

УДК 621.315.2.016.2:621.313.333.2

РАЗРАБОТКА И НАСТРОЙКА НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОЛНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Раков Иван Витальевич¹,
rakovivan@live.com

Глазырин Александр Савельевич^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич²,
kladiev@tpu.ru

¹ ООО «Газпром трансгаз Томск»,
Россия, 634029, г. Томск, пр. Фрунзе, 9.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

Актуальность. В связи с тем, что запасы нефти, не требующие для своей добычи высоких энергозатрат, снижаются, количество фонтанирующих скважин становится меньше, а обводненность добываемого флюида увеличивается, перед специалистами нефтедобывающих компаний встает задача – максимально уменьшить все виды энергозатрат, обеспечив повышение рентабельности добычи нефти. Одним из методов снижения энергетических затрат при добыче нефти из низко- и среднедебитных скважин является перевод скважины, оборудованной установкой электроцентробежного насоса, с режима непрерывной эксплуатации на режим периодической эксплуатации скважины и в частности ее подтипа – циклической эксплуатации скважины, которая характеризуется чередованием кратковременных периодов извлечения (до 15 минут) и накопления (до 30 минут) нефти на забое скважины. При переводе скважины на циклическую эксплуатацию происходит снижение потребления электроэнергии погружным электродвигателем до 40 % и увеличение добычи нефти до 3 % за счет частичной гравитационной сепарации добываемого флюида на этапе накопления. В свою очередь, негативным эффектом от перевода скважины на циклическую эксплуатацию является уменьшение среднего срока наработки на отказ из-за увеличения бросков тока и момента при интенсивном разгоне вала погружного электродвигателя до номинальной скорости. Решением данных проблем будет переход от разомкнутой скалярной к векторной бездатчиковой системе управления. Для реализации векторной системы управления необходимо получить информацию о переменных состоянии погружного электродвигателя. Учитывая основные достоинства и недостатки прямого измерения и косвенного оценивания переменных состояния, перспективным способом получения информации можно считать построение наблюдателя полного порядка на основе явных математических моделей. На основании вышеизложенного разработка наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», а также методики его настройки является актуальной задачей, решение которой позволит создать предпосылки для реализации векторной системы управления погружным электродвигателем.

Цель: разработать и экспериментально подтвердить работоспособность наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Методы: анализ литературных источников, системный анализ, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

Результаты. Была проведена разработка и экспериментальное испытание наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель». Результаты данного исследования подтверждают работоспособность наблюдателя и возможность его применения для реализации векторной системы управления погружным электродвигателем.

Ключевые слова:

наблюдатель полного порядка, электротехнический комплекс, кабельная линия, асинхронный двигатель, экспериментальное тестирование, методика настройки наблюдателя, генетический алгоритм, настройка наблюдателя, система управления, УЭЦН, циклическая эксплуатация скважины, периодическая эксплуатация скважины, средний срок наработки на отказ, низко- и среднедебитные скважины, стохастический характер потребления электрической энергии.

Введение

При переводе скважины на режим циклической эксплуатации (ЦЭС) теоретически [1–7] и экспериментально [8–10] подтверждено уменьшение потребления электроэнергии (до 40 %) и увеличение добычи нефти (до 3 %). Однако перевод на ЦЭС также сопро-

вождается негативными эффектами, такими как: уменьшение ресурса гидрозащиты установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), ускоренный износ шайб в компоновке центробежного насоса, промежуточных радиальных и упорных подшипников [8]. При изменении режима работы средний срок

наработки на отказ компонентов подземного оборудования снижается практически в 2 раза [8], т. е. перевод в большом объеме скважин на ЦЭС приведет к повышению количества вышедших из строя погружных электродвигателей (ПЭД) и компонентов насоса в ограниченный промежуток времени, а это может нивелировать полученные положительные эффекты от экономии электроэнергии и увеличения количества добытой нефти за счет расхода средств на ремонт подземного оборудования УЭЦН. Причиной негативных эффектов при переводе на технологию ЦЭС является уменьшение времени разгона ротора ПЭД до установившейся скорости вращения с нескольких десятков минут до нескольких десятков секунд, что вызывает броски тока и момента при разгоне и, как следствие, повышенный уровень вибрации всей подземной компоновки УЭЦН [8].

Перспективный способ борьбы с бросками тока и момента в переходном режиме – это разработка и внедрение векторной системы управления электроцентробежным насосом [11–19]. Для реализации этой системы необходимо получить информацию о состоянии ПЭД. Один из методов получения информации, который позволяет оценивать переменные состояния без изменения и доработки подземной части оборудования УЭЦН – создание наблюдателей полного порядка переменных состояния электротехнической подсистемы УЭЦН на основе явных математических моделей. Для разработки наблюдателя переменных состояний ПЭД необходимо составить математические модели каждого электротехнического компонента, входящего в силовую электрическую цепь УЭЦН, а именно «преобразователь частоты (ПЧ) – синус-фильтр (СФ) – повышающий трансформатор (ПТ) – нефтепогружной кабель (НПК) – погружной электродвигатель (ПЭД)», затем объединить каждую отдельную модель в общую систему [20]. Однако если обеспечить измерение токов и напряжений на выходе ПТ, входе НПК, то достаточно будет составить только математические модели НПК и ПЭД, а затем объединить их в общую систему, получив таким образом в обобщенном случае математическую модель «кабельная линия – асинхронный двигатель».

При реализации наблюдателя также необходимо учитывать основные возмущающие воздействия, которые присутствуют при эксплуатации УЭЦН, а именно: изменение температуры затрубного и внутритрубного пространства насосно-компрессорной трубы (НКТ) при различных режимах работы УЭЦН, изменение состава добываемого флюида, появление асфальтосмолопарафиновых отложений на внутренних стенках НКТ, задавая стохастический характер потребления электрической энергии. Перечисленные возмущающие воздействия приводят к тому, что в процессе работы параметры подземной электротехнической системы будут меняться со временем. Это, в свою очередь, приводит к тому, что при разработке наблюдателя необходимо обеспечить его параметрическую робастность.

Таким образом, создание наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» с параметрической робастностью является своевременной и актуальной задачей.

Математическое описание разработанного наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»

Математическое описание разработанного наблюдателя переменных состояния исследуемого комплекса представлено в виде системы дифференциальных уравнений (1), в котором количество переменных состояния может варьироваться в зависимости от длины кабельной линии и частоты питающей сети [20]. Допущения при составлении математического ядра наблюдателя указаны в работах [20, 21].

