УДК 681.51:51.751-74
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826
Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя

А.С. Глазырин[1,2], С.С. Попов[1,3], Е.И. Попов[4], В.А. Копырин[4], Р.Н. Хамитов[4,5], А.А. Филипас[1], В.В. Тимошкин[1], Е.А. Беляускене[1], Ю.О. Кулеш[1]✉, Е.В. Боловин[1,6], В.З. Ковалев[2,1], М.В. Денеко[7]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск
[2] Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск
[3] ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск
[4] Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень
[5] Омский государственный технический университет, Россия, г. Омск
[6] ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, г. Томск
[7] Московский технический университет связи и информатики, Россия, г. Москва

✉yok13@tpu.ru

Аннотация. ***Актуальность.*** При эксплуатации погружного оборудования для добычи нефти в агрессивных средах и переводе скважин в режим циклической эксплуатации наблюдается уменьшение срока службы погружной установки для добычи нефти. В первом случае это связано с образованием солеотложений и засорением рабочих органов электронасоса механическими примесями. Во втором случае – с увеличением количества пусков погружного электродвигателя. Решение сложившихся трудностей возможно путем внедрения замкнутых систем управления погружными электродвигателями на основе наблюдателей переменных состояния, что обуславливает актуальность исследования. ***Цель:*** разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя при несогласованности начальных условий в различных режимах работы и его апробирование с помощью средств моделирования. ***Методы.*** Наблюдатель построен на основании известных моделей электродвигателей в неподвижной системе координат α, β, теории БИХ-фильтров для получения прогноза оценок угловой скорости ротора и момента на валу и их корректировки в режиме реального времени. ***Результаты.*** Предложена оригинальная структура наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя. ***Выводы.*** Продемонстрирована работоспособность наблюдателя при несогласованности начальных условий и данных модели электродвигателя в различных режимах работы. Во всех режимах получены устойчивые оценки скорости и момента сопротивления на валу электродвигателя. При этом погрешность оценивания угловой скорости при условии изменения нагрузки на валу и пуске в нагруженном состоянии составляет не более 1,2 %, что допустимо в системах управления погружными электродвигателями. Выявлено, что разработанный наблюдатель при условии изменения активных сопротивлений статора и ротора в диапазонах от –25 до +25 % от номинального значения получает оценки угловой скорости с интегральной погрешностью не более 5 %, кроме пуска двигателя при уменьшении значения активного сопротивления ротора на 25 % от номинального значения – 5,53 %, что допустимо в инженерной практике.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, центробежный электронасос, наблюдатель угловой скорости, наблюдатель момента на валу двигателя, режим реального времени

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 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. Денеко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 203–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826

UDC 681.51:51.751-74
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826

Desing of an observer with real time monitoring speed and load torque for submersible induction motors

A.S. Glazyrin[1,2], S.S. Popov[1,3], E.I. Popov[4], V.A. Kopyrin[4], R.N. Khamitov[5], A.A. Filipas[1], V.V. Timoshkin[1], E.A. Beliauskene[1], Yu.O. Kulesh[1]✉, E.V. Bolovin[1,6], V.Z. Kovalev[2,1], M.V. Deneko[7]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
[2] Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation
[3] «NPF Mechatronica-Pro» LTD, Tomsk, Russian Federation
[4] Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation
[5] Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation
[6] LLC «INT» of JSC «EleSy», Tomsk, Russian Federation
[7] Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

✉yok13@tpu.ru

Abstract. ***Relevance.*** When operating submersible equipment for oil production in aggressive environments and transferring wells to the cyclic operation mode, a decrease in the service life of the submersible installation for oil production is observed. In the first case, this is due to the formation of salt deposits and clogging of the working parts of the electric pump with mechanical impurities. In the second case – an increase in the number of starts of the submersible electric motor. To solve the existing problems, it is possible to implement closed control systems for submersible electric motors based on state variable observers, which determines the relevance of the study. ***Aim.*** To develop an observer with operational monitoring of the angular velocity of the rotor and the moment of resistance on the shaft of a submersible asynchronous motor at inconsistency of the initial conditions in various operating modes and its testing using modeling tools. ***Methods.*** The observer is built on the basis of known engine models in a fixed coordinate system α, β, the theory of IIR-filters to obtain a forecast of estimates of the angular velocity of the rotor and the torque on the shaft and their correction in real time. ***Results.*** The authors have proposed the original structure of an observer with operational monitoring of the angular velocity of the rotor and the moment of resistance on the shaft of a submersible asynchronous motor. ***Conclusions.*** The paper demonstrates the observer performance with inconsistency of initial conditions and electric motor model data in various operating modes. In all modes, stable estimates of the speed and torque of resistance on the electric motor shaft are obtained. At the same time, the error in estimating the angular velocity under the condition of changing the load on the shaft and starting in the loaded state is no more than 1.2%, which is acceptable in submersible electric motor control systems. It is revealed that the developed observer, under the condition of changing the active resistance of the stator and rotor in the ranges from –25 to +25% of the nominal value, obtains estimates of the angular velocity with an integral error of no more than 5%, except for starting the motor with a decrease in the active resistance of the rotor by 25% of the nominal value –5.53%, which is acceptable in engineering practice.

Keywords: submersible induction motor, electric centrifugal pump installation, speed observer, motor torque observer, real-time 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 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. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826

Введение

На сегодняшний день нефть продолжает оставаться ключевым ресурсом российской и мировой экономик, и, согласно экспертам, нет оснований предполагать, что произойдет сокращение ее добычи в ближайшем будущем [1–4].

Основная масса добытой нефти получена с использованием механизированных методов, в частности центробежными электронасосами (ЭЦН), которые, как правило, приводятся в движение погружными асинхронными двигателями (ПЭД). В процессе работы ЭЦН могут возникать пробле-

мы, такие как заклинивание ротора, вызванное образованием солеотложений и засорением рабочих органов электронасоса механическими примесями [5, 6], что напрямую влияет на момент сопротивления на валу погружного электродвигателя и негативно сказывается на его ресурсе и сроке службы. Попытки устранить заклинивания могут привести к срезу шпонок, обеспечивающих передачу крутящего момента от вала ротора насосу, или к деформации вала [7].

В процессе эксплуатации скважин на поздних стадиях разработки нефтяного месторождения происходят увеличение обводненности, уменьшение подпора пласта или деструкция притока, влияющая на коэффициент продуктивности. Для данных скважин целесообразен переход в режим циклической эксплуатации. Тем не менее перевод скважины в режим циклической эксплуатации приводит к уменьшению срока службы погружной установки для добычи нефти [8–10].

Для повышения срока службы погружной установки для добычи нефти предлагается использовать наблюдатели переменных состояния погружного электродвигателя, которые позволяют производить оценку физически неизмеримых переменных состояния электродвигателя, к которым в данном случае можно отнести скорость вращения ротора и момент сопротивления на валу [11–16]. Авторы видят применение наблюдателей в контексте добычи нефти в следующем:

- информационное назначение;
- разработка замкнутой системы управления погружным электродвигателем.

В первом варианте информация о переменных состояния (токи и напряжения статора, угловая скорость ротора, момент сопротивления на валу) передается на экран оператора, где происходит сравнение с заданными эксплуатацией параметрами скважины и при необходимости выполняются определенные регламентом мероприятия.

Во втором варианте разработка замкнутой системы управления обеспечивает реализацию алгоритмов управления ЭЦН, позволяющих не доводить до состояния заклинивания насоса и изменять режим непрерывной эксплуатации скважины на режим сопутствующей очистки. В режиме непрерывной эксплуатации в осложненных условиях необходимо следить за моментом нагрузки и не доводить до критического состояния, при котором импульсный режим позволяет провести очистку насоса с контролем вывода на номинальный режим.

Реализацию динамических режимов управления погружным электродвигателем в составе установки ЭЦН при эксплуатации скважины в циклическом режиме авторы считают наиболее перспективной. Данные режимы характеризуются резко-переменными и изменяющимися во времени параметрами электрической и механической составляющих установки для добычи нефти. Соответственно актуальной задачей является разработка работоспособной структуры наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя, который будет устойчив при изменении параметров двигателя в ходе работы или при получении неточных оценок от идентификаторов [17–19], а также при условии изменяющейся нагрузки и работе при нагрузках выше номинальной.

