

УДК 62-50

DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5263

Шифр специальности ВАК: 2.3.3, 2.3.1

Обзорная статья

О совершенствовании моделей АСУ ТП нижнего уровня УЭЦН в условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации

А.С. Глазырин^{1,2}, Е.И. Попов^{3✉}, В.А. Копырин³, Р.Н. Хамитов^{3,4}, В.З. Ковалев²,
А.А. Филипас¹, С.С. Попов^{1,5}, Е.В. Боловин^{1,6}, Е.А. Беляускене¹

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 Омский государственный технический университет, Россия, г. Омск

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

⁶ ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, г. Томск

✉ popovei72@mail.ru

Аннотация. Актуальность. В настоящее время большая часть объема добычи нефти в России приходится на установки центробежных электронасосов, при этом с каждым годом возрастает доля установок, работающих в режиме прерывистой эксплуатации с циклами накопления и откачки жидкости. При этом последние исследования надежности их компонентов показывают, что наработка на отказ погружного оборудования снижается до 2,5 раз по сравнению с оборудованием, находящимся в режимах непрерывной эксплуатации. Снижение надежности связано с динамикой переходных процессов в автоматизированных системах управления нижнего уровня, которая на сегодняшний день при выработке управленческих решений по оптимизации работы скважины не учитывается, а вся подсистема нижнего уровня, как правило, представляется линейными или нелинейными статическими звеньями. Такой подход не позволяет управлять динамикой процессов внутри самой подсистемы в условиях перевода скважин к прерывистым режимам эксплуатации. Это обуславливает актуальность разработки динамических моделей подсистемы электропривода погружных насосов с целью оптимизации переходных процессов по критерию наработки на отказ элементов погружного оборудования. **Цель.** Совершенствование моделей систем нижнего уровня автоматизированного управления погружным электродвигателем установки центробежных электронасосов добычи нефти в условиях перевода скважины в режим прерывистой эксплуатации с целью повышения управляемости. **Методы.** Методы системного анализа и структурно-параметрического синтеза систем автоматизированного управления технологическими процессами, методы проектирования систем векторного управления электроприводов, методы идентификации переменных состояния на основе наблюдателей с использованием явных математических моделей, методы параметрической идентификации настраиваемых моделей нестационарных динамических систем. **Результаты.** Предложен подход к построению оперативного уровня управления установками центробежных электронасосов, включающий внедрение замкнутых бездатчиковых систем электропривода с применением наблюдателей состояния на основе явных настраиваемых математических моделей нестационарной динамической системы «длинный кабель – погружная регулируемая электрическая машина» и методов их динамической идентификации, создающий предпосылки для дальнейшей постановки и решения задач оптимизации динамических процессов внутри подсистемы нижнего уровня в условиях перевода скважины в прерывистые режимы эксплуатации. Предложен переход к динамическим моделям автоматизированных систем управления нижнего уровня на основе редуцированных математических моделей электротехнической подсистемы установок центробежных электронасосов из соображений повышения управляемости и учета физических ограничений доступных средств измерений.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическим процессом, автоматизированная система управления нижнего уровня, установки центробежных электронасосов, системы управления электроприводов, прерывистый режим эксплуатации скважины

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: О совершенствовании моделей АСУ ТП нижнего уровня УЭЦН в условиях перевода нефтяных 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

UDC 62-50

DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5263

Review article

Improving low-level plant control systems ESP models in conditions of oil well conversion to periodic operating modes

A.S. Glazyrin^{1,2}, E.I. Popov^{3✉}, V.A. Kopyrin³, R.N. Khamitov^{3,4}, V.Z. Kovalev²,
A.A. Filipas¹, S.S. Popov^{1,5}, E.V. Bolovin^{1,6}, E.A. Beliauskene¹

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 Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

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

⁶ LLC «INT» of JSC «EleSy», Tomsk, Russian Federation

✉ popovei72@mail.ru

Abstract. Relevance. Currently, the majority of oil production in Russia is carried out using centrifugal electric pumps, and the share of installations operating in periodic modes with cycles of accumulation and pumping of liquid is increasing every year. At the same time, the latest studies of the reliability of their components show that the mean time between failures of submersible equipment is reduced to 2.5 times compared to equipment in continuous operation modes. The decrease in reliability is associated with the dynamics of transient processes in automated lower-level control systems, which is currently not taken into account when developing management decisions to optimize well operation, and the entire lower-level subsystem, as a rule, is represented by linear or nonlinear static links. This approach does not allow controlling the dynamics of processes within the subsystem itself in the conditions of wells being transferred to intermittent operating modes. This determines the relevance of developing dynamic models of the submersible pump electric drive subsystem in order to optimize transient processes according to the criterion of the time between failures of submersible equipment elements. **Aim.** Improving models of lower-level automated control systems for a submersible electric motor of a centrifugal electric pump installation for oil production under conditions of switching a well to periodic operation mode in order to improve controllability. **Methods.** Methods of system analysis and structural-parametric synthesis of automated control systems of technological processes, methods of designing vector control systems for electric drives, methods of identifying state variables based on observers using explicit mathematical models, methods of parametric identification of customizable models of non-stationary dynamic systems. **Results.** The authors have proposed the approach to constructing an operational control level for centrifugal electric pump installations, including the introduction of closed sensorless electric drive systems using state observers based on explicit adjustable mathematical models of the non-stationary dynamic system "long cable – submersible adjustable electric machine" and methods of their dynamic identification, creating prerequisites for further formulation and solution of problems of optimizing dynamic processes within the lower-level subsystem under conditions of transferring the well to intermittent operating modes. A transition to dynamic models of automated lower-level control systems based on reduced mathematical models of the electrical subsystem of centrifugal electric pump installations is proposed for increasing controllability and taking into account the physical limitations of available measuring instruments.

Keywords: automated process control system, automated lower-level control system, centrifugal electric pump unit installations, electric drive control systems, periodic well operation mode

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., 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. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5263

Введение

По состоянию на 2021 г. 82 % объема добычи нефти в Российской Федерации приходится на установки погружных центробежных электронасосов (УЭЦН) [1]. В период с 2020 по 2022 гг. фонд

скважин, оборудованных УЭЦН, возрос на 15 %, и нет оснований полагать, что в ближайшем будущем объемы добычи нефти будут сокращаться [1–4]. Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 г., стоит ожидать введения в

эксплуатацию месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти «на основе инновационных отечественных технологий и оборудования» [5].

В связи с этим актуальной задачей является проведение комплекса мероприятий, направленных на повышение показателей эффективности эксплуатации скважины с точки зрения максимизации экономической выгоды, таких как удельные энергозатраты на тонну добытой нефти и показатели надежности (включая среднюю наработку на отказ, время непрерывной работы и т. д.) нефтедобывающего оборудования. Кроме улучшения эксплуатационных показателей компонентов УЭЦН достижение поставленной задачи может быть решено путем разработки и внедрения эффективных средств автоматизированного управления процессом механизированной нефтедобычи [6, 7].

В связи со снижением качества ресурсной базы в нефтяной отрасли и в условиях перевода скважин в прерывистые режимы эксплуатации проблема повышения эффективности технологических процессов добычи нефти стоит особенно остро. Рассматривая современные подходы к совершенствованию систем мониторинга и управления технологическими процессами в промышленности, можно выделить идеи, основанные на применении цифровых двойников, представляющих собой как цифровую модель реального объекта, так и совокупность двухсторонних информационных связей между объектом и автоматизированной системой управления (АСУ) верхнего уровня [8]. Основной задачей цифрового двойника является анализ доступных для прямого или косвенного измерения показателей работы объекта с целью диагностики, идентификации, мониторинга и моделирования различных типовых и нестандартных режимов [9, 10]. Это, в свою очередь, позволяет осуществлять выработку оптимальных управленческих решений от АСУ верхнего уровня.