При моделировании кабельной линии были приняты следующие допущения и упрощения: в модели рассматривается нефтепогружной кабель круглого сечения, представляющий собой однородную длинную линию; в рассматриваемом диапазоне температур изменение электрофизических свойств материалов кабеля пренебрежимо мало и их значения принимаются постоянными; влияние брони на индуктивность жил кабеля пренебрежимо мало и не учитывается; геометрические размеры конструктивных элементов нефтепогружного кабеля и взаимное расположение изолированных токопроводящих жил принимаются постоянными по всей длине; вихревые токи в экранах и эффект вытеснения тока в основных проводниках (эффект близости) не учитывается в рассматриваемом диапазоне частот; стальная броня кабеля заземлена и выполняет функцию экрана, в связи с чем магнитное влияние колонны НКТ не учитывается; не учитываются потери в металле и эффект насыщения; на характеристики нефтепогружного кабеля не влияют электротехнические компоненты, находящиеся в силовом канале УЭЦН [20].

При моделировании асинхронного двигателя (АД) были приняты следующие допущения и упрощения: магнитная система линейная; отсутствуют потери в стали, вызванные вихревыми токами и явлениями гистерезиса; отсутствует эффект вытеснения тока; обмотки статора и ротора считаются симметричными; воздушный зазор равномерный; изменение магнитной проводимости, обусловленное наличием пазов статора и ротора, не учитывается; распространение магнитных полей равномерное и синусоидальное [21].

На основании методологии исследования, приведенной в работе [20], а также для удобства расчета при частоте питания 50 Гц количество звеньев редуцированной математической модели кабельной линии нужно указывать из расчета 1 звено на 1 километр кабельной линии. При длине кабельной линии в 3,5 км количество звеньев будет равняться четырем, при 4,2 км – 5 звеньев и т. д.

$$\begin{aligned}
 & \frac{d\hat{i}_{1\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{\left(u_{\alpha_вх}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{1\alpha_вых}(t) + k_1 \cdot (R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\alpha_каб}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t)) \right)}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{i}_{1\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{\left(u_{\beta_вх}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{1\beta_вых}(t) + k_1 \cdot (R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\beta_каб}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t)) \right)}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{1\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{1\alpha_каб}(t) - \hat{u}_{1\alpha_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{2\alpha_каб}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{1\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{1\beta_каб}(t) - \hat{u}_{1\beta_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{2\beta_каб}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \vdots \\
 & \frac{d\hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{(\hat{u}_{(n-1)\alpha_вых}(t) - \hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t))}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{i}_{(n)\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{(\hat{u}_{(n-1)\beta_вых}(t) - \hat{i}_{(n)\beta_каб}(t) \cdot R_{каб} / n - \hat{u}_{(n)\beta_вых}(t))}{L_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t) - \hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{1\alpha}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{(n)\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(\hat{i}_{(n)\beta_каб}(t) - \hat{u}_{(n)\beta_вых}(t) \cdot G_{каб} / n - \hat{i}_{1\beta}(t))}{C_{каб} / n} \\
 & \frac{d\hat{u}_{\alpha_доб}(t)}{dt} = \frac{(R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\alpha_каб}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t))}{k_2} \\
 & \frac{d\hat{u}_{\beta_доб}(t)}{dt} = \frac{(R_{каб} + R_3) \cdot (\hat{i}_{\beta_каб}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t))}{k_2} \\
 & \frac{d\hat{i}_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t) - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{i}_{1\alpha}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \\
 & \quad + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \hat{u}_{\alpha_доб}(t) \\
 & \frac{d\hat{i}_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{u}_{(n)\beta_вых}(t) - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) - \\
 & \quad - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \hat{u}_{\beta_доб}(t) \\
 & \frac{d\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \hat{i}_{1\alpha}(t) - z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) \\
 & \frac{d\hat{\Psi}_{2\beta}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) + z_p \cdot \hat{\omega}(t) \cdot \hat{\Psi}_{2\alpha}(t) \\
 & \hat{M}_{эм}(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\hat{\Psi}_{2\alpha}(t) \cdot \hat{i}_{1\beta}(t) - \hat{\Psi}_{2\beta}(t) \cdot \hat{i}_{1\alpha}(t)) \\
 & \frac{d\hat{M}_c(t)}{dt} = \left(\frac{1}{k_4 \cdot T_2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p + \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_3 \right) \cdot \\
 & \quad \cdot \left(\hat{\Psi}_{2\alpha}(t) \cdot (\hat{i}_{\beta_каб}(t) - \hat{i}_{1\beta_каб}(t)) - \hat{\Psi}_{2\beta}(t) \cdot (\hat{i}_{\alpha_каб}(t) - \hat{i}_{1\alpha_каб}(t)) \right); \\
 & \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (\hat{M}_{эм}(t) - \hat{M}_c(t)),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $u_{\alpha_вх}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси α ; $u_{\beta_вх}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения

в момент времени t по оси β ; $i_{\alpha_каб}(t)$ – проекция вектора измеренного тока на входе кабельной линии в момент времени t по оси α ; $i_{\beta_каб}(t)$ – проекция вектора измеренного тока на входе кабельной линии в момент времени t по оси β ; $\hat{i}_{(n)\alpha_каб}(t)$ – оценка состояния вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси α ; $\hat{i}_{(n)\beta_каб}(t)$ – оценка состояния вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси β ; $\hat{u}_{(n)\alpha_вых}(t)$ – оценка состояния вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси α ; $\hat{u}_{(n)\beta_вых}(t)$ – оценка состояния вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси β ; $\hat{i}_{1\alpha}(t)$ – оценка состояния вектора тока статора в момент времени t по оси α ; $\hat{i}_{1\beta}(t)$ – оценка состояния вектора тока статора в момент времени t по оси β ; $\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)$ – оценка состояния вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси α ; $\hat{\Psi}_{2\beta}(t)$ – оценка состояния вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси β ; $\hat{M}_{эм}(t)$ – оценка состояния электромагнитного момента АД; $\hat{M}_c(t)$ – оценка состояния момента сопротивления на валу АД; $\hat{\omega}(t)$ – оценка угловой скорости вращения ротора АД; $R_{каб}$ – сопротивление токоведущих жил; $L_{каб}$ – индуктивность токоведущих жил; $C_{каб}$ – эквивалентная ёмкость фазы относительно двух других фаз и брони; $G_{каб}$ – проводимость изоляции; $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора; $L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_{2\sigma}}$ – коэффициент рассеяния; $R_3 = R_1 + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L'_{2\sigma}}$ – эквивалентное активное сопротивление цепей статора; R_1 – сопротивление обмотки статора; R'_2 – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора; J – момент инерции одномассовой механической системы электропривода; z_p – число пар полюсов; k_1, k_2, k_3, k_4 – масштабные коэффициенты.