Принцип построения наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя

Построение наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя базируется на математической модели асинхронного двигателя в прямоугольной стационарной системе координат α, β [20, 21]. Логика построения наблюдателя состоит из следующих этапов:

1. Определение величины прогноза оценки токов статора $\hat{\hat{I}}_{1\alpha}(k)$, $\hat{\hat{I}}_{1\beta}(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражениям (1), (2):

$$\hat{\hat{I}}_{1\alpha}(k)=\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{L_{\text{Э}}}\times$$

$$\times\left\{\begin{bmatrix} U_{1\alpha}(k)+k_{1\alpha}\left\{I_{1\alpha}(k)-\hat{I}_{1\alpha}(k)\right\}+ \\ +\dfrac{R_2^{'}L_m}{L_2^2}\hat{\psi}_{2\alpha}(k)+ \\ +\dfrac{L_m}{L_2}z_p\hat{\psi}_{2\beta}(k)\hat{\omega}(k)-R_{\text{Э}}\hat{I}_{1\alpha}(k) \end{bmatrix}+\right.$$

$$\left.+\begin{bmatrix} U_{1\alpha}(k-1)+k_{1\beta}\left\{I_{1\alpha}(k-1)-\hat{I}_{1\alpha}(k-1)\right\}+ \\ +\dfrac{R_2^{'}L_m}{L_2^2}\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1)+ \\ +\dfrac{L_m}{L_2}z_p\hat{\psi}_{2\beta}(k-1)\hat{\omega}(k-1)-R_{\text{Э}}\hat{I}_{1\alpha}(k-1) \end{bmatrix}\right\};\quad (1)$$

$$\hat{\hat{I}}_{1\beta}(k)=\frac{\Delta t}{2}\frac{1}{L_Э}\left\{\begin{bmatrix}U_{1\beta}(k)+k_{1\beta}\left\{I_{1\beta}(k)-\hat{I}_{1\beta}(k)\right\}+\\+\frac{R_2^{'}L_m}{L_2^2}\hat{\psi}_{2\beta}(k)-\\-\frac{L_m}{L_2}z_p\hat{\psi}_{2\alpha}(k)\hat{\omega}(k)-R_Э\hat{I}_{1\beta}(k)\end{bmatrix}+\right.$$
$$\left.+\begin{bmatrix}U_{1\beta}(k-1)+k_{1\beta}\begin{Bmatrix}I_{1\beta}(k-1)-\\\hat{I}_{1\beta}(k-1)\end{Bmatrix}+\\+\frac{R_2^{'}L_m}{L_2^2}\hat{\psi}_{2\beta}(k-1)-\\-\frac{L_m}{L_2}z_p\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1)\hat{\omega}(k-1)-\\R_Э\hat{I}_{1\beta}(k-1)\end{bmatrix}\right\},\quad(2)$$

где Δt – период дискретизации (принимается равным 100 мкс); k – номер текущего шага дискретизации; k–1 – номер предыдущего шага дискретизации; $U_{1\alpha}(k)$ и $U_{1\beta}(k)$ – входное напряжение на текущем шаге дискретизации, В; $\hat{I}_{1\alpha}(k)$, $\hat{I}_{1\beta}(k)$ – оценки токов на текущем шаге дискретизации, А; $\hat{I}_{1\alpha}(k-1)$, $\hat{I}_{1\beta}(k-1)$ – оценки токов на предыдущем шаге дискретизации, А; $\hat{\psi}_{2\alpha}(k)$, $\hat{\psi}_{2\beta}(k)$ – оценки потокосцепления ротора на текущем шаге дискретизации, Вб; $\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1)$, $\hat{\psi}_{2\beta}(k-1)$ – оценки потокосцепления ротора на предыдущем шаге дискретизации, Вб; R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; $R_2^{'}$ – приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора, Ом; $R_Э=R_1+R_2^{'}\left(\frac{L_m}{L_2}\right)^2$ – эквивалентное активное сопротивление асинхронного двигателя, Ом; L_1 – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн; L_2 – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн; $L_Э=L_1-\frac{L_m^{\,2}}{L_2}$ – эквивалентная индуктивность асинхронного двигателя, Гн; L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины, Гн; z_p – число пар полюсов асинхронного двигателя; $\hat{\omega}(k)$ – оценка угловой скорости ротора на текущем шаге дискретизации, рад/с; $\hat{\omega}(k-1)$ – оценка угловой скорости ротора на предыдущем шаге дискретизации, рад/с; $k_{1\alpha}$, $k_{1\beta}$ – коэффициенты передачи отработки невязки токов статора в прямоугольной стационарной системе координат α, β, Ом. При первоначальной настройке наблюдателя данные коэффициенты рекомендуется принимать равными значению эквивалентного активного сопротивление асинхронного двигателя [22].

2. Корректировка полученных величин прогноза оценки токов статора $\hat{\hat{I}}_{1\alpha}(k)$, $\hat{\hat{I}}_{1\beta}(k)$ по выражениям (3), (4):

$$\hat{I}_{1\alpha}(k)=\hat{\hat{I}}_{1\alpha}(k)+\hat{I}_{1\alpha}(k-1),\quad(3)$$

$$\hat{I}_{1\beta}(k)=\hat{\hat{I}}_{1\beta}(k)+\hat{I}_{1\beta}(k-1).\quad(4)$$

3. Определение величины прогноза оценок потокосцепления ротора $\hat{\hat{\psi}}_{2\alpha}(k)$, $\hat{\hat{\psi}}_{2\beta}(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражениям (5), (6):

$$\hat{\hat{\psi}}_{2\alpha}(k)=\frac{\Delta t}{2}\left\{\begin{bmatrix}\frac{R_2^{'}L_m}{L_2}\hat{I}_{1\alpha}(k)-\frac{R_2^{'}}{L_2}\hat{\psi}_{2\alpha}(k)-\\-z_p\hat{\psi}_{2\beta}(k)\hat{\omega}(k)\end{bmatrix}+\right.$$
$$\left.+\begin{bmatrix}\frac{R_2^{'}L_m}{L_2}\hat{I}_{1\alpha}(k-1)-\frac{R_2^{'}}{L_2}\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1)-\\-z_p\hat{\psi}_{2\beta}(k-1)\hat{\omega}(k-1)\end{bmatrix}\right\},\quad(5)$$

$$\hat{\hat{\psi}}_{2\beta}(k)=\frac{\Delta t}{2}\left\{\begin{bmatrix}\frac{R_2^{'}L_m}{L_2}\hat{I}_{1\beta}(k)-\frac{R_2^{'}}{L_2}\hat{\psi}_{2\beta}(k)+\\+z_p\hat{\psi}_{2\alpha}(k)\hat{\omega}(k)\end{bmatrix}+\right.$$
$$\left.+\begin{bmatrix}\frac{R_2^{'}L_m}{L_2}\hat{I}_{1\beta}(k-1)-\frac{R_2^{'}}{L_2}\hat{\psi}_{2\beta}(k-1)+\\+z_p\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1)\hat{\omega}(k-1)\end{bmatrix}\right\}.\quad(6)$$

4. Корректировка полученных значений прогноза оценок потокосцепления ротора $\hat{\hat{\psi}}_{2\alpha}(k)$, $\hat{\hat{\psi}}_{2\beta}(k)$ по выражениям (7), (8):

$$\hat{\psi}_{2\alpha}(k)=\hat{\hat{\psi}}_{2\alpha}(k)+\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1),\quad(7)$$

$$\hat{\psi}_{2\beta}(k)=\hat{\hat{\psi}}_{2\beta}(k)+\hat{\psi}_{2\beta}(k-1),\quad(8)$$

5. Определение величины прогноза оценки момента сопротивления на валу $\hat{\hat{M}}_C(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражению (9):

$$\hat{\hat{M}}_C(k)=$$
$$=\frac{1}{T_3}z_p\frac{3}{2}\frac{L_m}{L_2}\frac{\Delta t}{2}\left[\begin{pmatrix}\hat{\psi}_{2\alpha}(k)\left\{I_{1\beta}(k)-\hat{I}_{1\beta}(k)\right\}-\\-\hat{\psi}_{2\beta}(k)\left\{I_{1\alpha}(k)-\hat{I}_{1\alpha}(k)\right\}\end{pmatrix}+\right.$$
$$\left.+\begin{pmatrix}\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1)\left\{I_{1\beta}(k-1)-\hat{I}_{1\beta}(k-1)\right\}-\\-\hat{\psi}_{2\beta}(k-1)\left\{I_{1\alpha}(k-1)-\hat{I}_{1\alpha}(k-1)\right\}\end{pmatrix}\right],\quad(9)$$

где $T_3 = 0{,}1 \cdot \dfrac{L_2}{R_2}$ – коэффициент интегральной отработки, с.

