev I.F. Actual tasks of oil-wells electric submersible pump control automation. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 21, no. 2, pp. 102–109. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.21.102-109.
7. Likhacheva E.A., Ostrovskiy V.G., Lykova N.A., Musinskiy A.N., Baidarov P.A. Oil submersible pumps reliability during cyclic operation. *PROneft. Professionally about oil*, 2021, vol. 6 (1), pp. 54–58. (In Russ.) DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58.
8. Kovalev A.Yu., Kuznecov E.M., Anikin V.V. *Electrical engineering installations for oil production.* Omsk, OmGTU Publ., 2015. 160 p. (In Russ.)
9. Ershov M.S., Belousenko I.V. *New technologies and modern equipment in the electric power industry of the oil and gas industry.* Moscow, Nedra Publ., 2007. 477 p. (In Russ.)
10. *Control stations Elektion-05. Operation manual. CTCD 388 RE. Version 18.24 for asynchronous and valve motor.* Raduzhny, JSC «Elektion» Publ., 2017. 169 p. (In Russ.)
11. Bose B.K. *Modern power electronics and AC drives.* Knoxville, Prentice Hall PTR, 2002. 738 p.
12. Leonhard W. *Control of electrical drives.* New York, Springer, 2001. 474 p.
13. Feofilaktov S. High-precision submersible telemetry systems for hydrodynamic research. *Neftegazovaya vertical*, 2011, no. 11, pp. 62–63. (In Russ.)
14. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Filipas A.A., Popov S.S., Bolovin E.V., Beliauskene E.A. Improving low-level plant control systems ESP models in conditions of oil well conversion to periodic operating modes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 243–259. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5263.
15. Sipaylov V.A., Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu. Optimal control of an electric centrifugal pump installation with a frequency-controlled asynchronous drive. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2009, no. 4, pp. 66–69. (In Russ.)
16. Luo R., Wang Z., Sun Y. Optimized Luenberger observer-based PMSM sensorless control by PSO. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022, vol. 2022, pp. 1–17.