Методика настройки наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности

Первоначально для разработки методики настройки масштабных коэффициентов наблюдателя в качестве объекта исследования был принят двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) из-за своего простого математического описания. Был реализован наблюдатель полного порядка ДПТ НВ и настроен по известной методике [22], после чего проведено исследование влияния изменения параметров схемы замещения ДПТ НВ в математическом ядре наблюдателя на ошибку оценивания угловой скорости вращения вала ДПТ НВ по формуле (2)

$$\varepsilon_{\omega} = \frac{\int_0^t |\omega(t) - \hat{\omega}(t, k_1, k_2, \dots, k_n)| dt}{\int_0^t |\omega(t)| dt} \cdot 100, \tag{2}$$

где $\omega(t)$ – угловая скорость вращения вала двигателя; $\hat{\omega}(t, k_1, k_2, \dots, k_n)$ – оценка угловой скорости вращения вала двигателя; $t, k_1, k_2, \dots, k_n$ – значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя.

График зависимости ошибки оценивания наблюдателем полного порядка угловой скорости вращения вала ДПТ НВ при изменении электрических параметров схемы замещения ДПТ НВ в математическом ядре наблюдателя представлен на рис. 1 (не закрашенная поверхность). В результате исследования отмечено, что при уменьшении электрических параметров схемы замещения ошибка оценивания угловой скорости вращения возрастает в большей степени, чем при увеличении параметров.

На основании анализа поверхности (рис. 1) (не закрашенная) была выдвинута гипотеза о том, что наблюдатель, заведомо настроенный относительно заниженных параметров схемы замещения исследуемой системы, будет более точно оценивать угловую скорость вращения при изменении электрических параметров системы. Гипотеза была проверена, наблюдатель ДПТ НВ настроен с помощью генетического алгоритма на заведомо заниженных параметрах схемы замещения ДПТ НВ, после чего повторно вычислена ошибка оценивания (2) в зависимости от изменения электрических параметров схемы замещения ДПТ НВ (цветная поверхность) (рис. 1).

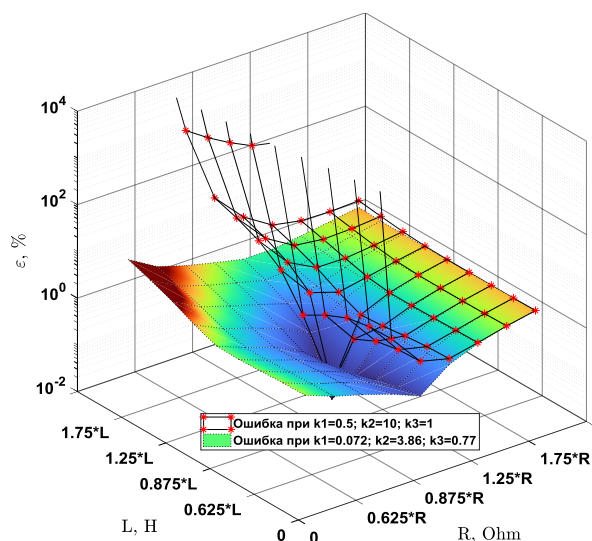


Рис. 1. График зависимости ошибки оценивания наблюдателем полного порядка угловой скорости вращения вала ДПТ НВ при изменении параметров наблюдателя при масштабирующих коэффициентах $k_1 = 0,5$, $k_2 = 10$, $k_3 = 1$ и $k_1 = 0,072$, $k_2 = 3,86$, $k_3 = 0,77$

Fig. 1. Graph of an error in the observer estimation of a full order of direct current motor rotation angular velocity depending on the change in the observer parameters with scaling factors $k_1 = 0,5$, $k_2 = 10$, $k_3 = 1$ and $k_1 = 0,072$, $k_2 = 3,86$, $k_3 = 0,77$

При заново настроенных масштабирующих коэффициентах наблюдателя ошибка оценивания угловой скорости вращения вала ДПТ НВ на исследуемом диапазоне изменения электрических параметров схе-

мы замещения не превышает 3,5 %, что является приемлемым результатом, подтверждает выдвинутую гипотезу и обеспечивает параметрическую робастность настроенного наблюдателя.

Проведя анализ и интерпретацию представленных результатов и результатов промежуточных исследований, была разработана методика настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка вектора переменных состояний электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности для обеспечения повышенной параметрической робастности. Потребляемая полная мощность принята в качестве критерия настройки наблюдателя – во-первых, потому, что при изменении какого-либо электрического параметра в электротехническом комплексе изменится потребляемая им активная, реактивная и полная мощность, а так как параметры в настраиваемой математической модели не изменяются, возникает невязка между показаниями потребляемой мощности объекта исследования и ее оценкой [21]. Во-вторых, потребляемая полная мощность содержит в себе информацию о всех входных воздействиях и откликах объекта исследования, что отсекает необходимость дальнейшего выбора критерия настройки наблюдателя.

Основные этапы методики:

- 1) произвести процедуру оценивания параметров схемы замещения (рис. 2) электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»;
- 2) ввести оцененные параметры в разработанный наблюдатель (1) и снизить их в 0,9 раз;
- 3) сформировать функционал ошибки на основе модуля разности между вычисленной полной потребляемой электротехническим комплексом «кабельная линия – асинхронный двигатель» мощностью и ее оценкой наблюдателем;
- 4) используя генетический алгоритм [21], минимизировать функционал ошибки и определить масштабирующие коэффициенты наблюдателя;
- 5) ввести найденные масштабирующие коэффициенты в наблюдатель (1) и вернуть оцененные параметры схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» к номинальным значениям;
- 6) контролировать невязку между вычисленной и оцененной полной потребляемой мощностью. Если ошибка оценивания полной потребляемой мощности более чем 25 %, произвести повторную оценку параметров схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» и ввести их в наблюдатель (1).

Процедура настройки наблюдателя полного порядка на основе баланса потребляемой мощности

Схема процедуры настройки наблюдателя полного порядка на основе баланса потребляемой мощности приведена на рис. 3.