6. Корректировка оценки момента сопротивления на валу $\hat{\tilde{M}}_C(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражению (10):

$$\hat{\tilde{M}}_C(k) = \hat{\tilde{M}}_C(k) + \hat{\tilde{M}}_C(k-1), \qquad (10)$$

где $\hat{\tilde{M}}_C(k)$ – оценка момента сопротивления на валу на текущем шаге дискретизации; $\hat{\tilde{M}}_C(k-1)$ – оценка момента сопротивления на валу на предыдущем шаге дискретизации.

7. Определение величины оценки момента сопротивления на валу $\hat{M}_C(k)$ на текущем шаге дискретизации согласно выражению (11):

$$\hat{M}_C(k) = \\ = k_3 z_p \frac{3}{2}\frac{L_m}{L_2}\begin{pmatrix} \hat{\psi}_{2\alpha}(k)\left\{I_{1\beta}(k) - \hat{I}_{1\beta}(k)\right\} - \\ -\hat{\psi}_{2\beta}(k)\left\{I_{1\alpha}(k) - \hat{I}_{1\alpha}(k)\right\} \end{pmatrix} + \hat{\tilde{M}}_C(k), \qquad (11)$$

где k_3 – коэффициент пропорциональной отработки, о.е.

8. Определение величины прогноза оценки угловой скорости ротора $\hat{\tilde{\omega}}(k)$ на текущем шаге дискретизации по выражению (12):

$$\hat{\tilde{\omega}}(k) = \frac{1}{J}\frac{\Delta t}{2}\left\{\left[\frac{3}{2}\frac{L_m}{L_2} z_p \begin{bmatrix} \hat{I}_{1\beta}(k)\hat{\psi}_{2\alpha}(k) - \\ -\hat{I}_{1\alpha}(k)\hat{\psi}_{2\beta}(k) \end{bmatrix} - \hat{M}_C(k)\right] + \right. \\ \left. + \left[\frac{3}{2}\frac{L_m}{L_2} z_p \begin{bmatrix} \hat{I}_{1\beta}(k-1)\hat{\psi}_{2\alpha}(k-1) - \\ -\hat{I}_{1\alpha}(k-1)\hat{\psi}_{2\beta}(k-1) \end{bmatrix} - \hat{M}_C(k-1)\right]\right\}, \qquad (12)$$

где J – эквивалентный момент инерции, приведенный к валу асинхронного двигателя, кг·м^2.

9. Корректировка величины прогноза оценки угловой скорости ротора $\hat{\tilde{\omega}}(k)$ по выражению (13):

$$\hat{\omega}(k) = \hat{\tilde{\omega}}(k) + \hat{\omega}(k-1). \qquad (13)$$

Структурная схема разработанного наблюдателя представлена на рис. 1.

Дальнейшие исследования разработанного наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя будут производится с помощью средств моделирования. Основные параметры двигателя сведены в табл. 1.

Коэффициент пропорциональной отработки k_3 зависит от параметров ПЭД. Для исследуемого погружного электродвигателя, параметры которого приведены в табл. 1, при первоначальной настройке наблюдателя коэффициент пропорциональной отработки принимается равным 300.

Таблица 1. *Параметры схемы замещения моделируемого асинхронного двигателя*

Table 1. *Parameters of simulated induction motor*

R_1	R'_2	L_1	L_2	L_m	z_p
Ом/Ohm		мГн/mH			
2,852	2,785	44,5	44,9	43,45	2

Исследование наблюдателя при отработке несогласованности начальных условий

Одним из важных показателей устойчивости разработанного наблюдателя является способность отработки несогласованности начальных условий наблюдателя и реального процесса. Результаты моделирования угловой скорости ротора погружного электродвигателя в режиме пуска и оценок наблюдателя при несогласованности начальных условий приведены на рис. 2.

Анализ переходных характеристик показал, что вне зависимости от величины рассогласования начальных условий первое достижение наблюдателем значения угловой скорости, полученного с помощью модели погружного электродвигателя, происходит в момент времени равный 0,006 с.

Далее процесс мониторинга скорости стабилизируется, и после 0,02 с наблюдатель начинает оценивать угловую скорость с погрешностью относительно модельной не более 5 %, что является допустимым в инженерной практике.

Исследование наблюдателя при отработке изменяющейся нагрузки на валу

Следующим немаловажным фактором для наблюдателя является возможность работы при условии изменяющейся нагрузки на валу. При этом вне зависимости от типа и величины нагрузки наблюдатель должен выдавать точные оценки значения угловой скорости ротора (рис. 3) и момента сопротивления на валу двигателя (рис. 4). Интегральная погрешность оценивания угловой скорости ротора наблюдателем приведена в табл. 2 и вычислена по выражению (14):

$$\Delta\omega = \frac{\int\limits_{t_{нач}}^{t_{конеч}} \left|\omega(t) - \hat{\omega}(t)\right| \cdot dt}{\int\limits_{t_{нач}}^{t_{конеч}} \left|\omega(t)\right| \cdot dt} \cdot 100\ \%, \qquad (14)$$

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

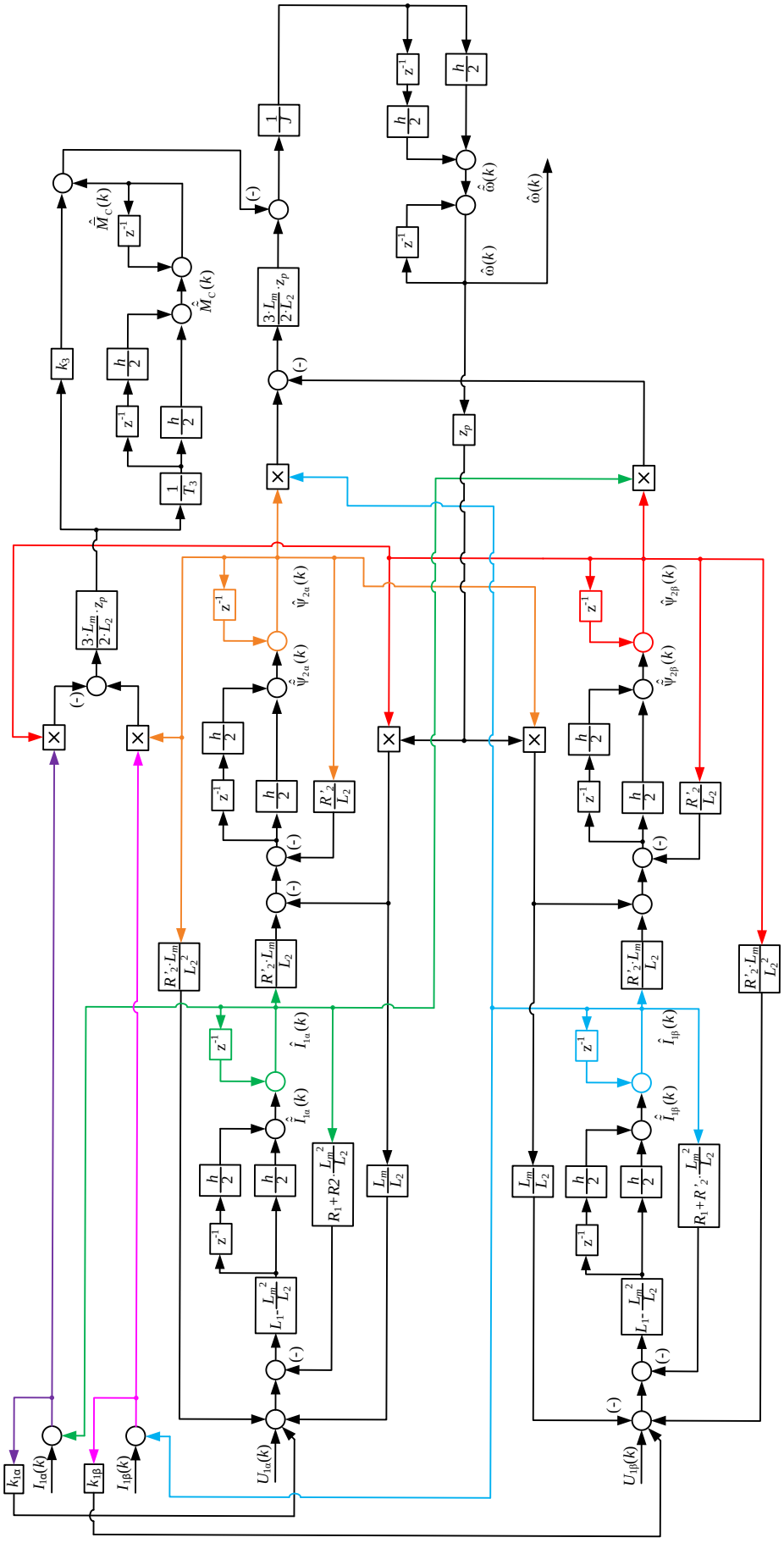

Рис. 1. *Структурная схема разработанного наблюдателя*
Fig. 1. *Schematic structure of the developed observer*