Разработка цифровых двойников АСУ УЭЦН нижнего уровня подразумевает применение динамических моделей гидромеханических, электротехнических и электромеханических подсистем. Учет динамики каждой подсистемы существенен при постановке задачи повышения эффективности работы УЭЦН, поскольку прерывистые режимы эксплуатации скважины (ПЭС) нельзя отнести к классу стационарных или квазистационарных режимов. При этом технически нет возможности формировать цифровой двойник только лишь как результат измерений. Необходимо определить положение эталонной модели реального объекта в автоматизированной системе управления технологическим процессом (АСУ ТП), в которой недоступны для измерения постоянные времени, коэффициенты и переменные моделей. Эти переменные должны быть восстановлены, чтобы количество переменных совпадало с количеством уравнений, тогда для управления будут доступны кон-

кретные решения, а не область решений. Таким образом, в АСУ ТП погружного электропривода должна присутствовать модельная составляющая, обеспечивающая косвенное измерение или вычисление необходимых параметров и переменных, что открывает возможность модельного управления.

Статические эталонные модели АСУ ТП нижнего уровня электропривода УЭЦН, которые успешно использовались для прогнозирования отклика на управляющее воздействие от АСУ ТП верхнего уровня в непрерывных режимах эксплуатации, недостаточны для решения задачи модельного управления в прерывистых режимах. Следовательно, актуальной задачей является совершенствование динамических моделей АСУ нижнего уровня для создания адаптивных автоматизированных систем управления УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации.

АСУ ТП нижнего уровня как подсистема УЭЦН в непрерывном режиме эксплуатации

Рассмотрим работу УЭЦН в режиме непрерывной или квазинепрерывной эксплуатации. С точки зрения специалистов по АСУ ТП добычи нефти, УЭЦН является подсистемой нижнего уровня, оборудованной исполнительными механизмами, комплексом измерительных средств и каналов связи, а также локальной системой управления, роль которой выполняет станция управления.

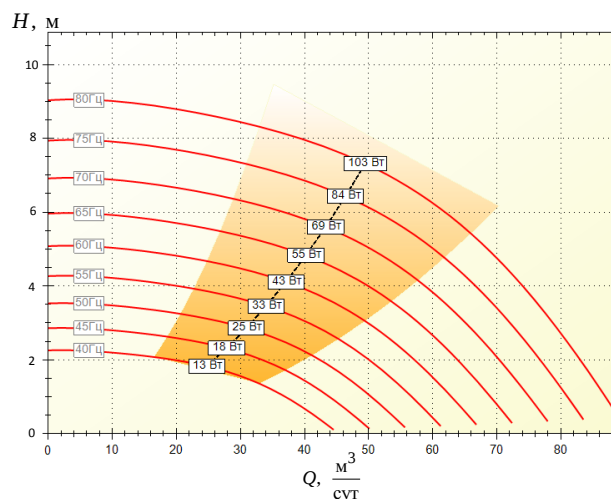


Рис. 1. Напорные характеристики насоса Новомет ВНН 2А-30.Э [11]

Fig. 1. Head characteristics of the Novomet VNN 2A-30.E pump [11]

Работа центробежного электронасоса (ЭЦН) описывается семейством напорно-расходных характеристик (рис. 1). Зафиксировав напор и подачу насоса при заданной частоте питания погружного электродвигателя (ПЭД), имеем рабочую точку, лежащую на линии нагрузки, обозначенной черной пунктирной линией.

В каждой рабочей точке нагрузочного режима подсистема электропривода УЭЦН описывается статической моделью, связывающей входные частоту тока f и действующее напряжение u с выходными значениями угловой скорости ротора ПЭД и его электромагнитным (крутящим) моментом. Относительно последней статическая модель ПЭД может быть записана в следующем виде [12]:

$$M_{\text{ПЭД}}(u, f^*) = \frac{3u^2 r'_2}{\omega_0 f^* s \left[\left(\frac{r_1 r'_2}{s x_{\mu} f^*} \right)^2 + \left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_{\text{кн}} f^*)^2 \right]}, \quad (1)$$

где r_1, r'_2 – соответственно активное сопротивление обмотки статора и приведенное активное сопротивление обмотки ротора; x_1, x'_2 – соответственно реактивное сопротивление обмотки статора и приведенное реактивное сопротивление обмотки ротора; $x_{\text{кн}} = x_1 + x'_2$; ω_0 – синхронная угловая скорость ротора; s – скольжение; f^* – относительное значение частоты питающего напряжения, $f^* = \frac{f}{f_{\text{ном}}}$, $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота питающего напряжения.

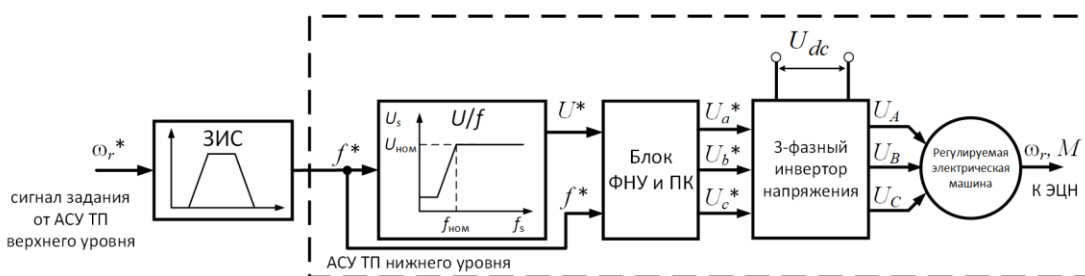
Такой подход естественен, поскольку в настоящее время системы регулирования электропривода ПЭД представляют собой скалярные разомкнутые системы [13] с вольт-частотным управлением по одному из законов М.П. Костенко [14]. Структурная схема разомкнутой скалярной системы электропривода приведена на рис. 2 [15–17].

На выходе механической подсистемы ПЭД имеют угловую скорость вала и электромагнитный момент (рис. 2). Для гидравлической подсистемы выходом являются напор и расход (рис. 3). Кроме того, в подсистему нижнего уровня входит блок погружной телеметрии, включающий погружную, наземную части и систему связи. Блоки погружной телеметрии измеряют давление, расход, динамический уровень [18]. Однако в такой системе отсутствуют блоки для измерения угловой скорости вала, момента сопротивления на валу, потокосцепле-

ния ротора. С точки зрения разработчиков АСУ ТП верхнего уровня для режима непрерывной эксплуатации в АСУ ТП нижнего уровня в этом не было необходимости.

Задатчик интенсивности изменения частоты относится к подсистеме среднего уровня АСУ ТП и позволяет реализовывать следующие режимы [19, 20] (рис. 4, а–г): а) режим плавного пуска, в котором с некоторой минимальной частоты (например, для станции управления Электрон-05 минимальная частота при пуске – от 3,5 Гц) осуществляется разгон до режима номинальной частоты в течение достаточно длительного периода времени (порядка нескольких десятков минут), в результате чего переходные процессы оказываются растянуты на время разгона и режим работы электропривода становится квазистатическим; б) режим с синхронизацией необходим в случаях высокого содержания газов в нефти для дополнительной защиты от срыва гидравлического потока; в, г) «толчковый» разгон и разгон с «раскачкой», предназначенные для режимов расклинивания ЭЦН [21–23].

По рис. 1 предположим, что мы находимся в геометрическом центре желтой области, на черной пунктирной линии отметим рабочую точку, которой соответствует некоторая конкретная частота сети. Этой частоте, в свою очередь, соответствует некоторая угловая скорость ПЭД. Положим, что нагрузка подобрана для максимального КПД. С позиции специалистов по АСУ ТП, работа электропривода УЭЦН в этой точке может быть с достаточной степенью точности описана статической линейной или нелинейной моделью. В этом случае возникает задача выбора оптимальной частоты сети с целью минимизации потерь. Данная задача может быть решена путем составления регрессионной модели установившегося режима технической системы «УЭЦН–скважина», учитывающей технологические показатели скважины и параметры жидкости, пласта и оборудования [24, 25]. Однако оптимум на основе этой модели достигается только при допущении, что УЭЦН находится в непрерывном или квазинепрерывном режиме эксплуатации.