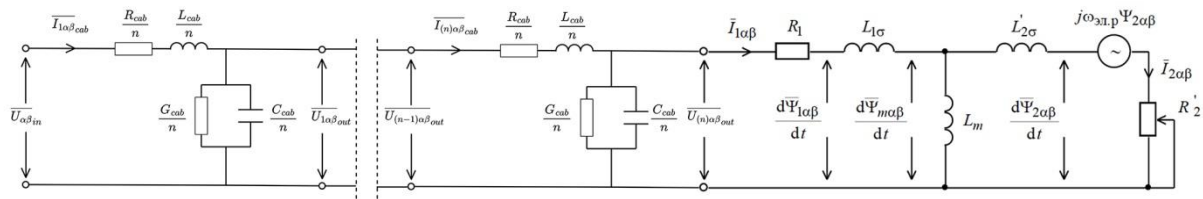


Рис. 2. Схема замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» с редуцированной математической моделью кабельной линии

Fig. 2. Replacement scheme of the electrical complex «cable line – induction motor» with a reduced model of a cable line

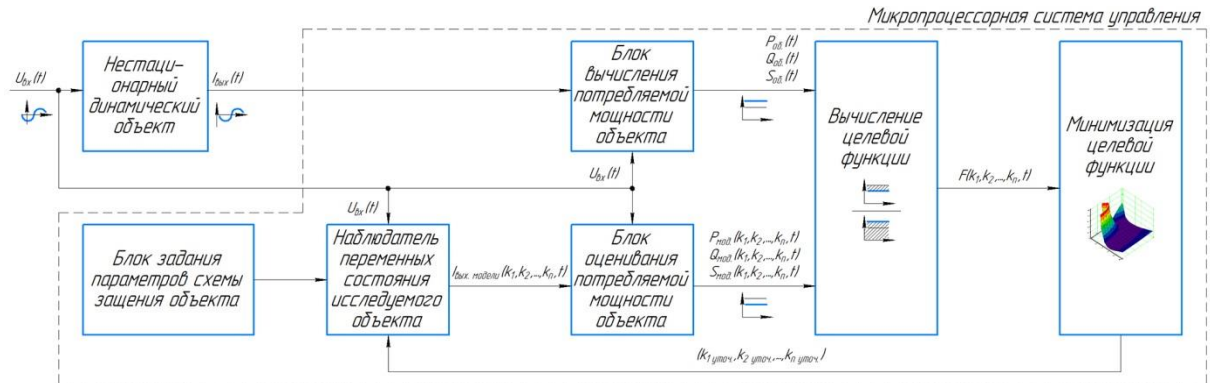


Рис. 3. Схема процедуры настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка на основе баланса потребляемой мощности

Fig. 3. Scheme of adjusting scaling factors of a full-order observer based on power consumption balance

Основной алгоритм действий по настройке масштабирующих коэффициентов наблюдателя заключается в том, что на нестационарный динамический объект подается входное напряжение, откликом объекта является ток. Записанные значения тока и напряжения передаются в микропроцессорную систему управления. После этого на наблюдатель полного порядка вектора переменных состояния подается входное воздействие в виде значений зафиксированного ранее напряжения, откликом наблюдателя является оценка потребляемого нестационарным объектом тока. После того как зафиксировано напряжение, получен отклик объекта и оценка отклика наблюдателем, данные передаются на блоки вычисления и оценивания потребляемой полной мощности объекта [21]. Для вычисления активной и реактивной потребляемой мощности объекта исследования без использования фазометра необходимо перевести зафиксированное напряжение и токи из трехфазной системы в двухфазную $\alpha\beta$ по формуле (3).

$$\begin{aligned} U_{\alpha}(t) &= U_A(t); \\ U_{\beta}(t) &= \frac{U_B(t) - U_C(t)}{\sqrt{3}}; \\ I_{\alpha}(t) &= I_A(t); \\ I_{\beta}(t) &= \frac{I_B(t) - I_C(t)}{\sqrt{3}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $I_{\alpha}(t)$ – проекция результирующего вектора тока по оси α ; $U_{\alpha}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения по оси α ; $I_{\beta}(t)$ – проекция результирующего вектора тока по оси β ; $U_{\beta}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения по оси β .

Затем путем скалярного и векторного [21] произведения масштабированных векторов для объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{I_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{I_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right)$, для модели объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{I_{\alpha}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}}, \frac{I_{\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right)$, заданных координатами в ортогональном базисе, необходимо вычислить активную (4) и реактивную мощность (5), соответственно, после чего вычисляется полная мощность (6)

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= m \left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}} + \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}} \right); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= m \left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}} - \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= \sqrt{\left(\hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) \right)^2 + \left(\hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) \right)^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где m – количество фаз, ед.

Следующим шагом вычисляется невязка между вычисленной и оцененной полной потребляемой мощностью объекта. Для описания невязки между экспериментальными и модельными значениями составляется целевая функция с позиции метода наименьших модулей. Обобщенная запись целевой функции представлена в (7)

$$\begin{aligned} F(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n) &= \\ &= \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)| dt, \end{aligned} \quad (7)$$

где $S(t)$ – полная потребляемая мощность объекта исследования; $S_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)$ – оценка полной потребляемой мощности модели объекта исследования; $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n$ – искомые значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя динамического объекта.

Сформированная целевая функция передается на блок минимизации. После минимизации целевой функции в этом блоке оцененные масштабирующие коэффициенты передаются на наблюдатель полного порядка вектора переменных состояния объекта исследования для вычисления ошибки оценивания полной потребляемой мощности.

Общая задача многомерной минимизации формулируется следующим образом [23]: необходимо найти вектор параметров $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ таким образом, чтобы обеспечить минимизацию или максимизацию выбранной целевой функций

$$F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)] \rightarrow \min/\max,$$

определенную на n -мерном евклидовом пространстве $\mathbb{R}^n$ заданной ограничениями области

$$g(X) = [g_1(X), g_2(X), \dots, g_j(X)].$$

В качестве инструмента минимизации целевой функции в данной статье будет применяться генетический алгоритм [21, 24, 25] с ограничением поискового пространства. Подробное описание генетического алгоритма представлено в [21].

Описание экспериментальной установки для апробирования разработанного наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»

В данной статье для реализации наблюдателя переменных состояния предлагается выполнять измерение токов и напряжений на выходе ПТ УЭЦН, что позволит составить математические модели только НПК и ПЭД, а затем объединить их в общую систему. Так как собирать экспериментальную установку из НПК и ПЭД на текущем этапе исследования представляется экономически нецелесообразным, для проверки работоспособности будет использован полунатурный экспериментальный стенд. Внешний вид и схема стенда для апробации наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» представлены на рис. 4.