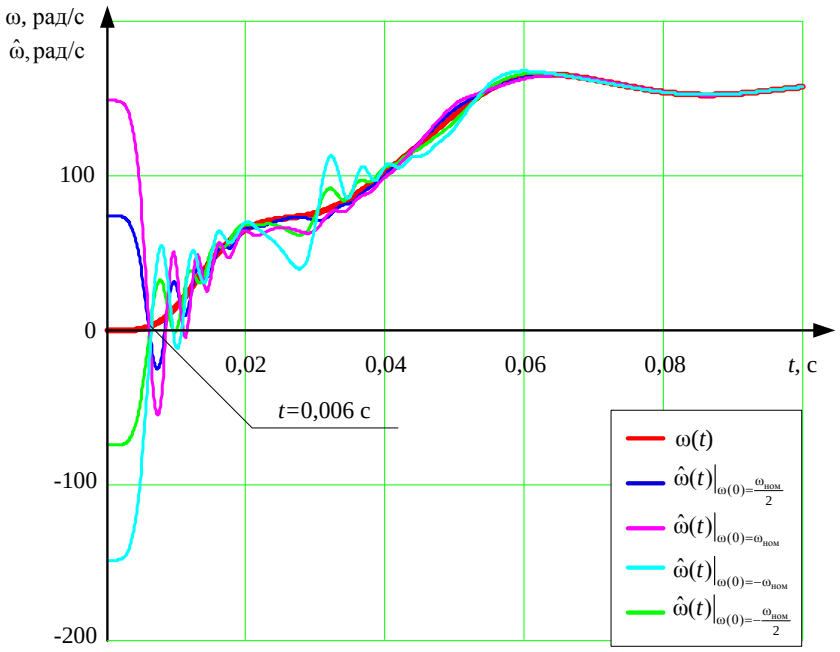

Рис. 2. *Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя ω(t) и ее оценок с помощью наблюдателя* $\hat{\omega}(t)$ *при разных начальных условиях*

Fig. 2. *Transient processes of submersible induction motor speed ω(t) and speed estimation* $\hat{\omega}(t)$ *under different initial conditions*

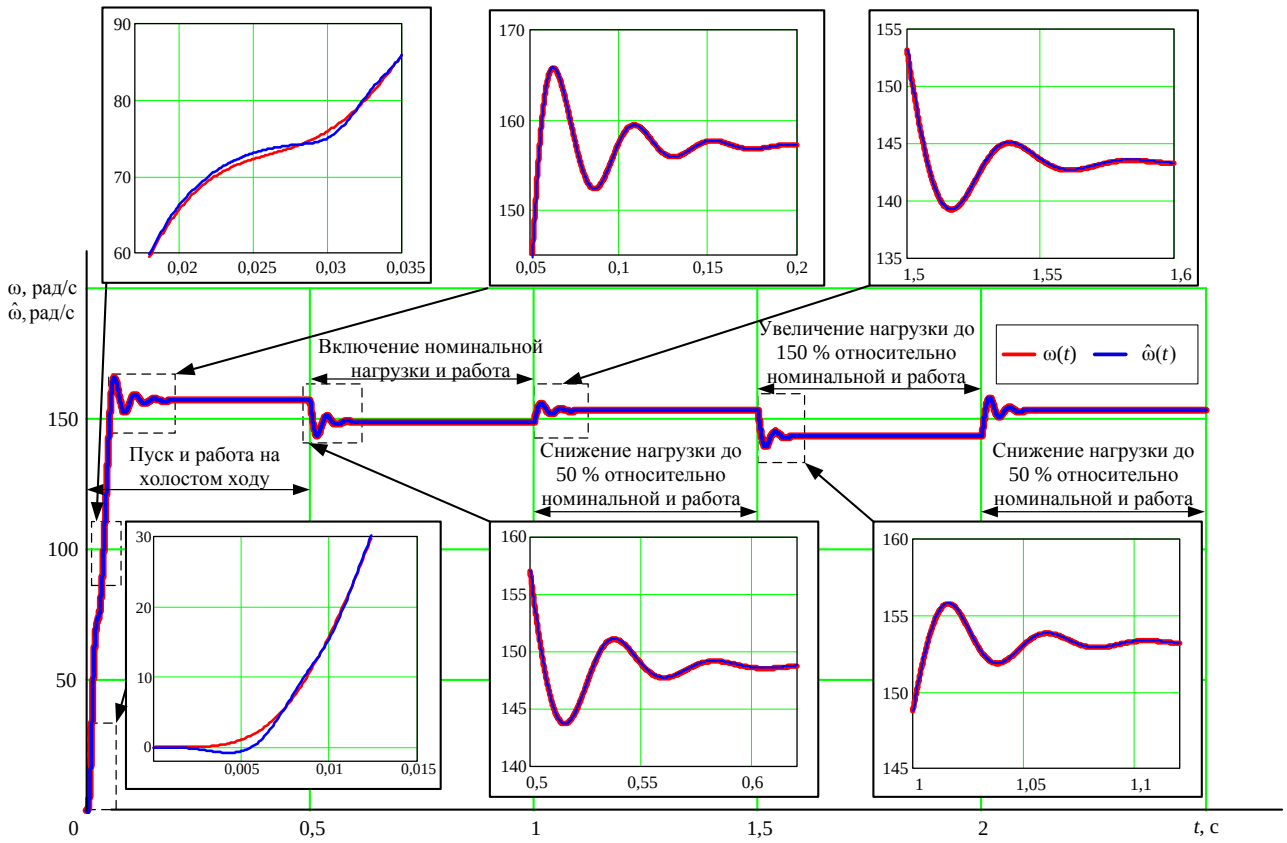

Рис. 3. *Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя ω(t) и ее оценок с помощью наблюдателя* $\hat{\omega}(t)$ *при изменяющейся нагрузке на валу*

Fig. 3. *Transient processes of submersible induction motor speed ω(t) and speed estimation* $\hat{\omega}(t)$ *under varying load torque*