ЗИС – задатчик интенсивности сигнала/signal intensity generator, ФНУ – формирователь напряжений управления/control voltage generator, ПК – преобразователь координат/coordinate converter

Рис. 2. Структура скалярной разомкнутой системы управления электроприводом

Fig. 2. Structure of a scalar open-loop system for controlling electric drive

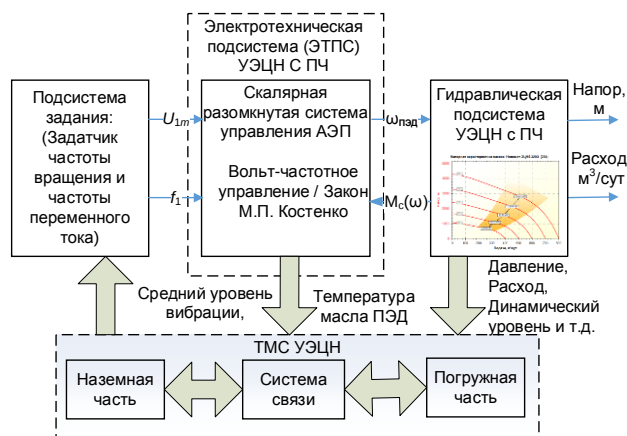


Рис. 3. Структурная схема электротехнической и гидромеханической подсистем в составе АСУ нижнего уровня

Fig. 3. Structural diagram of the electrical and hydromechanical subsystems as part of the lower-level automated control system

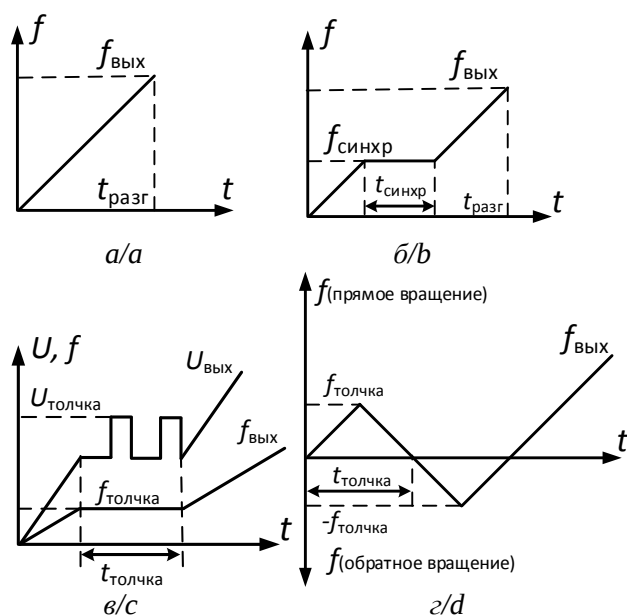


Рис. 4. Режимы пуска погружного электродвигателя при скалярном вольт-частотном управлении [19–23]

Fig. 4. Volt-frequency scalar control start modes of submersible electric motor [19–23]

Особенности работы УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации скважин

Иная ситуация возникает, если рассмотреть режимы прерывистой эксплуатации скважины. Необходимость перевода скважины в прерывистый режим возникает в связи со снижением ее коэффициента продуктивности и монотонно снижающимся дебитом [26, 27]. В этом случае более эффективным подходом к управлению УЭЦН являются двухпозиционные законы регулирования, включающие в себя циклическую смену периодов запол-

нения скважины жидкостью из пласта до достижения некоторого статического уровня $H_{ст}$ и периодов откачки жидкости до критического уровня $H_{кр}$ путем пуска УЭЦН [6, 28, 29]. Данный подход позволяет повысить добычу на 5–7 % [30, 31].

Тем не менее последние исследования вопросов работы УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации показывают, что межремонтный период ПЭД и надежность компонентов УЭЦН снижаются [32]. Это связано с тем, что периоды откачки нефти в режимах ПЭС могут составлять менее 10 минут [27] и такие режимы уже не являются режимами плавного пуска ПЭД с ограничением бросков тока и крутящего момента. К основным причинам наработки на отказ специалисты АО «Новомет-Пермь» и Пермского национального исследовательского политехнического университета относят [32]:

- высокие значения пусковых токов в сравнении с длительным частотным разгоном, характерным для режимов непрерывной эксплуатации, что ведет к росту механических нагрузок, действующих на вал насоса, и накоплению избыточного усталостного износа элементов ЭЦН;
- возникновение механических резонансов и повышенной вибрации оборудования в процессе разгона ПЭД и, как следствие, снижение ресурса гидрозащиты.

«По отдельным модулям ресурс снижается в 2–3 раза. Это приводит к необходимости пересмотра существующих конструкций УЭЦН для адаптации к периодическому режиму. ... Также может быть рекомендован тщательный анализ работы установок в режиме разгона для исследования их вибрационного поведения и разработки мер по снижению вибрации в переходных режимах» [32. С. 59].

Анализ [5] показывает, что нефтегазовая отрасль останется основным источником дохода государства еще в течение не менее двадцати лет. При этом к отраслевым проблемам и факторам риска нефтяной отрасли относят: «увеличение себестоимости нефти вследствие преобладания трудноизвлекаемых запасов...; ухудшение физико-химических характеристик добываемой нефти, включая повышение плотности...» [33. С. 4]. В связи с этим для повышения эффективности эксплуатации малодобитного фонда скважин должен быть выработан комплекс руководящих документов, включающий требования к выбору оборудования под конкретный характер режима прерывистой эксплуатации и «порядок работы с периодическим фондом скважин» [34].

Второй пункт рекомендаций можно рассматривать только применительно к подсистеме нижнего уровня АСУ ТП УЭЦН. Если ставится задача оптимизации работы УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации, необходимо также учитывать влияние

таких режимов на надежность компонентов погружной части. Отдельной задачей является выявление причин накопления избыточного усталостного износа, возникновения резонансов при разгоне ПЭД и снижения ресурса гидрозащиты ПЭД. И хотя «наиболее вероятная причина снижения наработки заключается в следующем: при каждом запуске/остановке/изменении частоты УЭЦН есть риск совпадения собственных частот установки с рабочей частотой вращения, что приводит к появлению резонанса и повышению вибрации... при увеличении вибрации происходит рост утечек через торцовые уплотнения в 5–10 раз» [32. С. 55], физико-технические закономерности этих процессов требуют проведения самостоятельных исследований.

Тем не менее результаты испытаний и основные выводы, приведенные в [32], указывают на возможность снижения влияния пусковых режимов ПЭД на ресурс элементов УЭЦН за счет оптимизации подсистемы регулирования электропривода погружной установки [35]. Необходимо совершенствование систем электропитания и автоматического управления УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации [36].

Как было показано выше, в настоящее время при синтезе структуры АСУ УЭЦН работа АСУ ТП нижнего уровня описывается линейными пропорциональными звеньями или нелинейными статическими моделями. Такой подход, являясь естественным для режимов непрерывной эксплуатации, оказывается малоприменимым для режимов прерывистой эксплуатации. Описание всей подсистемы электропривода УЭЦН статической моделью не позволяет реализовывать системы управления переходными режимами внутри самой подсистемы и, как следствие, повышать надежность компонентов УЭЦН путем программного ограничения бросков тока и момента в периоды откачки нефти средствами непосредственно самой подсистемы нижнего уровня АСУ ТП.