17. He L., Wang F. Zynq. Implemented Lunenberger disturbance observer based predictive control scheme for PMSM drives. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2020, vol. 35, Iss. 2, pp. 1770–1778.
18. Henwood N., Malaize J., Praly L. A robust nonlinear Luenberger observer for the sensorless control of SM-PMSM: rotor position and magnets flux estimation. *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, Quebec, Canada, 2012. pp. 1625–1630.
19. Yakhni M.F., Galet S., Sakout A., Assoum H., Etien E., Rambaut L., Ali M., El-Gohari M. Induction motor tachless fault detection in transient speeds using adaptive generalized Vold Kalman filter. *Results in Engineering*, 2024, vol. 24, pp. 1–13.
20. Xu Z., Rahman M.F. An extended Kalman filter observer for the direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Singapore, 2003. pp. 686–691.
21. Tety P., Konate A., Asseu O. A robust extended Kalman filter for speed-sensorless control of a linearized and decoupled PMSM drive. *Engineering*, 2015, vol. 7, pp. 691–699.
22. Iudin R., Petrochenkov A., Solodkiy E., Vishnyakov D., Krause B., Salnikov S. Software Complex for Sensorless Control of an Electrical Submersible Pump. *IEEE Sensors Journal*, 2024, vol. 24, no 1, pp. 830–843. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331354.
23. Chen Z., Wang L., Liu X. Sensorless direct torque control of PMSM using unsected Kalman filter. *Proceedings of the 18th World Congress. The International Federation of Automatic Control*. Milano, Italy, 2011. pp. 4380–4385.
24. Nos O.V., Pudkova T.V., Nos N.I. The sliding-mode observer for PMSM field-oriented sensorless control with adaptive filter and PLL. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 415–423. (In Russ.) DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-415-423.
25. Wang G., Zhan H. A new speed adaptive estimation method based on an improved flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives. *ISA Transactions*, 2022, vol. 128, pp. 675–685.
26. Yang Z., Ding Q., Sun X., Lu C., Zhu H. Speed sensorless control of a bearingless induction motor based on sliding mode observer and phase-locked loop. *ISA Transactions*, 2022, vol. 123, pp. 346–356.
27. Zhang S., Shen A., Luo X., Tang Q., Li Z. Multi-sliding mode current disturbance suppression scheme based model reference adaptive system for sensorless control of permanent magnet synchronous motor. *ISA Transactions*, 2023, vol. 137, pp. 615–628.
28. Chi X., Wang C., Wu Q., Yang J. A ripple suppression of sensorless FOC of PMSM electrical drive system based on MRAS. *Results in Engineering*, 2023, vol. 20, pp. 1–9.
29. Ren Y., Wang R., Rind S.J., Zeng P., Jiang L. Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer. *Control Engineering Practice*, 2022, vol. 123, pp. 1–14.
30. Yang Q., Yu H., Meng X., Shang Y. Neural network dynamic surface position control of n-joint robot driven by PMSM with unknown load observer. *IET Control Theory & Applications*, 2022, vol. 16, pp. 1208–1226.
31. Tan L.N., Cong T.P., Cong D.P. Neural network observers and sensorless robust optimal control for partially unknown PMSM with disturbances and saturating voltages. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, Iss. 10, pp. 12045–12056.
32. Ghani H.A., Laghmara H., Ali S.A., Ainouz S., Gao X., Khemmar R. Continuous-discrete time neural network observer for nonlinear dynamic systems application to vehicle systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2023, vol. 56, no. 2, pp. 5685–5690.
33. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Popov S.S., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Timoshkin V.V. Development of an observer of rotor angular velocity and resistance moment on the shaft of an adjustable permanent magnet synchronous motor powered through long cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 237–257. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4879.
34. Glazyrin A.S., Popov S.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Beliauskene E.A., Kulesh Yu.O., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Deneko M.V. Desing of an observer with real time monitoring speed and load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 203–219. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826.
35. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Popov S.S., Bolovin E.V. Design of rotor speed and load torque observer for submersible permanent magnet synchronous motor with increased parametric robustness. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2024, no. 4 (65), pp. 47–54. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2024-4(65)-47-54.
36. Glazyrin A.S. *Methods and algorithms for efficient evaluation of variable states and parameters of induction motors of controlled electric drives*. Dr. Diss. Tomsk, 2016. 376 p.
37. Panteleev A.V., Yakimova A.S., Bosov A.V. *Ordinary differential equations in examples and problems*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 376 p. (In Russ.)
38. Popov E.I., Glazyrin A.S., Kopyrin V.A. The influence of discretization methods on the conditionality of the information matrix and the nature of the formation of error hyperspheres in problems of parameter estimation based on a small number of observations. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh*, 2025, no. 1 (97), pp. 85–104. (In Russ.)
39. Holton T. *Digital signal processing. Principles and applications*. Cambridge, Cambridge University Press, 2021. 1032 p.
40. Anuchin A.S. *Electric drive control systems*. Moscow, MEI Publ. house, 2015. 373 p. (In Russ.)
41. Glazyrin A.S., Popov E.I., Popov S.S., Kopyrin V.A., Kladiev S.N., Leonov A.P., Voronina N.A., Kovalev V.Z. Comparative analysis of frequency responses of options for constructing low-pass filters of electrical systems digital models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial cybernetics*, 2023, vol. 2, no. 3, pp. 9–19. (In Russ.) DOI: 10.18799/29495407/2024/3/62
42. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Popov S.S., Khamitov R.N., Deneko M.V. *Development of a permanent magnet synchronous motor mathematical model in a discrete-time*. Dynamics of systems, mechanisms and machines, 2024, vol. 12, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.) DOI: 10.25206/2310-9793-2024-12-1-36-42
43. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Numerical methods*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2015. 636 p.
44. Butt R. *An introduction to numerical methods and analysis using MATLAB*. Saudi Arabia, Riyadh, King Saud University, 2021. 319 p.
45. Panteleev A.V., Letova T.A. *Optimization methods in examples and problems*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 544 p.
46. Sipaylov G.A., Kononenko E.V., Khorkov V.A. *Electrical machines (special course)*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 287 p.