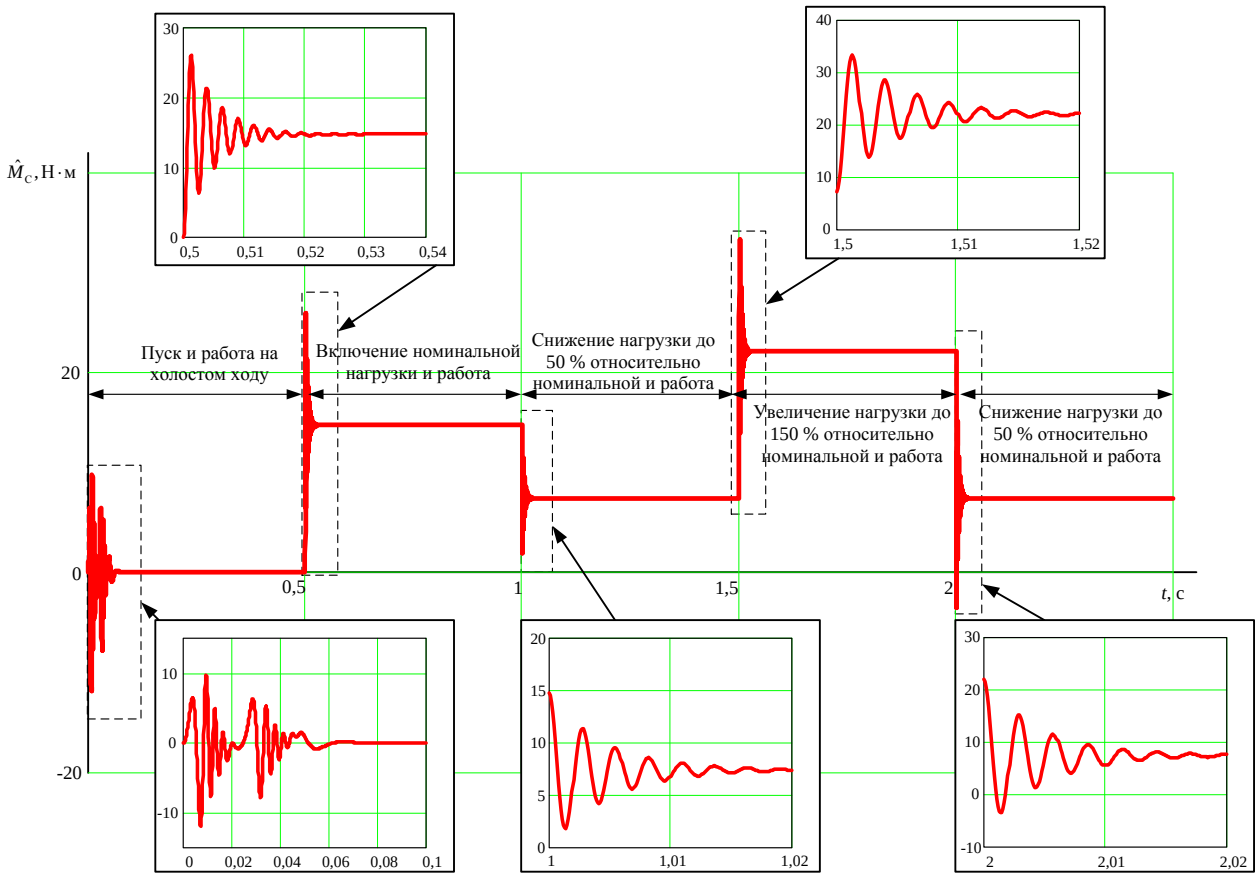

Рис. 4. *Переходные процессы момента сопротивления на валу погружного электродвигателя* $\hat{M}_C(t)$ *при изменяющейся нагрузке на валу*

Fig. 4. *Transient processes of submersible induction motor load torque estimation* $\hat{M}_C(t)$ *under varying load torque*

Таблица 2. *Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя для рассматриваемых режимов работы*

Table 2. *Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes under consideration*

Режим работы Operation mode	$t_{нач}$	$t_{конеч}$	$t_{нач}$–$t_{конеч}$	$\Delta\omega$
	c/sec			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	0,03
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	0,03
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	0,03
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,02
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,02
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	0,05
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	0,05
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,01
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,01

Исследуем наблюдатель при пуске электродвигателя при номинальной нагрузке, которая носит активный характер. В данном случае не учитываются потери на трение и в подшипниках. Результаты исследования приведены на рис. 5. Интегральная погрешность на всем промежутке времени от 0 до 0,1 секунды составила 1,2 %.

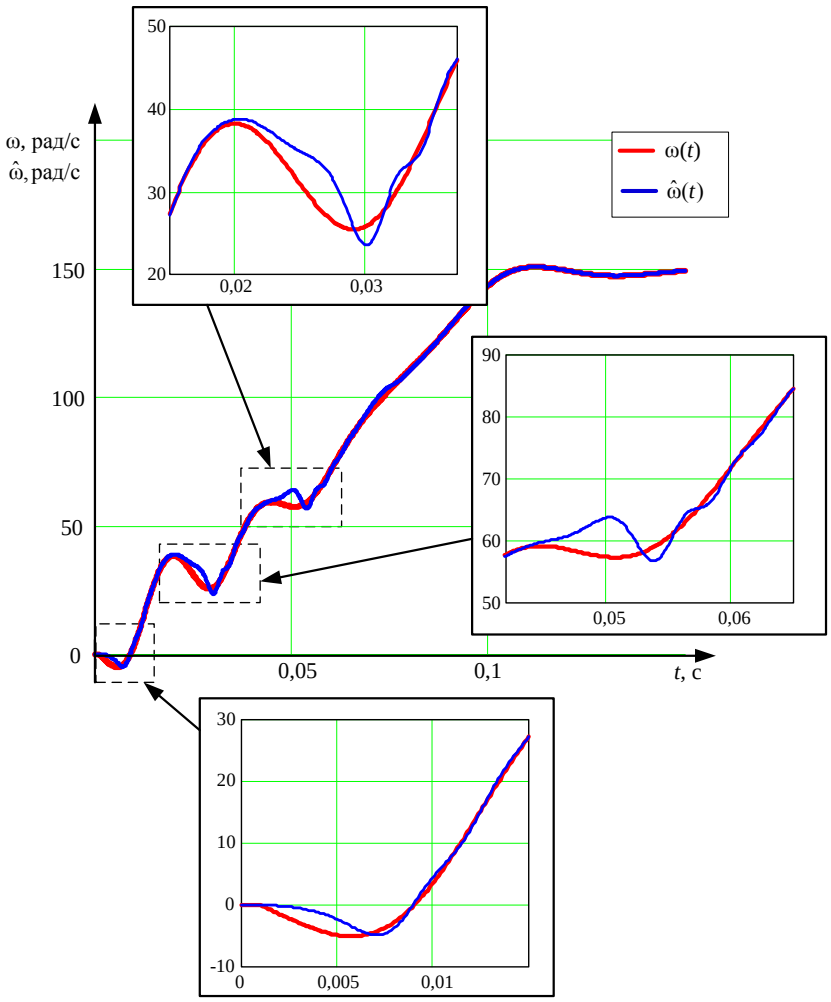

Рис. 5. *Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя ω(t) и ее оценок с помощью наблюдателя* $\hat{\omega}(t)$ *в режиме пуска при номинальной нагрузке*

Fig. 5. *Transient processes of submersible induction motor speed ω(t) and speed estimation* $\hat{\omega}(t)$ *under starting the engine at rated load*

Анализ рис. 2–4 и табл. 1 показал, что разработанный наблюдатель даже при условии изменения нагрузки на валу и пуске электродвигателя в нагруженном состоянии получает устойчивые оценки скорости ротора и момента сопротивления на валу. Интегральная погрешность оценки угловой скорости относительно модельных значений составляет не более 1,2 %, что допустимо в системах управления ПЭД.

Исследование наблюдателя при изменении параметров двигателя в ходе работы

Известно, что в ходе работы электродвигателя происходит изменение его параметров, вызванное нагревом. Поэтому важно, чтобы разработанный наблюдатель, модель которого завязана на параметрах электродвигателя, продолжал производить оценку наблюдаемых параметров даже при условии изменения в ходе работы части или всех параметров. Проведем исследование наблюдателя при изменении активных сопротивлений статора и ротора в диапазоне от –25 до +25 % от номинальных значений (рис. 6–9). Интегральная погрешность оценивания угловой скорости наблюдателем приведена в табл. 3–6.

Анализ рис. 6–9 и табл. 3–6 показал, что разработанный наблюдатель дает оценки угловой скорости ротора с интегральной погрешностью не более 5 % при изменении активного сопротивления статора и ротора в диапазоне от –25 до +25 % относительно номинального значения. В режиме пуска электродвигателя при уменьшении активного сопротивления ротора на 25 % относительно номинального значения погрешность составляет 5,53 %, что допустимо в инженерной практике. Это свойство наблюдателя делает его удобным в применении с идентификаторами параметров асинхронных двигателей, особенно при изменении параметров во время работы электродвигателя.