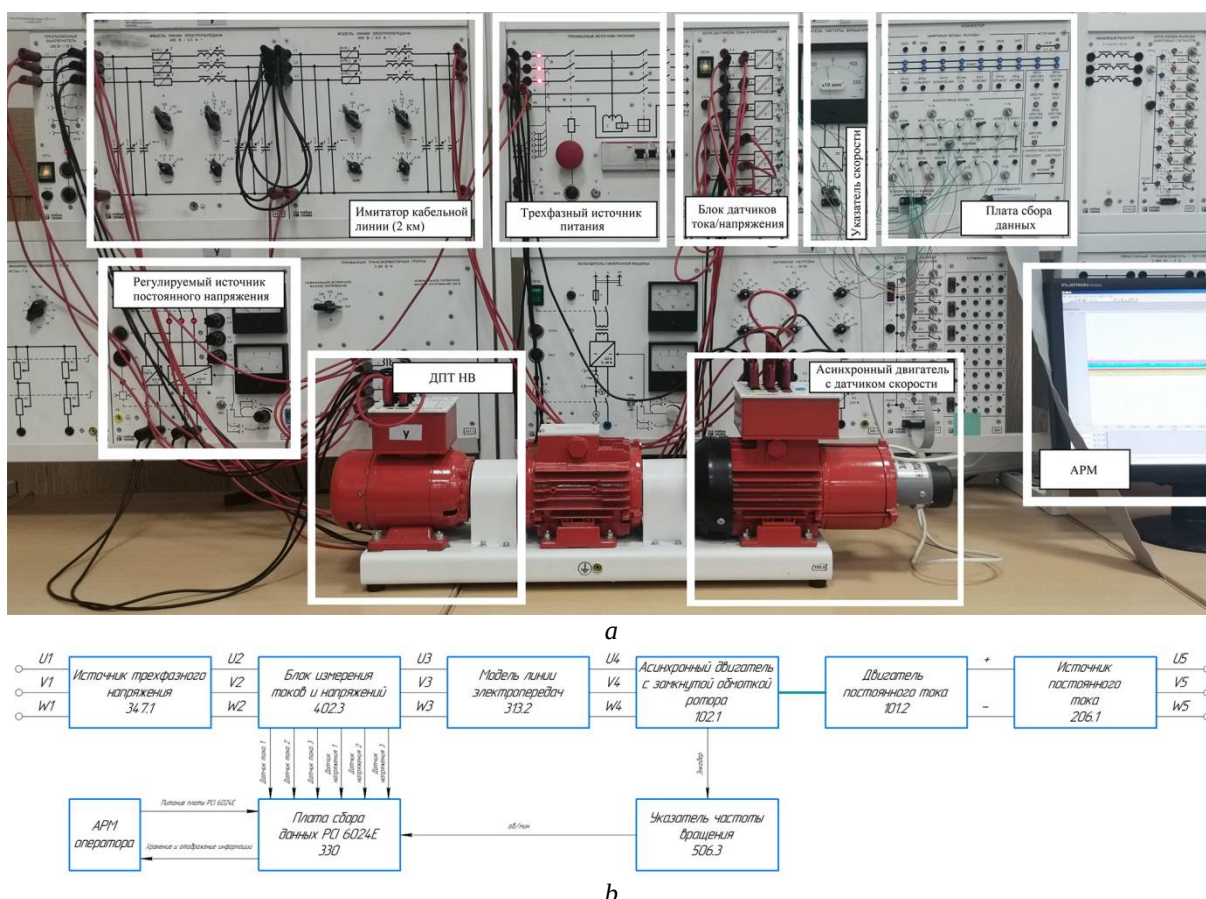


Рис. 4. Внешний вид (а) и схема (б) экспериментальной установки
 Fig. 4. Appearance (a) and scheme (b) of the experimental installation

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из источника питания, блока датчиков тока/напряжения, платы сбора данных, двух блоков модели кабельной

линии, имитирующих кабель длиной 2 км, асинхронного двигателя (табл. 1), двигателя постоянного тока

(табл. 1), регулируемого источника постоянного напряжения и датчика угловой скорости вращения.

Таблица 1. Параметры экспериментального АД и двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Table 1. Parameters of an experimental induction motor and a separately excited direct current (DC) motor with independent excitation

Параметры асинхронного двигателя/Induction motor parameters						
$P_{ном}, Вт$ $P_{пот}, W$	$n_{синх}, об/мин$ $n_{синх}, rpm/min$	$n_{ном}, об/мин$ $n_{пот}, rpm/min$	$I_{ном}, А$ $I_{пот}, A$	$\eta_{ном}, \%$ $\eta_{пот}, \%$	$\cos \varphi_{ном}, о.е.$ $\cos \varphi_{пот}, p.u.$	
30	1500	1250	0,35	36	0,73	
Параметры двигателя постоянного тока/DC Motor Parameters						
$P_{ном}, Вт$ $P_{пот}, W$	$n_{синх}, об/мин$ $n_{синх}, rpm/min$	$U_{ном}, В$ $U_{пот}, V$	$I_{ном}, А$ $I_{пот}, A$	$\eta_{ном}, \%$ $\eta_{пот}, \%$	$U_{возб}, В$ $U_{экс}, V$	$I_{возб}, А$ $I_{экс}, A$
90	1500	220	0,56	57,2	220	0,2

Блок датчиков токов и напряжений содержит три измерительных преобразователя «ток–напряжение» типа HMS 20-P и три измерительных преобразователя «напряжение–напряжение» типа LV 25-1000. Плата сбора данных использовалась PCI 6024E компании National Instruments. Информация о метрологических характеристиках датчиков и платы сбора данных представлена в [21].

Параметры схемы замещения экспериментальной установки представлены в табл. 2.

В результате проведения эксперимента были получены мгновенные значения токов, напряжений и угловой скорости вращения в режимах работы пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки/реверс/останов (рис. 5).

После проведения эксперимента и фиксации данных был произведен перевод экспериментальных трехфазных мгновенных значений напряжения и тока в двухфазную систему координат $\alpha\beta$ (3), а затем выполнен расчет потребляемой активной, реактивной и полной мощности (4)–(6).