Векторная система регулирования ПЭД в оперативном уровне управления УЭЦН

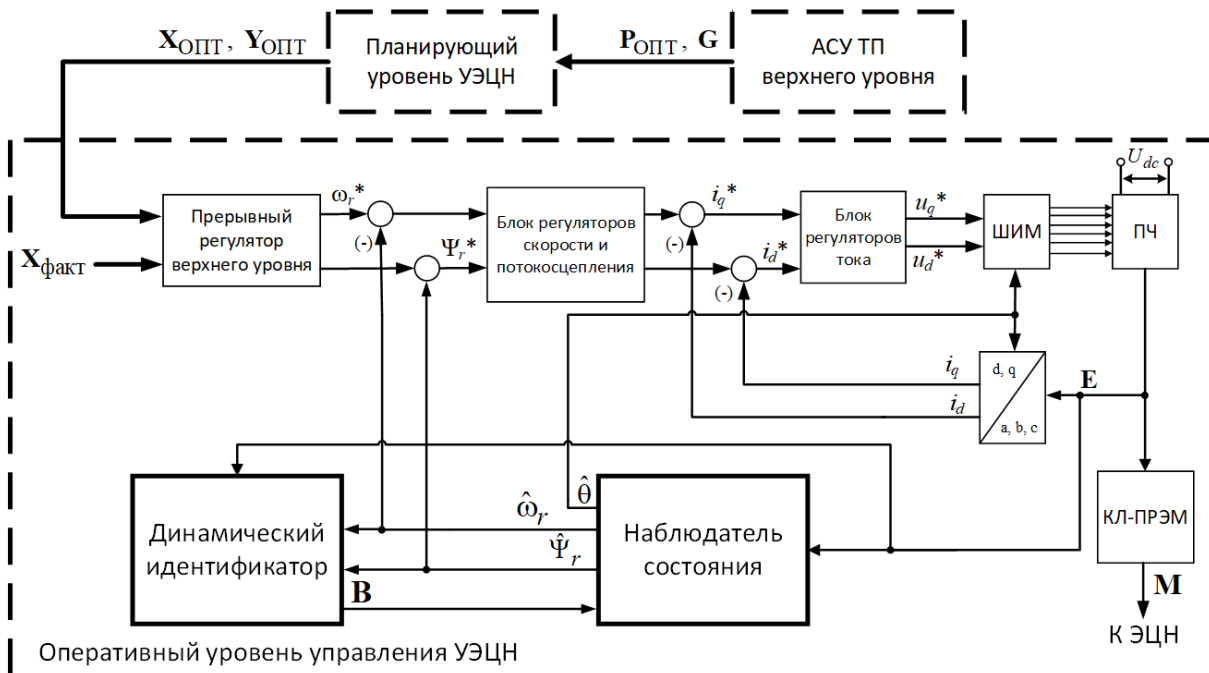
Рассмотрим многоуровневую систему АСУ ТП УЭЦН, предложенную в [6]. Оперативный уровень управления УЭЦН включает в себя алгоритмы управления выводом на режим работы и прерывные алгоритмы регулирования. При этом переходный процесс в УЭЦН в режиме откачки контролируется по измеряемым параметрам добываемой жидкости. Следовательно, процессы в электромеханической подсистеме электропривода УЭЦН не учитываются. При такой постановке задачи для математического описания подсистемы «станция управления – кабельная линия – ПЭД» достаточно использовать статическую зависимость момента от питающего напряжения, изменяющегося согласно вольт-частотному закону регулирования. Причина

этого заключается в отсутствии систем погружной телеметрии для измерения угловой скорости и момента сопротивления на валу ПЭД, что связано с традиционной компоновкой скалярной разомкнутой системой электропривода, предназначенной для режимов непрерывной эксплуатации. Однако переход к режимам прерывистой эксплуатации требует решения задачи оптимизации переходных процессов внутри самой подсистемы АСУ ТП нижнего уровня с точки зрения программного ограничения пусковых токов и моментов при заданном достаточно малом времени разгона. Установка датчиков для организации каналов связи в системе замкнутого векторного управления электроприводом затруднительна из различных технических и экономических соображений. В связи с этим более целесообразно применять бездатчиковые системы управления электроприводом УЭЦН [36].

На рис. 5 авторами предложена обобщенная структура АСУ УЭЦН, включающая в себя АСУ ТП верхнего уровня и планирующий уровень УЭЦН, подробная структура которых рассмотрена в [6], структура нижнего оперативного уровня управления включает в себя систему бездатчикового векторного регулирования ПЭД. Для простоты изложения представлен вариант компоновки без синус-фильтра и повышающего силового трансформатора (рис. 5). Данный подход позволяет рассматривать погружной электродвигатель в более общей постановке – как погружную регулирующую электрическую машину (ПРЭМ) без привязки к конкретным типам электродвигателей, например асинхронным или синхронным с постоянными магнитами.

АСУ ТП верхнего уровня представляет собой информационно-вычислительный центр месторождения, выходными параметрами которого являются оптимальные показатели добычи скважины $P_{\text{опт}}$, множество параметров G , характеризующих геологические особенности. Задачей планирующего уровня является выработка управленческих решений, направленных на обеспечение оптимальных параметров компонентов УЭЦН $Y_{\text{опт}}$ (проведение планово-предупредительных ремонтов, различных типовых технологических или геологических мероприятий) и оптимальных параметров режима работы УЭЦН $X_{\text{опт}}$ (поддержание дебита, аварийное управление и т. д.) [6].

Прерывный регулятор реализует двухпозиционный закон регулирования с режимами заполнения скважины и откачки жидкости, формируя управляющее воздействие, основываясь на фактических текущих значениях множества $X_{\text{факт}}$, включающего давление жидкости на входе насоса $P_{\text{вх}}$ и дебит скважины Q [6]. Сигнал регулятора верхнего уровня является входным для подсистемы векторного регулирования электропривода ПРЭМ [37].



ШИМ – блок широтно-импульсной модуляции с преобразователем координат/pulse width modulation unit with coordinate converter; ПЧ – преобразователь частоты/frequency converter; КЛ – кабельная линия/cable line; ПРЭМ – погружная регулируемая электрическая машина/submersible controllable electric machine.

Рис. 5. Предлагаемая структура оперативного уровня управления УЭЦН с погружной регулируемой электрической машиной как подсистема нижнего уровня АСУ ТП

Fig. 5. Proposed structure of the operational level of control of the electrical submersible pump with a submersible controllable electric machine as a subsystem of the lower level of the automated process control system

В структурной схеме (рис. 5) приняты следующие обозначения:

- $\mathbf{E} = (\mathbf{u}_{abc}^T, \mathbf{i}_{abc}^T)^T$ – вектор измеряемых электрических величин (трехфазных значений токов и напряжений) на входе кабельной линии;
- $\mathbf{B} = (\hat{\mathbf{R}}^T, \hat{\mathbf{L}}^T, \hat{\mathbf{J}}^T)^T$ – вектор оценок параметров настраиваемой математической модели нестационарной динамической системы «кабельная линия – погружная регулируемая электрическая машина»;
- $\mathbf{M} = (\omega_r, M_{эм})^T$ – вектор переменных механической подсистемы погружного электродвигателя.