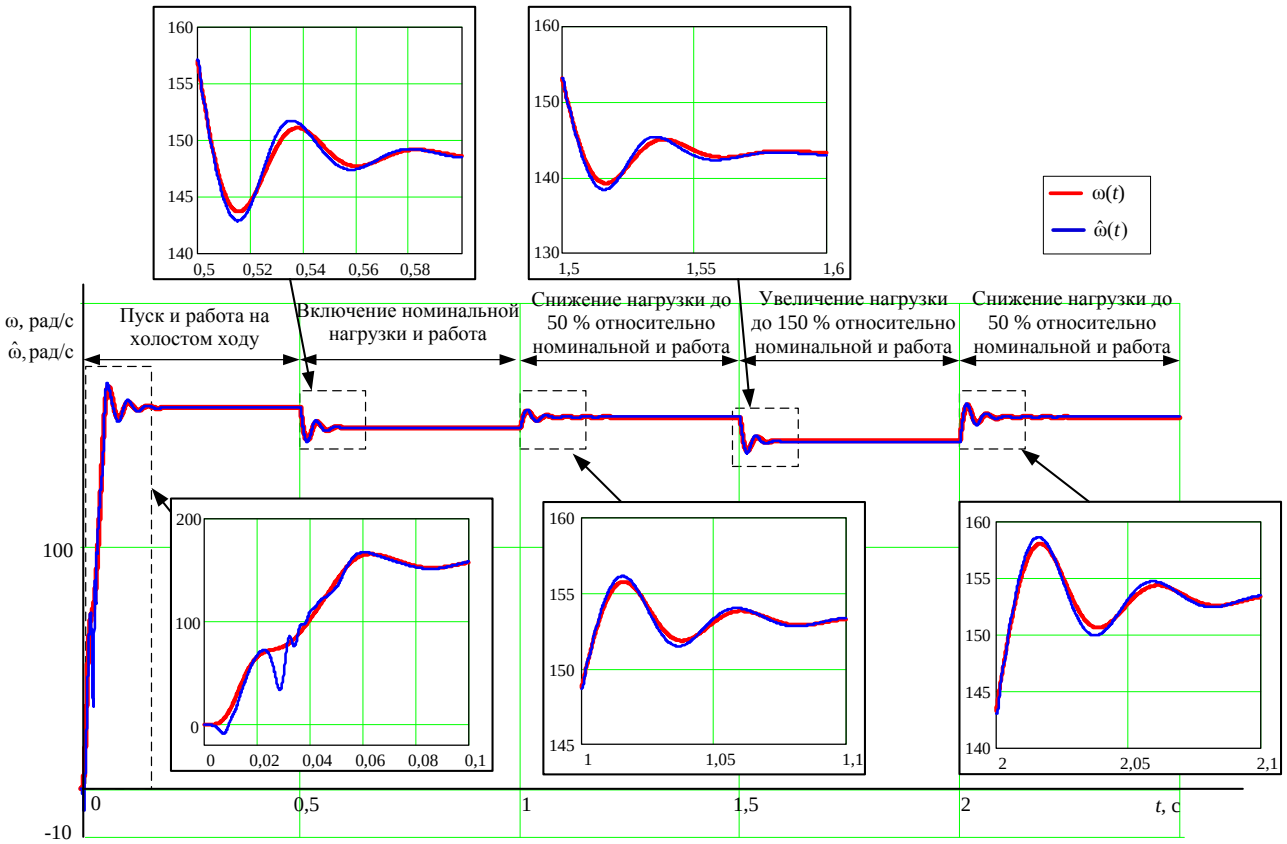

Рис. 6. *Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя ω(t) и ее оценок с помощью наблюдателя* $\hat{\omega}(t)$ *при увеличении активного сопротивления статора на 25 % относительно номинального значения*

Fig. 6. *Transient processes of submersible induction motor speed ω(t) and speed estimation* $\hat{\omega}(t)$ *with the stator active resistance value increases by 25% of the nominal value*

Таблица 3. *Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при увеличении активного сопротивления статора на 25 % относительно номинального значения*

Table 3. *Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the stator active resistance value increased by 25% of the nominal value*

Режим работы Operation mode	$t_{нач}$	$t_{конеч}$	$t_{нач}$–$t_{конеч}$	$\Delta\omega$
	c/sec			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	2,45
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,02
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	0,03
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	0,03
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,01
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,01
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	0,14
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	0,16
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,01
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,01

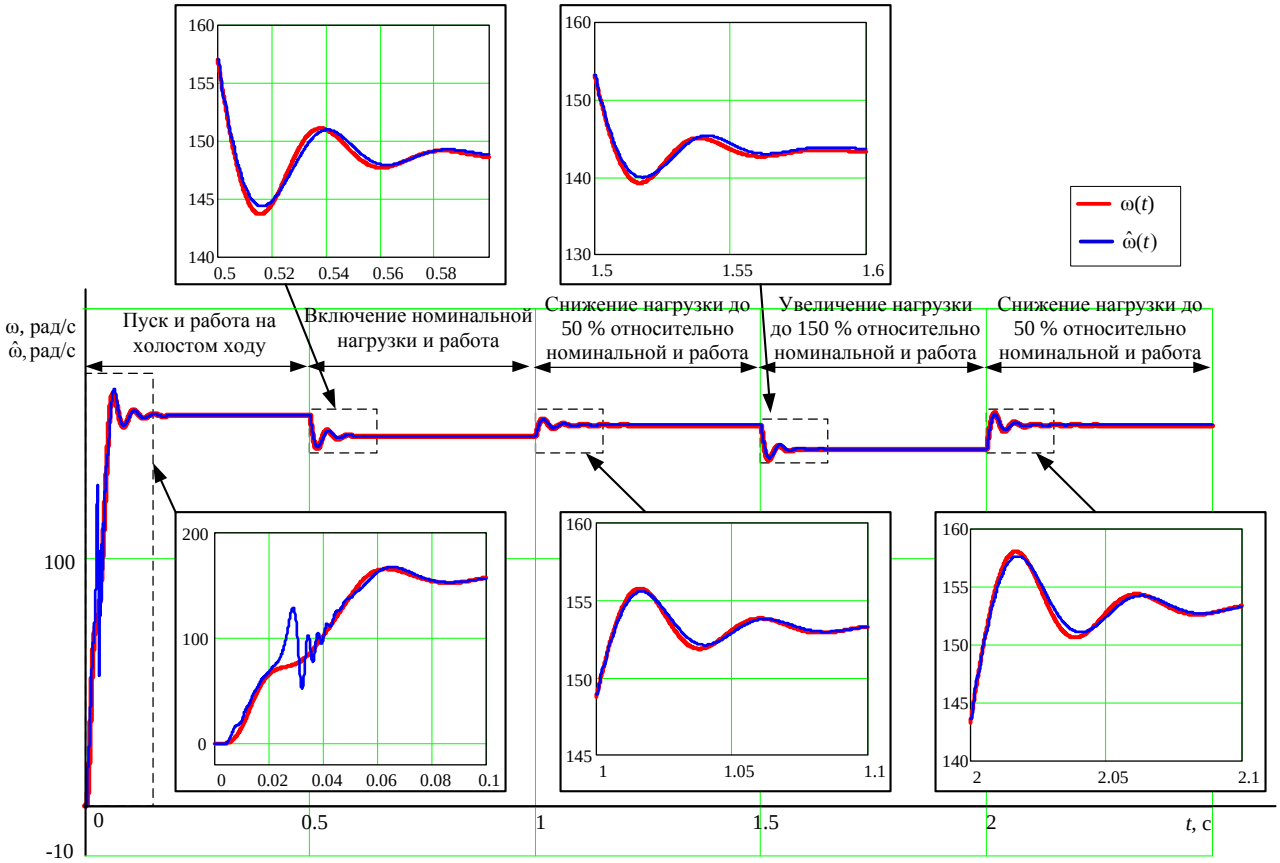

Рис. 7. *Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя ω(t) и ее оценок с помощью наблюдателя* $\hat{\omega}(t)$ *при уменьшении активного сопротивления статора на 25% относительно номинального значения*

Fig. 7. *Transient processes of submersible induction motor speed ω(t) and speed estimation* $\hat{\omega}(t)$ *with the stator active resistance value decreased by 25% of the nominal value*

Таблица 4. *Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при уменьшении активного сопротивления статора на 25 % относительно номинального значения*

Table 4. *Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the stator active resistance value decreased by 25% of the nominal value*

Режим работы Operation mode	$t_{нач}$	$t_{конеч}$	$t_{нач}$–$t_{конеч}$	$\Delta\omega$
	c/sec			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	2,95
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	0,09
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	0,09
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,02
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,02
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	0,23
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	0,24
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,02
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,02