Таблица 2. Оцененные параметры схемы замещения экспериментального электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»

Table 2. Estimated parameters of the conversion scheme of the experimental electrical complex «cable line – induction motor»

Параметр/Parameter	Оцененное значение/Estimated value
$\hat{R}_{каб}, Ом/\Omega$	118,94
$\hat{L}_{каб}, Гн/H$	0,60
$\hat{C}_{каб}, мкФ/\mu F$	0,32
$\hat{C}_{каб}, мкСм/\mu\Omega^{-1}$	36,78
$\hat{R}_1, Ом/\Omega$	39,77
$\hat{L}_{1\delta}, Гн/H$	0,04
$\hat{L}_m, Гн/H$	0,50
$\hat{R}'_2, Ом/\Omega$	46,69
$\hat{J}, кг \cdot м^2/kg \cdot m^2$	0,01

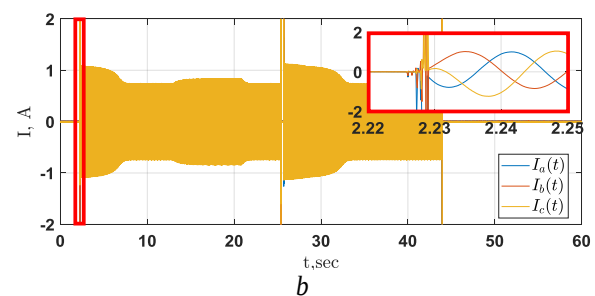
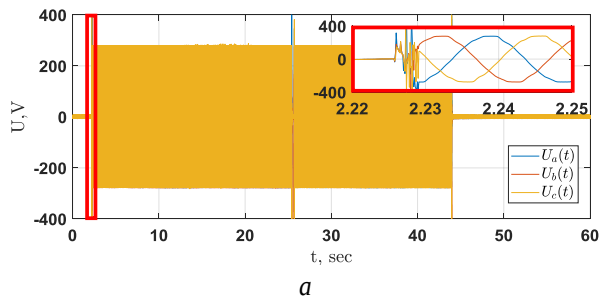


Рис. 5. Экспериментальные значения напряжения (а) и тока (б) в режимах работы пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки/реверс/останов

Fig. 5. Experimental values of voltage (a) and current (b) in operating modes: start/load surge/load dump/reverse/stop

Результаты расчетов

После вычисления экспериментального значения потребляемой полной мощности и первоначальной оценки потребляемой мощности наблюдателем электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» была сформирована целевая функция (8)

$$F(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4)| dt, \quad (8)$$

где $S(t)$ – полная потребляемая мощность электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»; $S_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \dots, \hat{k}_n)$ – оценка полной потребляемой мощности электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двига-

тель»; $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4$ – искомые значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Затем проведена оптимизация целевой функции с помощью генетического алгоритма. В результате процесса минимизации целевой функции (8) был получен итерационный процесс процедуры минимизации (рис. 6).

Сведем оцененные значения масштабирующих коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4 в табл. 3 и вычислим ошибку оценивания сигнала угловой скорости вращения (2).

Проследим на рис. 7, как оценивается сигнал угловой скорости вращения ротора АД при использовании найденных масштабирующих коэффициентов.

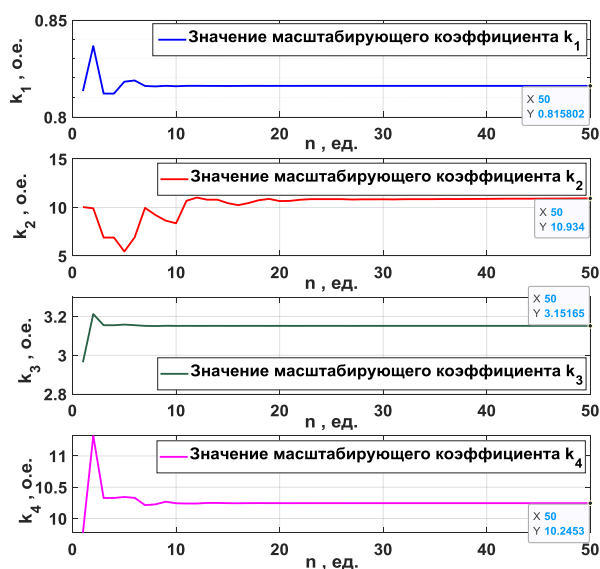


Рис. 6. Итерационный процесс минимизации целевой функции для определения значений масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»

Fig. 6. Iterative process of minimizing the objective function for determining the values of scaling coefficients of the observer of the full order of the electrical complex «cable line – induction motor»

Для проверки гипотезы параметрической робастности настроенного наблюдателя был проведен полный факторный анализ 256 комбинаций электрических параметров схемы замещения экспериментального электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» в диапазоне измене-

ния от 0,9 до 1,1 номинальных значений электрических параметров. Основные результаты представлены в табл. 4 и на рис. 8. Ошибка оценивания угловой скорости вращения вычислялась по (2). Ошибка оценивания полной потребляемой мощности вычислялась по (9).

$$\varepsilon_S = \frac{\int_0^t |S(t) - \hat{S}_{\alpha\beta}(t, k_1, k_2, k_3, k_4)| dt}{\int_0^t |S(t)| dt} \cdot 100, \quad (9)$$

где $S(t)$ – полная потребляемая мощность электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»; $\hat{S}_{\alpha\beta}(t, k_1, k_2, k_3, k_4)$ – оценка полной потребляемой мощности электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель»; k_1, k_2, k_3, k_4 – найденные значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Таблица 3. Значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка и ошибка оценивания наблюдателем угловой скорости вращения ротора АД при найденных коэффициентах

Table 3. Values of scaling coefficients of the full order observer and an error in the observer estimation of IM rotor rotation angular velocity with the found coefficients

Масштабирующий коэффициент, о.е. Scale factor, p.u.	Значение Value	Ошибка оценивания угловой скорости вращения Error in estimating rotation angular velocity	Значение Value
k_1	0,815	$\varepsilon_{\omega}, \%$	11,37
k_2	10,934		
k_3	3,151		
k_4	10,245	$\varepsilon_{\omega}, \%$ на участке 5–25 с at the work site 5–25 sec	4,51

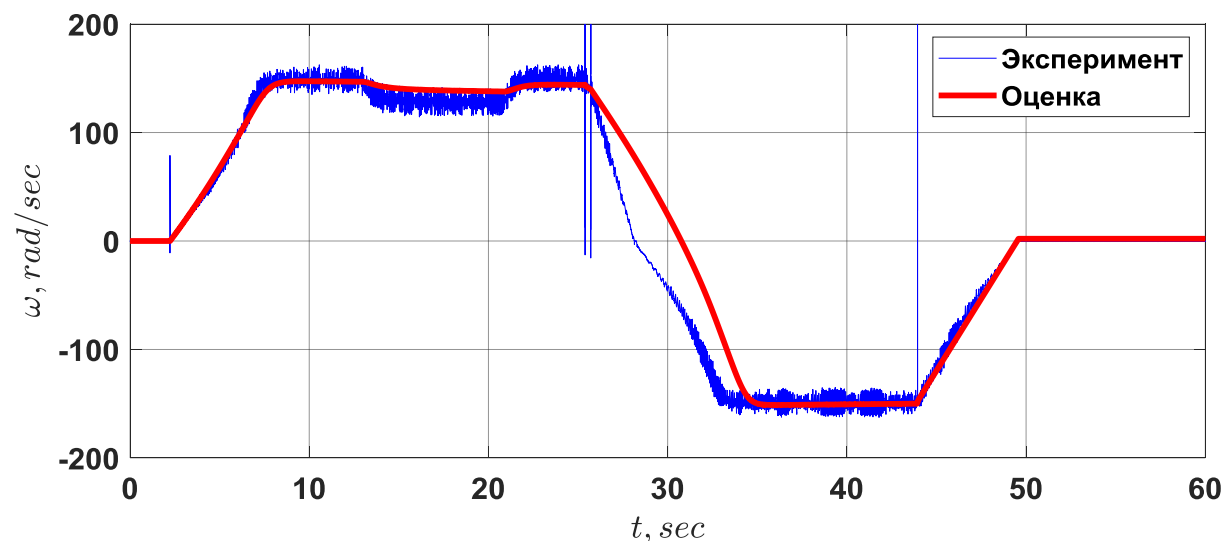


Рис. 7. Экспериментальный и оцененный сигнал угловой скорости вращения ротора АД, подключенного к источнику питания через кабельную линию