Поскольку в рассматриваемой подсистеме УЭЦН нет средств измерения угловой скорости ω_r , положения θ и потокоцепления ψ_r ротора и момента сопротивления на валу M_c ПЭД, для получения вектора оценок неизмеряемых переменных состояния электромеханической подсистемы $(\hat{\omega}_r, \hat{M}_c, \hat{\theta}, \hat{\psi}_r)^T$ могут быть использованы различные методы идентификации переменных состояния:

- наблюдатели типа Льюенбергера (наблюдатели ЭДС и потокоцеплений) [38–43], характеризующиеся относительной простотой математического описания, но нелинейность объекта затрудняет настройку наблюдателя;

- наблюдатели на основе расширенного и ансценного фильтров Калмана [44–49], позволяющие естественным образом учитывать шумы за счет стохастической модели объекта и адаптивно регулировать способ обработки невязки на каждом шаге дискретизации, однако при негауссовом характере помех возникают существенные трудности с заполнением ковариационных матриц, при этом математический аппарат методов на основе калмановской фильтрации является достаточно громоздким;
- наблюдатели на основе скользящих режимов [50–55] имеют наиболее высокую устойчивость к внешним помехам измерений, но основным недостатком данного типа наблюдателей являются значительные пульсации сигналов оценок переменных состояния, свойственные любым скользящим режимам, а также существенное усложнение структуры наблюдателя при попытках преодолеть эту проблему;
- наблюдатели на основе адаптивных эталонных моделей [56–61] получили широкое распространение в инженерной практике за счет достаточно простого математического описания, однако качество оценивания переменных состояния адаптивной моделью сильно зависит от точности задания параметров настраиваемой модели;

- метаэвристические алгоритмы [62–66], которые являются наилучшими инструментами для построения и обучения нелинейных регрессоров и позволяют получать оценки переменных состояния без непосредственной идентификации настраиваемых моделей, при этом для качественной работы таких алгоритмов необходима обширная полноценная обучающая выборка, а нередко возникающие эффекты переобучения могут частично нивелировать аппроксимирующие свойства наблюдателя;
- наблюдатели полного порядка, расширенные по вектору состояния, на основе явных математических моделей динамической системы «кабельная линия – погружная регулируемая электрическая машина», предложенные авторами в работах [68–75], позволяют получить наиболее полное описание физических процессов в объекте, что дает возможность обеспечить гарантированную управляемость системы, при этом основную сложность представляет задание настраиваемых коэффициентов моделей, что можно рассматривать как самостоятельную задачу идентификации настраиваемых математических моделей.

Получение оценок неизмеряемых координат электропривода является, по существу, задачей идентификации нестационарной динамической системы. Нестационарность системы «кабельная линия – погружная регулируемая электрическая машина» в прерывистых режимах эксплуатации обусловлена различными климатическими и технологическими факторами. Так, для асинхронного ПЭД 10 кВт при периоде от качки 10 мин. относительный нагрев двигателя составляет 20 %. С ростом мощности ПЭД и времени от качки относительный нагрев возрастает [76]. Это приводит к увеличению активного сопротивления кабельной линии и статорной обмотки на 5–20 % в зависимости от типа-размера ПЭД. Для низкодебитных скважин характерно засорение узлов УЭЦН механическими примесями, отложениями солей вследствие изменения термобарических условий при движении пластового флюида [76], что приводит к изменению параметров механической подсистемы ПЭД [23].

Текущая идентификация (получение вектора оценок параметров $\mathbf{V}$ в режиме реального времени) выполняется блоком динамического идентификатора (рис. 5). Разработка математического и программно-алгоритмического обеспечения для решения задачи идентификации нестационарной динамической системы электропривода УЭЦН по зашумленным электрическим измерениям $\mathbf{E}$ является самостоятельной задачей, для которой характерно отсутствие априорной информации о распределении шумов. При этом алгоритмы динамической

идентификации должны быть реализованы на цифровых сигнальных процессорах наземной станции управления, а значит, возникает проблема экономии вычислительных ресурсов микроконтроллера и доступного объема оперативной памяти. Следовательно, является естественной постановка задачи идентификации по малому числу наблюдений, решение которой может быть выполнено вычислительно устойчивыми адаптивными алгоритмами на основе математического аппарата линейной алгебры и аналитической геометрии [77] и с использованием более совершенных подходов к синтезу настраиваемых математических моделей нестационарных динамических систем [78]. Одной из подзадач может являться предварительный отбор наиболее перспективных критериев-индикаторов информативности данных, таких как нормированный разностный фактор диагонального преобладания [79].

Динамические модели АСУ ТП нижнего уровня

Снижение надежности УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации связано с избыточным накоплением усталостного износа ее компонентов вследствие особенностей процессов в динамике. Концепция представления всей подсистемы АСУ ТП нижнего уровня линейным или нелинейным статическим звеном (1) пригодна для описания электроприводов УЭЦН в непрерывном режиме эксплуатации [25]. Для реализации векторной системы управления электроприводом УЭЦН необходимы модели, более полно описывающие динамические процессы в системе «кабельная линия – погружная регулируемая электрическая машина» [68, 80].

Задача оптимизации режима работы УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации не может быть в полной мере решена, если весь электротехнический комплекс УЭЦН как АСУ нижнего уровня моделируется единственным статическим звеном. При постановке задачи оптимизации в смысле критериев энергетической эффективности [81], максимума наработки на отказ компонентов УЭЦН, должна учитываться динамика электромагнитных и электромеханических процессов, так как режимы прерывистой эксплуатации с точки зрения проектирования системы управления электропривода [82–84] являются переходными, что влияет на динамику гидравлической подсистемы [29].

Основными вариантами погружной регулируемой электрической машины авторы рассматривают погружной асинхронный двигатель и погружной синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ). В первом случае для построения настраиваемой модели электротехнической подсистемы УЭЦН в двухфазной ортогональной неподвижной системе координат необходимо 25 дифференциаль-

ных уравнений (5 уравнений ПЭД, 12 уравнений редуцированной математической модели длинного кабеля (в минимально необходимой компоновке из трех четырехполюсников для построения наблюдателя полного порядка, обеспечивающей аппроксимацию низко-, средне- и высокочастотной мод), 4 уравнения синус-фильтра, 4 уравнения повышающего трансформатора). Во втором случае для синтеза настраиваемой модели необходимо 24 дифференциальных уравнения (так как математическая модель СДПМ включает в себя 4 уравнения).

Эти настраиваемые математические модели предназначены для решения как прямых задач, так и некорректно поставленных обратных задач [85]. Однако из соображений снижения затрат вычислительных ресурсов цифрового сигнального процессора для описания основных мод динамики переходных процессов АСУ ТП нижнего уровня эта модель нуждается в редуцировании. Для выделения низко-, средне- и высокочастотной мод необходимо редуцировать математическую модель до не менее трех дифференциальных уравнений, а при наличии возможности пренебречь высокочастотной модой, математическую модель можно редуцировать до двух дифференциальных уравнений [68]. С точки зрения авторов, естественным подходом к построению динамической модели АСУ ТП нижнего уровня является представление каждой элементарной подсистемы в виде апериодического звена первого порядка. В этом случае динамическая модель АСУ ТП нижнего уровня как n взаимосвязанных подсистем может иметь следующий вид:

$$\begin{cases} T_1 \frac{d}{dt} x_1(t) + x_1(t) = k_1 u(t), \\ T_2 \frac{d}{dt} x_2(t) + x_2(t) = k_2 x_1(t), \\ \vdots \\ T_n \frac{d}{dt} x_n(t) + x_n(t) = k_n x_{n-1}(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $u(t)$ – входное управляющее воздействие; $x_i(t)$ – i -я переменная состояния динамической модели; T_i – i -я постоянная времени динамической модели; k_i – коэффициент усиления i -го апериодического звена; n – порядок динамической модели.

Задача редуцирования математических моделей электротехнической подсистемы УЭЦН может осуществляться методами редуцирования линейных динамических систем [86] после линеаризации модели или путем применения различных современных методов редуцирования нелинейных динамических систем [87]. В каждом случае должна сохраняться ясность физического смысла получаемых выражений для описания динамики процессов в электротехнической системе. Следовательно, можно выделить следующие ключевые направле-

ния совершенствования динамических моделей АСУ ТП нижнего уровня электроприводов УЭЦН:

- 1) разработка методики управления порядком динамических моделей (выбор оптимального или необходимого и достаточного порядка n модели (2));
- 2) обеспечение и повышение управляемости АСУ ТП нижнего уровня по количеству доступных переменных за счет снижения уровня неопределенности.