47. Kopylov I.P. *Electrical machines*. Moscow, Vysshaya shkola. Logos Publ., 2000. 607 p.
48. Kostarev N.A., Trufanova N.M. Numerical simulation application to analyzing heating cable eddiciency during mining high viscous oil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023. vol. 334, no. 2, pp. 99–110. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3776.
49. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365.
50. Rakov I.V. *Methodology for assessing the parameters and state variables of the electrical complex «cable line – induction motor» based on the balance of instantaneous power consumption*. Cand. Diss. Tomsk, 2024. 143 p. (In Russ.)
51. Vinogradov A.B. *Induction motors vector control*. Ivanovo, V.I. Lenin Ivanovo State Energy University Publ., 2008. 298 p. (In Russ.)
52. Krishnan R. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. Blacksburg, CRC Press, 2010. 564 p
53. Glazyrin A.S., Popov S.S., Kopyrin V.A., Popov E.I., Isaev Yu.N., Bolovin E.V., Kladiev S.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Khamitov R.N., Kulesh Yu.O., Belyauskene E.A., Chamin D.E., Permyakov M.O., Kuznetsov M.S., Baturin N.S. *Device for obtaining a signal for estimating the rotor speed and a signal for estimating the torque of resistance on the shaft of a permanent magnet synchronous motor fed through a long cable*. Patent RF no. 2025112135, 2025. (In Russ.)
54. Glazyrin A.S., Popov S.S., Kopyrin V.A., Popov E.I., Isaev Yu.N., Bolovin E.V., Kladiev S.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Khamitov R.N., Kulesh Yu.O., Belyauskene E.A., Chamin D.E., Permyakov M.O., Kuznetsov M.S., Baturin N.S. *A method for obtaining a signal for estimating the rotor speed and a signal for estimating the torque of resistance on the shaft of a permanent magnet synchronous motor fed through a long cable*. Patent RF no. 2025112206, 2025. (In Russ.)
55. *Permanent magnet motors*. Available at: <https://en.nt-lift.com/catalog/element/permanent-magnet-motors/> (accessed 14 November 2024).
56. *PODOLSKABEL KPBП-90, KPBK-90 General description of cables for powering oil submersible electric pumps*. (In Russ.) Available at: <https://podolskab.nt-rt.ru/images/manuals/7-1.pdf> (accessed 14 November 2024).
57. Panteleev A.V., Metlitskaya D.V., Aleshina E.A. *Global optimization methods. Metaheuristic methods and algorithms*. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2013. 244 p. (In Russ.)
58. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II: Stiff and differential algebraic problems*. Berlin, Springer-Verlag, 1996. 614 p.
59. Astrom K.J., Murray R.M. *Feedback Systems. An introduction for scientists and engineers*. Princeton, Princeton University Press, 2021. 578 p.
60. Urazakov K.R., Rukiv M.V., Borisov A.O. Simulation of thermal processes in a submersible notor of an electric centrifugal pump operating in a periodic mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 62–71. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959.
61. Afanasiev K.S. *Development of a state observer for an induction electric drive with increased parametric robustness*. Cand. Diss. Tomsk, 2015. 106 p. (In Russ.)
62. Liu D., Zhao H., Zhou Y. A class of robust censored regression adaptive filtering algorithms. *Digital Signal Processing*, 2024, vol. 146, pp. 1–14.
63. Boguslavskiy J.A., Borodovsky M. *Dynamic Systems Models. New Method of Parameter and State Estimation*. Switzerland, Springer International Publ., 2016. 201 p.

Information about the authors

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. asglazyrin@tpu.ru

Evgeniy I. Popov, Postgraduate Student, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; assistant National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. popovei72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. kopyrinva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. apple_27@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. vz_kovalev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>

Alexander A. Filipas, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Alexander A. Shchipkov, Cand. Sc., Associate Professor, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University “MEPhI”, 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. aash-chipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Yulia O. Kulesh, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Postgraduate Student, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University “MEPhI”, 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; yok13@tpu.ru

Semen S. Popov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Software Engineer «NPF Mechatronica-Pro» LTD, 119e, Frunze avenue, Tomsk, 634513, Russian Federation. ssp14@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>

Evgeniy V. Bolovin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; orange@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>

Evgeniia A. Beliauskene, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Postgraduate Student, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; eam@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1638-4366>

Olga V. Arkhipova, Senior Lecturer, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; arkh82@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8773-8846>

Emil I. Khusainov, Engineer, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; husainov-e@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1370-5972>

Received: 10.10.2025

Revised: 27.10.2025

Accepted: 01.11.2025