Fig. 7. Experimental and estimated signal of the angular velocity of rotation of the IM rotor connected to a power source via a cable line

Таблица 4. Сводная таблица ошибки оценивания угловой скорости вращения и полной потребляемой мощности при изменении электрических параметров (изменение параметров кодируется в бинарном виде) и масштабирующих коэффициентах $k_1 = 0,815$, $k_2 = 10,934$, $k_3 = 3,151$, $k_4 = 10,245$

Table 4. Summary table of errors in estimating rotation angular velocity and total power consumption when changing electrical parameters (parameter changes are encoded in binary form) and scaling coefficients $k_1 = 0,815$, $k_2 = 10,934$, $k_3 = 3,151$, $k_4 = 10,245$

№	Величина изменения электрического параметра от номинального, о. е. Changes in the electrical parameter from the nominal, p. u.								ε_s	ε_ω
	$R_{\text{каб}}$	$L_{\text{каб}}$	$C_{\text{каб}}$	$G_{\text{каб}}$	R_1	R_2	$L_{1\sigma}$	L_m	%	
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	16,15	6,13
17	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	16,56	5,22
34	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	6,13	6,62
51	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	6,88	6,53
68	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	20,75	5,75
85	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	21,20	5,71
102	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	6,47	6,41
119	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	6,51	6,78
136	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	16,77	8,08
153	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	17,24	7,12
170	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	1,1	0,9	6,09	4,96
187	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	6,63	5,17
204	1,1	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	20,21	9,20
221	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	20,16	9,22
238	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	0,9	6,86	7,07
255	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	6,85	7,35



Рис. 8. Результаты полного факторного эксперимента при исследовании ошибки оценивания угловой скорости вращения АД (красная) и полной потребляемой мощности (синяя) при изменении параметров на участке работы 5–25 с

Fig. 8. Results of a full-factor experiment when studying an error in estimating the angular velocity of IM rotation (red) and the total power consumption (blue) when changing the parameters at the work site for 5–25 sec

Как видно из табл. 4 и рис. 8, полный факторный анализ позволил исследовать каждую комбинацию всех электромагнитных параметров и экспериментально подтвердить работоспособность наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» и разработанной методики настройки масштабирующих коэффициентов для обеспечения повышенной параметрической робастности. В результате анализа выявлено, что максимальная ошибка оценивания угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя на установившемся участке работы не превышает 10 %, а ошибка оценивания полной потребляемой мощности не превышает 25 %.

Обсуждение результатов

В результате разработки наблюдателя, математическое описание которого представлено в (1), удалось

косвенно, только на основании измерения токов и напряжений на входе кабельной линии, оценить угловую скорость вращения вала АД в составе экспериментальной установки. Ошибка оценивания на участке работы от 0 до 60 секунд составила 11,37 %. Основной вклад в эту ошибку внес промежуток от 25 до 32 секунд, на котором происходил реверс вращения АД. Однако на участке работы от 5 до 25 секунд (пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки) ошибка оценивания составляет 4,51 %, что является приемлемым результатом. Проводя анализ причин неверной оценки угловой скорости вращения на участке «реверс», коллектив авторов пришел к выводу, что такая ошибка появляется из-за смены «фазировки» питающей сети, что приводит к увеличению магнитных потерь (перемagnичивание, вихревые токи) на реактивных компонентах кабельной линии и АД. А так как в математи-

ческом ядре наблюдателя не учитываются магнитные потери в кабеле и АД, это, в свою очередь, приводит к неверной оценке тока, потокосцепления, момента и угловой скорости вращения ротора АД. В дальнейшем необходимо уточнять ядро наблюдателя для учета данных процессов либо реализовывать перенастраиваемую структуру наблюдателя, которая позволит с необходимой точностью оценивать угловую скорость вращения в режиме работы «реверс». Необходимость правильной оценки угловой скорости в режиме «реверс» в привязке к УЭЦН обусловлена тем, что такой режим используется во многих алгоритмах расклинивания насоса. Некорректная оценка угловой скорости и момента на валу электродвигателя при расклинивании насоса способна, в крайнем случае, привести к обрыву компоновки насоса и ее «полету» на забой скважины.

Апробирование разработанного наблюдателя на робастность происходило при помощи проведения полного факторного эксперимента для восьми факторов. В результате проведения 256 опытов была вычислена ошибка оценивания угловой скорости вращения и потребляемой полной мощности на участке работы от 5 до 25 секунд. Максимальная ошибка оценивания составила 9,22 % для угловой скорости вращения и 24,00 % для потребляемой полной мощности. Такие результаты говорят о том, что настроенный по предложенной авторами методике наблюдатель обладает свойствами робастности в указанном диапазоне изменения параметров схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель».

Заключение

1. Разработана методика настройки масштабирующих коэффициентов в наблюдателе полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса. Основная идея заключается в том, что в процессе минимизации целевой функции $F(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4)$ и поиска значений масштабирующих коэффициентов $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4$ наблюдателя полного порядка необходимо заведомо занижить оцененные параметры схемы замещения $R_{\text{каб}}, L_{\text{каб}}, C_{\text{каб}}, G_{\text{каб}}, R_1, L_{1\delta}, L_m, R'_2, J$ электротехнического комплекса «кабельная линия –

асинхронный двигатель» в 0,9 раз. Разработанная методика настройки масштабирующих коэффициентов обеспечила работоспособность наблюдателя при изменении каждого электромагнитного параметра исследуемого комплекса на 10 % в большую и меньшую сторону.