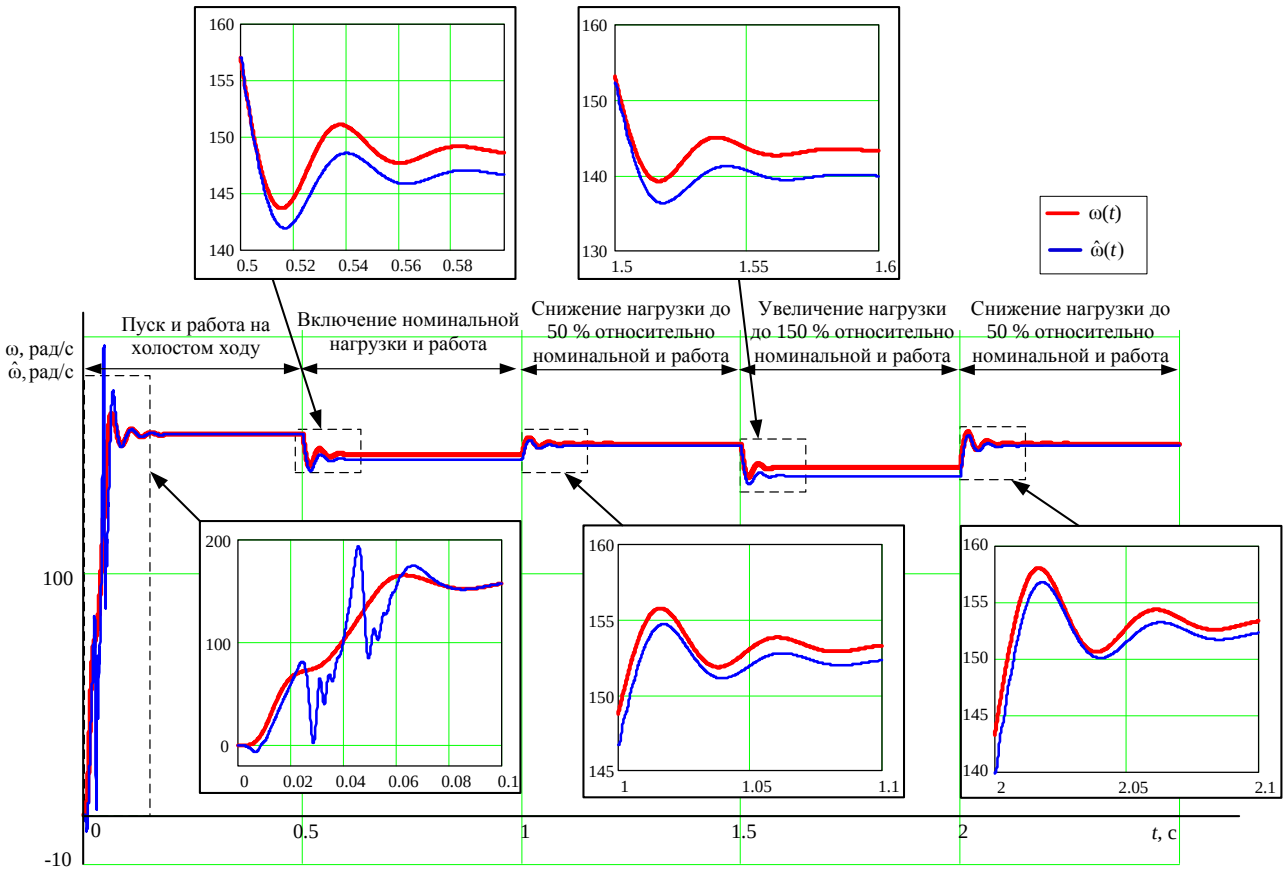

Рис. 8. *Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя ω(t) и ее оценок с помощью наблюдателя* $\hat{\omega}(t)$ *при увеличении активного сопротивления ротора на 25% относительно номинального значения*

Fig. 8. *Transient processes of submersible induction motor speed ω(t) and speed estimation* $\hat{\omega}(t)$ *with the rotor active resistance value increased by 25% of the nominal value*

Таблица 5. *Погрешности оценивания скорости вала погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при увеличении активного сопротивления ротора на 25 % от номинального значения*

Table 5. *Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the rotor active resistance value increased by 25% of the nominal value*

Режим работы Operation mode	$t_{нач}$	$t_{конеч}$	$t_{нач}$–$t_{конеч}$	$\Delta\omega$
	c/sec			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	4,92
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	1,28
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	1,36
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,67
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,62
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	2,22
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	2,35
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,75
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,62

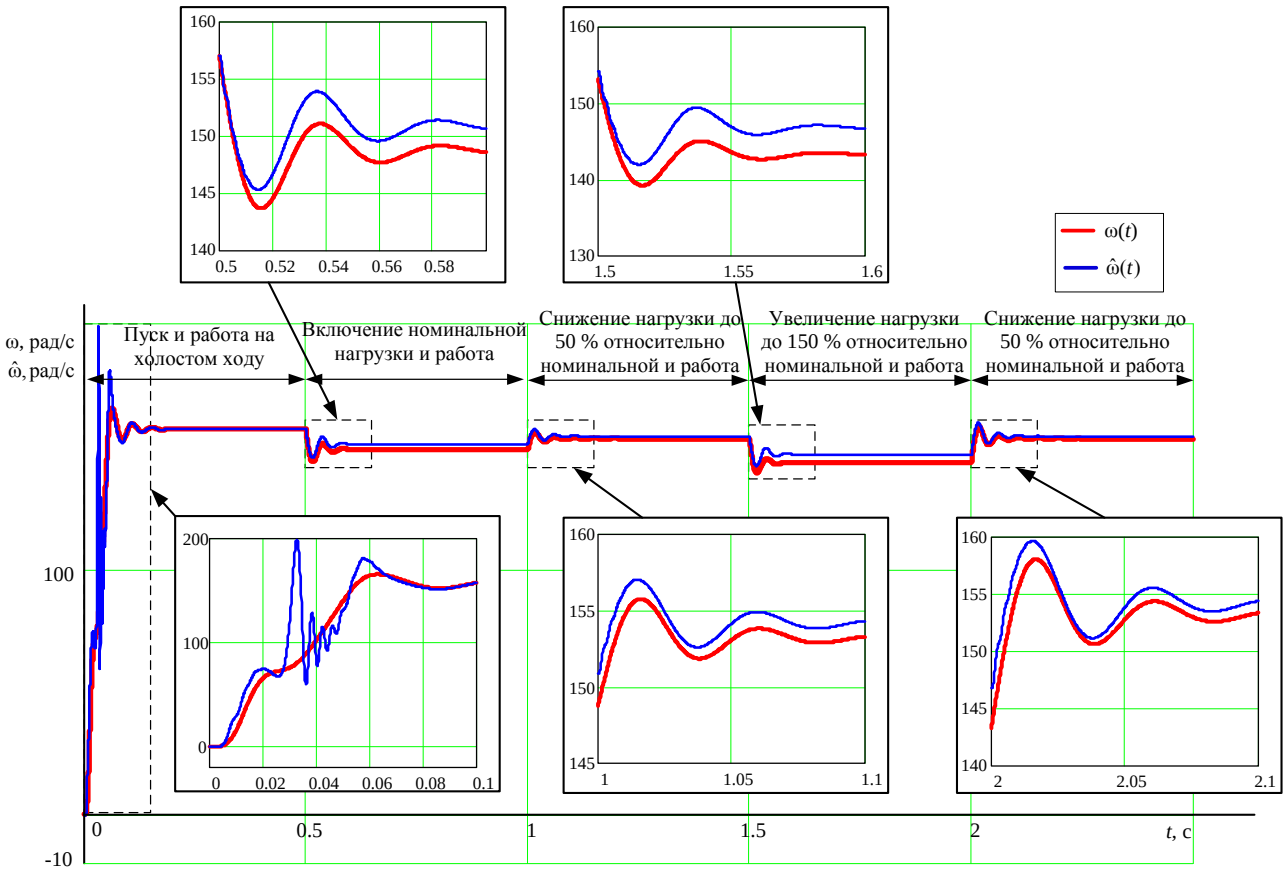

Рис. 9. *Переходные характеристики угловой скорости ротора погружного электродвигателя ω(t) и ее оценок с помощью наблюдателя* $\hat{\omega}(t)$ *при уменьшении активного сопротивления ротора на 25 % относительно номинального значения*

Fig. 9. *Transient processes of submersible induction motor speed ω(t) and speed estimation* $\hat{\omega}(t)$ *with the rotor active resistance value decreases by 25% of the nominal value*

Таблица 6. *Погрешности оценивания угловой скорости ротора погружного электродвигателя в исследуемых статических и динамических режимах работы при уменьшении активного сопротивления ротора на 25 % от номинального значения*

Table 6. *Errors of submersible motor speed estimation in all static and dynamic operating modes with the rotor active resistance value decreases by 25% of the nominal value*

Режим работы Operation mode	$t_{нач}$	$t_{конеч}$	$t_{нач}-t_{конеч}$	$\Delta\omega$
	c/sec			%
Пуск на холостом ходу/Idle start	0	0,1	0,1	5,53
Работа на холостом ходу/Idling	0,1	0,5	0,4	0,01
Включение номинальной нагрузки/Rated load torque	0,5	0,6	0,1	1,35
Работа в номинальном режиме/Operation in nominal mode	0,6	1,0	0,4	1,42
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	1,0	1,1	0,1	0,69
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	1,1	1,5	0,4	0,65
Увеличение нагрузки до 150 % относительно номинальной Load increase up to 150% relative to rated load	1,5	1,6	0,1	2,32
Работа в режиме 150 % относительно номинальной нагрузки Operating at 150% relative to rated load	1,6	2,0	0,4	2,43
Снижение нагрузки до 50 % относительно номинальной Load reduction up to 50% relative to nominal	2,0	2,1	0,1	0,77
Работа в режиме 50 % относительно номинальной нагрузки Operating at 50% relative to rated load	2,1	2,5	0,4	0,65