Это позволит в дальнейшем использовать известные классические методы для управления сложными нестационарными и неопределенными динамическими системами, которые могут быть разбиты на естественные участки стационарности, работа на которых ведется с моделью одного и того же порядка, но с разными настраиваемыми коэффициентами. Участки могут быть выбраны из соображений длительности периода аналого-цифрового преобразователя. Кроме того, необходимо учитывать неизбежное влияние шумов измерений, возникающих в виде некоторой «трехслойной трубки неопределенности»: погрешности первичного измерительного преобразователя, вторичного измерительного преобразователя и квантования по уровню. Составление такой модели с учетом этих ограничений и является научной задачей обеспечения гарантированной управляемости.

Выводы

1. В настоящее время в силу исторически сложившихся факторов вся система электропривода УЭЦН с позиции классических подходов построения АСУ ТП УЭЦН описывается статическими пропорциональными или нелинейными моделями. Это обусловлено тем, что в непрерывном режиме эксплуатации скважины электропривод находится в стационарном или квазистационарном режиме, следовательно, нет необходимости учитывать динамику электротехнической подсистемы.
2. Статистические исследования наработки на отказ компонентов УЭЦН, находящихся в прерывистых режимах эксплуатации, показывают, что надежность отдельных элементов, в частности гидрозащиты, снижается вследствие повышенных вибраций во время периодов откачки нефти, что обусловлено динамическими режимами электропривода.
3. При постановке задачи оптимизации работы УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации необходимо также ставить задачу оптимизации динамических режимов системы электропривода УЭЦН с точки зрения ограничения пусковых токов и электромагнитного момента ПЭД как по предельным значениям, так и по скорости

нарастания, что позволит повысить наработку на отказ компонентов УЭЦН за счет снижения уровня вибрации и крутильных колебаний.

4. Для учета специфики прерывистых режимов эксплуатации УЭЦН при постановке задач оптимизации работы системы электропривода погружных установок необходим переход от статических моделей к редуцированным динамическим моделям АСУ ТП нижнего уровня на ос-

нове явных настраиваемых математических моделей нестационарной динамической системы «длинный кабель – погружная регулируемая электрическая машина». Разработка и идентификация настраиваемых моделей должна выполняться из соображений повышения управляемости и учета физических ограничений доступных средств измерений.

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. Камалетдинов Р.С. Механизированная добыча нефти: новые вызовы – новые решения // Деловой журн. Neftegaz.RU. – 2023. – № 4 (136). – С. 42–47.
3. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (дата обращения 15.09.2024).
4. World Energy Outlook 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (дата обращения 15.09.2024).
5. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г., № 1523-р. – М., 2020. – 93 с.
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. Нугаев И.Ф., Васильев В.И. Управление процессами скважинной добычи нефти на основе каскадных алгоритмов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16. – № 5. – С. 321–326.
8. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2022. – 11 с.
9. Цифровой двойник погружного электродвигателя на основе методов планирования эксперимента / В.З. Ковалев, Э.И. Хусаинов, Е.С. Балыков и др. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 32–44.
10. Зюзев А.М., Текле С.И. Динамические симуляторы в задачах диагностики штанговых глубинно-насосных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 168–177.
11. Калькулятор ЭЦН // Новомет. URL: <https://www.novomet.ru/rus/products-and-services/artificial-lift/software/esp-calculator> (дата обращения 15.09.2024).
12. Нугаев И.Ф., Тагирова К.Ф. Математическое моделирование процессов нефтедобычи в скважинах на базе УЭЦН // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2018. – № 12. – С. 44–49.
13. 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.
14. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
15. Удуг Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
16. Stulrajter M., Hrabovcova V., Franko M. Permanent magnet synchronous motor control theory // Journal of electrical engineering. – Vol. 58. – № 2. – P. 79–84.
17. Busca C. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic. – Denmark: Aalborg University, 2010. – 119 p.
18. Феофилактов С. Высокоточные системы погружной телеметрии для проведения гидродинамических исследований // Нефтегазовая вертикаль. – 2011. – № 11. – С. 62–63.
19. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Электротехнологические установки для нефтедобычи. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 160 с.
20. Станции управления Электрон-05. Руководство по эксплуатации. ЦТКД 388 РЭ. Версия 18.24 для асинхронного и вентильного двигателя. – Радужный: ЗАО «Электрон», 2017. – 169 с.
21. Ведерников В.А., Лысова О.А., Лопатин Р.Р. Исследование и анализ процесса «Расклинивания» погружных насосов установок добычи нефти // Вестник кибернетики. – 2010. – № 9. – С. 28–36.
22. Ведерников В.А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 2006. – 276 с.
23. Лопатин Р.Р. Модели и алгоритмы частотно-регулируемого процесса расклинивания электроцентробежного насоса при добыче нефти в осложненных условиях: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2011. – 140 с.
24. 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.
25. Сипайлов В.А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 196 с.

26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Цибульский В.Р. Идентификация гидродинамической модели скважины с электроцентробежным насосом по данным контроля возмущённых режимов эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 181–192. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2649.
30. Антипин М.Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО «Самотлорнефтегаз» // ПТНЖ «Инженерная практика». – 2011. – № 5. – С. 74–80.
31. Abdullin A., Abdulin I., Sokolyanskaya Y. Short-time periodical well operation in LLC LUKOIL-West Siberia fields. Implementation experience and prospects for development // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2018. – P. 1–10.
32. 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.
33. Информационно правовой материал «О мерах по повышению нефтеотдачи пластов на период до 2035 года» в Комитет Совета Федерации России по экономической политике. URL: <http://council.gov.ru/media/files/VGdL7GEAXLLocKmDf9tiKPD8fS0xuyQA.pdf> (дата обращения 19.10.2024).
34. Камалетдинов Р.С. Эксплуатация малодебитных скважин в текущих реалиях: вызовы и возможности // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2022. – № 12. – С. 96–103.
35. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 220–231.
36. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 203–215.
37. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
38. Grouz F., Sbata L. Speed sensorless IFOC of PMSM based on adaptive Luenberger observer // International Journal of Computer and Information Engineering. – 2010. – Vol. 4. – № 8. – P. 1256–1262.
39. 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.
40. 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.
41. 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. – P. 1770–1778.
42. Володин Е.В., Осипов О.И. Наблюдатели в системах векторного управления синхронным частотно-регулируемым приводом герметичного насоса // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 3. – С. 17–22.
43. Induction motor torque closed-loop vector control system based on flux observation and harmonic current suppression / C. Sheng, Q. Wang, T. Su, H. Wang // Control Engineering Practice. – 2024. – Vol. 142. – P. 1–12.
44. Huang M.C., Moses A.J., Anayi F. The comparison of sensorless estimation techniques for PMSM between extended Kalman filter and flux-linkage observer // Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. – Dallas, TX, USA, 2006. – P. 654–659.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Induction motor tachless fault detection in transient speeds using adaptive generalized Vold Kalman filter / M.F. Yakhni, S. Gaudet, A. Sakout, H. Assoum, E. Etien, L. Rambaut, M. Ali, M. El-Gohari // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 24. – P. 1–13.
50. 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.