Выводы

1. Показана актуальность и целесообразность разработки наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя как средства информационного назначения.
2. Разработана структура наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя.
3. Проведена проверка работоспособности и эффективности наблюдателя при отработке несогласованности начальных условий. Выявлено, что оценки угловой скорости ротора вне зависимости от величины рассогласования достигают значения скорости, полученной с помощью модели электродвигателя в момент времени равный 0,006 с. Далее процесс оценивания угловой скорости стабилизируется, и после 0,02 с наблюдатель оценивает скорость с погрешностью относительно модельной в пределах допустимой. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения разработанного наблюдателя в любых процессах добычи нефти, так как стабилизация рассогласования происходит быстрее, чем процессы пуска электродвигателя.
4. Проведена проверка работоспособности и эффективности наблюдателя при отработке изменяющейся нагрузки на валу двигателя. Выявлено, что разработанный наблюдатель при изменении нагрузки на валу, перегрузке и пуске в нагруженном состоянии получает устойчивые оценки угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя. Интегральная погрешность оценки угловой скорости ротора относительно значений, полученных с помощью модели, составляет не более 1,2 %, что допустимо в системах управления погружными электродвигателями.
5. Проведена проверка работоспособности и эффективности наблюдателя при изменении параметров двигателя в ходе работы. Выявлено, что для диапазона изменения параметров от –25 до +25 % относительно номинальных значений наблюдатель корректно оценивает угловую скорость ротора с погрешностью не более 5 % для большинства режимов работы. Это позволяет применять его с идентификаторами параметров электродвигателей с целью разработки замкнутых систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалетдинов Р.С. Механизированная добыча нефти: новые вызовы – новые решения // Деловой журн. Neftegaz.RU. – 2023. – № 4 (136). – С. 42–47.
2. РуссНефть. Производство. Добыча нефти. URL: https://www.russneft.ru/production/oil/ (дата обращения 15.03.2024).
3. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года. URL: http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf (дата обращения 15.03.2024).
4. World Energy Outlook 2023. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf (дата обращения 15.03.2024).
5. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. Повышение надежности электротехнического комплекса электрооборудования нефтедобычи на основе анализа его аварийности // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 3 (40). – С. 20–26. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-20-26.
6. Рукин М.В., Молчанова В.А., Уразаков К.Р. Методика определения наработки на отказ установки электроцентробежного насоса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 219–229. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3792.
7. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking // Engineering Failure Analysis. – 2016. – Vol. 60. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.044.
8. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submergible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian) / A.A. Pashali, R.S. Khalfin, D.V. Silnov, A.S. Topolnikov, B.M. Latypov // OIJ. – 2021. – P. 92–96. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-4-92-96.
9. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачева, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // PROнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 54–58. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58.
10. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния, 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. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4349.
11. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
12. Kwon Y.A., Kim S.K. A high-performance strategy for sensorless induction motor drive using variable link voltage // IEEE Trans Power Electron. – 2007. – Vol. 22 – № 1. – P. 329–332. DOI: 10.1109/TPEL.2006.887178.

13. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing / R. Iudin, A. Petrochenkov, B. Krause, E. Solodkiy, G. Panchenko // 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. – Riga, Latvia, 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
14. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
15. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable / Y. Deng, Z. Liang, P. Xi, X. Zuo // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2019. – Vol. 14. – P. 219–229. DOI: 10.1007/s42835-018-00023-7.
16. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular velocity's neural network observer of the electric drive of TVR – IM Type implemented in software environment LabVIEW // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, Russia, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012005.
17. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3013
18. Montoya O.D., De Angelo Cr.H., Bossio G. Parametric estimation in three-phase induction motors using torque data via the generalized normal distribution optimizer // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 23. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102446
19. Elkholy M.M., El-Hay E.A., El-Fergany A.A. Synergy of electrostatic discharge optimizer and experimental verification for parameters estimation of three phase induction motors // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2022. – Vol. 31. – P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.09.013
20. Удут 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.
21. Indragandhi V., Subramaniyaswamy V., Selvamathi R. Electric motor drives and their applications with simulation practices. – USA: Cambridge, Academic Press, 2022. – 507 p.
22. Афанасьев К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью: дис. … канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 106 с.

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; https://orcid.org/0000-0003-4138-5982

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 Игоревич Попов, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; popovei72@mail.ru

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, 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

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

Вадим Владимирович Тимошкин, 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. timoshkinvv@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-5116-5508

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

Юлия Олеговна Кулеш, инженер отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. yok13@tpu.ru
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
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
Марина Витальевна Денеко, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков Московского технического университета связи и информатики, Россия, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А. denekomarina585@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-4162-375X

Поступила в редакцию: 26.07.2024
Поступила после рецензирования: 12.08.2024
Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. Kamaletdinov R.S. Mechanized oil production: new challenges – new solutions. *Business magazine Neftegaz.RU*, 2023, no. 4 (136), pp. 42–47. (In Russ.)
2. *RussNeft. Production. Oil production*. (In Russ.) Available at: https://www.russneft.ru/production/oil/ (accessed 15 March 2024).
3. *Forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2030*. (In Russ.) Available at: http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf (accessed 15 March 2024).
4. *World Energy Outlook 2023*. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf (accessed 15 March 2024).
5. Romanov V.S., Goldstein V.G. Improving the reliability of electrical engineering complex of submersible electric equipment of oil production based on the analysis of its emergency. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2018, no. 3 (40), pp. 20–26. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-20-26.
6. Rukin M.V., Molchanova M.V., Urazakov K.R. Method for determining the mean time between failures of esp units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering,* 2022, vol. 333, no 11. pp. 219–229. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3792.
7. Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J. Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 60. pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.044.
8. Pashali A.A., Khalfin R.S., Silnov D.V., Topolnikov A.S., Latypov B.M. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submergible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian). *OIJ*, 2021, pp. 92–96. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-4-92-96.
9. 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.
10. 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*, 2020, vol. 334, no. 8. pp. 220–231. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4349.
11. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halasz S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2. pp. 118–126. (In Russ.)
12. Kwon Y.A., Kim S.K. A high-performance strategy for sensorless induction motor drive using variable link voltage. *IEEE Trans Power Electron.* 2007, vol. 22, no. 1, pp. 329–332. DOI: 10.1109/TPEL.2006.887178.
13. Iudin R., Petrochenkov A., Krause B., Solodkiy E., Panchenko G. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing. 2*021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. Riga, Latvia, 2021. pp. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
14. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. pp. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
15. Deng Y., Liang Z., Xi P., Zuo X. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, vol. 14, pp. 219–229. DOI: 10.1007/s42835-018-00023-7.
16. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular velocity's neural network observer of the electric drive of TVR – IM type implemented in software environment LabVIEW. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk, Russia, 2016. pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012005.
17. Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S, Kladiev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3013

18. Montoya O.D., De Angelo Cr.H., Bossio G. Parametric estimation in three-phase induction motors using torque data via the generalized normal distribution optimizer. *Results in Engineering*, 2024, vol. 23, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102446
19. Elkholy M.M., El-Hay E.A., El-Fergany A.A. Synergy of electrostatic discharge optimizer and experimental verification for parameters estimation of three phase induction motors. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, vol. 31, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.09.013
20. Udut L.S., Malceva O.P., Koyain N.V. *Design and research of automated electric drives: textbook. Part 8. Induction frequency-controlled electric drive*. Tomsk, TPU Publ., 2011. 648 p.
21. Indragandhi V., Subramaniyaswamy V., Selvamathi R. *Electric motor drives and their applications with simulation practices*. USA, Cambridge, Academic Press, 2022. 507 p.
22. Afanasyev K.S. *Development of a state observer for an induction electric drive with increased parametric robustness*. Cand. Diss. Tomsk, 2015. 106 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; https://orcid.org/0000-0003-4138-5982
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 I. Popov, Assistant, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. popovei72@mail.ru
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
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
Vadim V. Timoshkin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. timoshkinvv@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0001-5116-5508
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
Yulia O. Kulesh, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; yok13@tpu.ru
Evgeniy V. Bolovin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; LLC «INT» of JSC «EleSy», 161A, Altaiskaya street, Tomsk, 634021, Russian Federation. orange@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-8483-8999
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
Marina V. Deneko, Cand. Sc., Associate Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 8A, Aviamotornaya street, Moscow, 111024, Russian Federation. denekomarina585@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-4162-375X

Received: 26.07.2024
Revised: 12.08.2024
Accepted: 10.09.2024