51. 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.
52. A sliding mode speed and position observer for a surface-mounted PMSM / Y. Chen, M. Li, Y. Gao, Z. Chen // *ISA Transactions*. – 2019. – Vol. 87. – P. 17–27.
53. Ye S. Design and performance analysis of an iterative flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives // *ISA Transactions*. – 2019. – Vol. 94. – P. 255–264.
54. Ye S. Fuzzy sliding mode observer with dual SOGI-FLL in sensorless control of PMSM drives // *ISA Transactions*. – 2019. – Vol. 94. – P. 161–176.
55. 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.
56. 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.
57. Sensorless speed control of high-speed permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system / L. Tian, Y. He, M. Lu et al. // *Chinese Control Conference*. – Guangzhou, China, 2019. – P. 3126–3131.
58. A ripple suppression of sensorless FOC of PMSM electrical drive system based on MRAS / X. Chi, C. Wang, Q. Wu et al. // *Results in Engineering*. – 2023. – Vol. 20. – P. 1–9.
59. Korzonek M., Tarchala G., Orlowska-Kowalska T. A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives // *ISA Transactions*. – 2019. – Vol. 93. – P. 1–13.
60. Zorgani Y.A., Koubaa Y., Boussak M. MRAS state estimator for speed sensorless ISFOC induction motor drives with Luenberger load torque estimation // *ISA Transactions*. – 2016. – Vol. 61. – P. 308–317.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. Zhuo S., Li Y., Tong S. Finite-time adaptive neural network event-triggered output feedback control for PMSMs // *Neurocomputing*. – 2023. – Vol. 533. – P. 10–21.
65. Observer-based finite-time adaptive neural network control for PMSM with state constraints / S. Zhou, S. Sui, Y. Li, S. Tong // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Vol. 35. – P. 6635–6645.
66. Gao Y., Wang X., Chen Q. Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2020. – Vol. 18. – P. 1605–1616.
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. Раков И.В., Глазырин А.С., Кладиев С.Н. Разработка и настройка наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 219–231. DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4440.
71. 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.
72. Устройство получения сигнала оценки частоты вращения ротора и сигнала оценки момента сопротивления на валу синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: пат. 2825800 РФ, СПК H02P 21/18. № 2024102836; заявл. 06.02.2024, опубл. 29.08.2024.
73. Способ получения сигнала оценки частоты вращения ротора и сигнала оценки момента сопротивления на валу синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: пат. 2832962 РФ, № 2024104493; заявл. 22.02.2024, опубл. 13.01.2025.
74. Устройство для определения оценки частоты вращения ротора и оценки момента сопротивления на валу асинхронного двигателя: пат. 2818309 РФ, № 2023129380; заявл. 13.11.2023, опубл. 02.05.2024.
75. Способ получения сигнала оценки частоты вращения ротора и сигнала оценки момента сопротивления на валу асинхронного двигателя: пат. 2822608 РФ, № 2023129614; заявл. 15.11.2023, опубл. 09.07.2024.
76. Уразакон 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.
77. Фурсов В.А. Идентификация систем по малому числу наблюдений. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 81 с.
78. 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.

79. О рациональной размерности базиса регрессионной модели для задачи адаптивного краткосрочного прогнозирования состояния дискретной нестационарной динамической системы / А.С. Глазырин, Е.В. Боловин, О.В. Архипова, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, В.В. Тимошкин, В.А. Копырин, Е.А. Беляускене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 257–272. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4482.
80. 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.
81. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в системах частотного управления. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 256 с.
82. Bose B.K. Modern power electronics and AC drives. – Knoxville: Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.
83. Leonhard W. Control of electrical drives. – New York: Springer, 2001. – 474 p.
84. Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. – Blacksburg: CRC Press, 2009. – 588 p.
85. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 285 с.
86. Митришкин Ю.В. Линейные математические модели динамических систем с управлением. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 464 с.
87. Романова И.К. Современные методы редукции нелинейных систем и их применение для формирования моделей движущихся объектов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 11. – С. 122–133.

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. asglazyrin@tpu.ru

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

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой кибернетических систем, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального 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 индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; профессор кафедры электрической техники Энергетического института, Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. 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; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. 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>

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, 634513, 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; инженер-программист ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, 634021, г. Томск, ул. Алтайская, 161А. 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; eam@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1638-4366>

Поступила в редакцию: 24.03.2025

Поступила после рецензирования: 01.07.2025

Принята к публикации: 14.07.2025

REFERENCES

1. *Main technical and economic indicators of oil production by operating methods and well categories*. Federal State Statistics Service. (In Russ.) Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/pok107_Calendar1_2022.xls. (accessed 1 December 2024).
2. Kamaletdinov R.S. Mechanized oil production: new challenges – new solutions. *Business magazine Neftegaz.RU*, 2023, no. 4 (136), pp. 42–47. (In Russ.)

3. *Forecast of the long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2030*. (In Russ.) Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (accessed 15 September 2024).
4. *World Energy Outlook 2023*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (accessed 15 September 2024).
5. *Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035*. Approved by the order of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020, no. 1523-p. Moscow, 2020. 93 p. (In Russ.)
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. Nugaev I.F., Vasilyev V.I. Use of multi-cascade principle for the downhole oil production control. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 5, pp. 321–326. (In Russ.)
8. SS RF 57700.37–2021. *Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions*. Moscow, Standartinform Publ., 2022. 11 p. (In Russ.)
9. Kovalev V.Z., Khusainov E.I., Balykov E.S. Digital twin of a submersible electric motor based on experiment planning methods. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2022, vol. 18, no. 2, pp. 23–44. (In Russ.)
10. Zuizev A.M., Teclé S.I. Sucker rod pumping system: challenges to develop diagnostic system and role of dynamic simulator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 168–177. (In Russ.)
11. ESP calculator. Novomet. (In Russ.) Available at: <https://www.novomet.ru/rus/products-and-services/artificial-lift/software/esp-calculator> (accessed 15 September 2024).
12. Nugaev I.F., Tagirova K.F. Mathematical modeling of oil production processes in wells based on ESP. *Automation, telemechanization and communication in oil industry*, 2018, no. 12, pp. 44–49. (In Russ.)
13. 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.)
14. Usoltsev A.A. *Frequency control of asynchronous motors*. St Petersburg, SPbGU ITMO Publ., 2006. 94 p. (In Russ.)
15. Udat L.S., Maltseva O.P., Koyain N.V. *Design and research of automated electric drives: textbook. P. 8. Induction frequency controlled electric drive*. Tomsk, TPU Publ., 2011. 648 p. (In Russ.)
16. Stulrajter M., Hrabovcova V., Franko M. Permanent magnet synchronous motor control theory. *Journal of electrical engineering*, vol. 58, no. 2, pp. 79–84.
17. Busca C. *Open loop low speed control for PMSM in high dynamic*. Denmark, Aalborg University, 2010. 119 p.
18. Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Anikin V.V. *Electrical engineering installations for oil production*. Omsk, OmGTU Publ., 2015. 160 p. (In Russ.)
19. Feofilaktov S. High-precision submersible telemetry systems for hydrodynamic research. *Neftegazovaya vertical*, 2011, no. 11, pp. 62–63. (In Russ.)
20. *Control stations Elekton-05. Operation manual. CTCD 388 RE. Version 18.24 for asynchronous and valve motor*. Raduzhny, JSC «Eleckton» Publ., 2017. 169 p. (In Russ.)
21. Vedernikov V.A., Lysova O.A., Lopatin R.R. Investigation and analysis of «disjoining» process regarding submersible pumps in oil production units. *Vestnik kibernetiki*, 2010, no. 9, pp. 28–36. (In Russ.)
22. Vedernikov V.A. *Models and methods for controlling operating modes and power consumption of submersible centrifugal units*. Dr. Diss. Tyumen, 2006. 276 p.
23. Lopatin R.R. *Models and algorithms of frequency-controlled process of wedging of electric centrifugal pump during oil production in complicated conditions*. Cand. Diss. Tomsk, 2011. 140 p.
24. 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.)
25. Sipaylov V.A. *Optimization of operating modes of electric centrifugal pumps for mechanized oil production*. Cand. Diss. Tomsk, 2009. 196 p.
26. 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. Proceedings 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.)
27. 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.)
28. 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.
29. Solovyev I.G., Govorkov D.A., Tsibulsky V.R. Identification of a well hydrodynamic model with an electric submersible pump using the perturbed operation modes control data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 181–192. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2649.
30. Antipin M.N. Results of the introduction of cyclic operation of ESPs in OJSC Samotlorneftegaz. *Engineering Practice*, 2011, no. 5, pp. 74–80. (In Russ.)
31. Abdullin A., Abdulin I., Sokolyanskaya Y. Short-time periodical well operation in LLC LUKOIL-West Siberia fields. Implementation experience and prospects for development. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2018, pp. 1–10. (In Russ.)
32. 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.
33. *Information and legal material «On measures to increase oil recovery for the period up to 2035» to the Committee of the Federation Council of Russia on Economic Policy*. (In Russ.) Available at: <http://council.gov.ru/media/files/VGdL7GEAXLLocKmDf9tiKPD8fS0xuyQA.pdf> (accessed 19 October 2024).

34. 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.)
35. Kladiev S.N. Review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 220–231. (In Russ.)
36. Kladiev S.N. Review and critical analysis of the current state and ways to improve regulated power supplies and automatic control systems for electric centrifugal pumping units in intermittent operation of oil wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 203–215. (In Russ.)
37. Vinogradov A.B. *Induction motors vector control*. Ivanovo, V.I. Lenin Ivanovo State Energy University Publ., 2008. 298 p. (In Russ.)
38. Grouz F., Sbata L. Speed sensorless IFOC of PMSM based on adaptive Luenberger observer. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2010, vol. 4, no. 8, pp. 1256–1262.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Volodin E.V., Osipov O.I. Observers in systems of vector control of a synchronous variable frequency drive sealed pump. *Elektrotehnicheskie Sistemy i Komplekсы*, 2017, no. 3, pp. 17–22. (In Russ.)
43. Sheng C., Wang Q., Su T., Wang H. Induction motor torque closed-loop vector control system based on flux observation and harmonic current suppression. *Control Engineering Practice*, 2024, vol. 142, pp. 1–12.
44. Huang M.C., Moses A.J., Anayi F. The comparison of sensorless estimation techniques for PMSM between extended Kalman filter and flux-linkage observer. *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Dallas, TX, USA, 2006. pp. 654–659.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Yakhni M.F., Gauet S., Sakout A., Assoum H., Etien E., Rambaut L., Ali M., El-Gohari M. Induction motor tacholeess fault detection in transient speeds using adaptive generalized Vold Kalman filter. *Results in Engineering*, 2024, vol. 24, pp. 1–13.
50. 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.
51. 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.
52. Chen Y., Li M., Gao Y., Chen Z. A sliding mode speed and position observer for a surface-mounted PMSM. *ISA Transactions*, 2019, vol. 87, pp. 17–27.
53. Ye S. Design and performance analysis of an iterative flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 94, pp. 255–264.
54. Ye S. Fuzzy sliding mode observer with dual SOGI-FLL in sensorless control of PMSM drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 94, pp. 161–176.
55. 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.
56. Zhang S., Shen A., Luo X. 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.
57. Tian L., He Y., Lu M. Sensorless speed control of high-speed permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system. *Chinese Control Conference*. Guangzhou, China, 2019. pp. 3126–3131.
58. Chi X., Wang C., Wu Q. A ripple suppression of sensorless FOC of PMSM electrical drive system based on MRAS. *Results in Engineering*, 2023, vol. 20, pp. 1–9.
59. Korzonek M., Tarchala G., Orlowska-Kowalska T. A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 93, pp. 1–13.
60. Zorgani Y.A., Koubaa Y., Boussak M. MRAS state estimator for speed sensorless ISFOC induction motor drives with Luenberger load torque estimation. *ISA Transactions*, 2016, vol. 61, pp. 308–317.
61. 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.
62. 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.
63. 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.

64. Zhuo S., Li Y., Tong S. Finite-time adaptive neural network event-triggered output feedback control for PMSMs. *Neurocomputing*, 2023, vol. 533, pp. 10–21.
65. Zhuo S., Sui S., Li Y., Tong S. Observer-based finite-time adaptive neural network control for PMSM with state constraints. *Neural Computing and Applications*, 2022, vol. 35, pp. 6635–6645.
66. Gao Y., Wang X., Chen Q. Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, vol. 18, pp. 1605–1616.
67. 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.
68. Rakov I.V. *Methodology for assessing the parameters and state variables of the electrical complex «cable line – asynchronous motor» based on the balance of instantaneous power consumption*. Cand. Diss. Tomsk, 2024. 143 p. (In Russ.)
69. 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.
70. Rakov I.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N. Development and configuration of a full-order observer for «cable line – induction motor» electrical complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 219–231. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4440.
71. 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.
72. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Kovalev V.Z., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Arkhipova O.V., Popov S.S., Popov E.I., Nabunskiy I.A., Kuznetsov M.S., Rakov I.V. *Device for receiving a signal of rotor speed and a signal of resistance torque to the value of a permanent magnet synchronous motor*. Patent RF, no. 2024102836, 2024. (In Russ.)
73. Glazyrin A.S., Kopyrin V.A., Popov E.I., Popov S.S., Bolovin E.V., Kladiev S.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Kovalev V.Z., Arkhipova O.V., Nabunskiy I.A., Rakov I.V., Kulesh Yu.O. *Method for obtaining a signal for estimating the rotor speed and a signal for estimating the resistance torque on the shaft of a permanent magnet synchronous motor*. Patent RF, no. 2024104493, 2025. (In Russ.)
74. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Kovalev V.Z., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Arkhipova O.V., Popov S.S., Popov E.I., Nabunskiy I.A., Rakov I.V. *Device for determining the rotor speed and estimating the resistance torque on the shaft of an induction motor*. Patent RF, no. 2023129380, 2024. (In Russ.)
75. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Kovalev V.Z., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Arkhipova O.V., Popov S.S., Popov E.I., Nabunskiy I.A., Rakov I.V. *Method for obtaining a signal for estimating the rotor speed and a signal for estimating the resistance torque on the shaft of an induction motor*. Patent RF, no. 2023129614, 2024. (In Russ.)
76. Urazakov K.R., Rukiv M.V., Borisov A.O. Simulation of thermal processes in a submersible motor 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.
77. Fursov V.A. *Identification of systems with a small number of observations*. Samara, SSAU Publ., 2007. 81 p. (In Russ.)
78. Popov E.I., Glazyrin A.S., Kopyrin V.A. 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.)
79. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kladiev S.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Kopyrin V.A., Beliauskene E.A. Rational dimension of a basis of a regression model for adaptive short-term forecasting the state of a discrete nonstationary dynamic system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 257–272. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4482.
80. Glazyrin A.S., Isaev Y.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Hamitov 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.)
81. Polyakov V.N., Shrejner R.T. *Energy-efficient modes of AC motors in frequency control systems*. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2017. 256 p. (In Russ.)
82. Bose B.K. *Modern power electronics and AC drives*. Knoxville, Prentice Hall PTR, 2002. 738 p.
83. Leonhard W. *Control of electrical drives*. New York, Springer, 2001. 474 p.
84. Krishnan R. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. Blacksburg, CRC Press, 2009. 588 p.
85. Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. *Methods for solving ill-posed problems*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 285 p. (In Russ.)
86. Mitrishkin Y.V. *Linear mathematical models of dynamic systems with control*. Moscow, LENAND Publ., 2019. 464 p. (In Russ.)
87. Romanova I.K. Modern methods of reduction of nonlinear systems and their application for forming models of moving objects. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Mashinostroenie»*, 2012, no 11, pp. 122–133. (In Russ.)

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, Assistant, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, 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, Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644050, 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; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, 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>

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; Software Engineer, LLC «INT» of JSC «EleSy», 161A, Altaiskaya street, Tomsk, 634021, 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; eam@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1638-4366>

Received: 24.03.2025

Revised: 01.07.2025

Accepted: 14.07.2025