2. Разработан наблюдатель полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления вектора переменных состояния электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», отличающийся от известных тем, что кабельная линия представлена редуцированной моделью с сосредоточенными параметрами. Даны рекомендации по определению количества звеньев редуцированной математической модели кабельной линии. Обеспечена погрешность оценивания угловой скорости вращения на участке «пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки» менее 5 %.
3. Проведен полный факторный эксперимент для восьми факторов. Выполнено $2^8=256$ опытов, по результатам которых выявлено, что при любой комбинации значений электрических параметров схемы замещения электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», изменённых в диапазоне от 0,9 до 1,1 от номинальных значений, наблюдатель оценивает угловую скорость вращения на таком участке с погрешностью не более 10 %. На основании данных, полученных в ходе полного факторного эксперимента, можно сделать вывод о том, что методика настройки масштабирующих коэффициентов разработанного наблюдателя вектора переменных состояния электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель», представленная в данной статье, позволяет обеспечить параметрическую робастность оценки вектора переменных состояния.

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»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 19.05.2023).
2. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (дата обращения 17.05.2022).
3. Общая дискуссия по приоритету: выступления академиков РАН А.Э. Конторовича, С.П. Филиппова, С.В. Алексеенко, В.И. Бухтиярова, С.М. Алдошина / А.Э. Конторович, С.П. Филиппов, С.В. Алексеенко, В.И. Бухтияров, С.М. Алдошин // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 4. – С. 343–347. DOI: 10.31857/S0869-5873894343-347
4. 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.
5. Исаев Ю.Н., Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов корреляционного анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 224–239.
6. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Сенько В.В. Управление ресурсами и жизненными циклами погружного электрооборудования нефтедобычи на основе технической диагностики и динамики изменения его текущего состояния // Изв. вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 4–5. – С. 46–52. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-46-52.

7. О некоторых перспективных путях развития УЭЦН / В.Н. Ивановский, Ю.А. Сазонов, А.А. Сабиров, Н.Н. Соколов, Ю.А. Донской // Территория нефтегаз. – 2008. – № 5. – С. 24–33.
8. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачева, 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
9. Антипин М.Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО «Самотлорнефтегаз» // ПТНЖ «Инженерная практика». – 2011. – № 5. – С. 74–80.
10. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submersible 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: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-4-92-96>
11. 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/RTUON53541.2021.9711743.
12. 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.
13. Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
14. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable / Y. Deng, Z. Liang, P. Xia et al. // J. Electr. Eng. Technol. – 2019. – V. 14. – P. 219–229. URL: <https://doi.org/10.1007/s42835-018-00023-7> (дата обращения 19.05.2023).
15. ESP pump flow rate estimation and control: United States patent US 2017/0045055. 2017 Feb 16.
16. Vector control PWM-VSI induction motor drive with a long motor feeder: performance analysis of line filter networks / A.K. Abdelsalam, M.I. Masoud, S.J. Finney, B.W. Williams // IET Electr Power. – Jun. 2011. – V. 5. – № 5. – P. 443–456.
17. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications / J. Liu, J. Dai, S. Royak, P. Schmidt, E. Al-nabi, T. Nondahl // 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. – Tampa, FL, USA, 2017. – P. 578–584. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930752.
18. Liang X., Kar N.C., Liu J. Load filter design method for medium-voltage drive applications in electrical submersible pump systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – May–June 2015. – V. 51. – № 3. – P. 2017–2029. DOI: 10.1109/TIA.2014.2369814.
19. Influence of motor cable on common-mode currents in an inverter-fed motor drive system / Pk. Xie, Jz. Lu, Gz. Chen et al. // Frontiers Inf Technol Electronic Eng. – 2018. – V. 19. – P. 273–284. URL: <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601518> (дата обращения 19.05.2023).
20. 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.
21. Раков И.В. Динамическая идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19. – № 1. – С. 24–48. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48.
22. Debabrata P. Observers design and implementation for DC motor // International Journal of Science and Research. – 2016 – V. 5. – P. 1232–1235.
23. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – СПб.: Лань, 2021. – 512 с.
24. Chaudhary R., Sanghavi R., Mahagaokar S. Optimization of Induction motor using genetic algorithm and GUI of optimal induction motor design in MATLAB // Advances in Systems, Control and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2018 – V. 442. – P. 127–132. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4762-6_12 (дата обращения 19.05.2023).
25. Elgbaily M., Anayi F., Packianather M. Genetic and particle swarm optimization algorithms based direct torque control for torque ripple attenuation of induction motor // Materials Today: Proceedings. – 2022. – V. 67. – № 4. – P. 577–590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.293> (дата обращения 19.05.2023).

Поступила: 24.08.2023 г.

Прошла рецензирование: 25.09.2023 г.

Информация об авторах

Раков И.В., инженер 1 категории, ООО «Газпром трансгаз Томск».

Глазырин А.С., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Политехнической школы Югорского государственного университета.

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

UDC 621.315.2.016.2:621.313.333.2

DEVELOPMENT AND CONFIGURATION OF A FULL-ORDER OBSERVER FOR «CABLE LINE – INDUCTION MOTOR» ELECTRICAL COMPLEX

Ivan V. Rakov¹,
rakovivan@live.com

Alexander S. Glazyrin^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Sergey N. Kladiev²,
kladiev@tpu.ru

¹ Gazprom transgaz Tomsk LLC,
9, Frunze avenue, Tomsk, 634029, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

The relevance. The task of oil production specialists is to minimize all types of energy consumption, ensuring an increase in oil production profitability because of the following reasons. First of all, availability of oil reserves with low energy consumption decreases, and the number of gushing wells reduces, along with increase in water content in the extracted liquid. One of the methods of reducing energy consumption in wells with low and moderate flow rate, equipped with electric submersible pumps, is a well transfer from continuous to periodic operation mode, namely cyclic well operation. This involves alternating short periods of oil production (up to 15 minutes) with liquid accumulation (up to 30 minutes) in the wellbore. Well switching to a cyclic operation mode leads to a 40 % reduction in electric power consumption by the submersible electric motor, as well as increase in oil production up to 3 %. This can be achieved by partial gravitational separation of the extracted liquid at the accumulation stage. However, a negative consequence of switching to a cyclic operation mode is a reduction in an average time between failures. This is due to increase in current surges and torque during rapid acceleration of the submersible electric motor to the rated speed. Transition from a scalar control system with an open loop to a vector control system without sensors can settle these problems. To implement a vector control system, it is necessary to obtain information about the state variables of a submersible electric motor. Construction of a full-order observer based on explicit mathematical models is considered as a promising method of obtaining information, taking into account the main advantages and disadvantages of direct measurement and indirect estimation of state variables. Based on the above, the urgent task is to develop a full-cycle observer for the electromechanical complex «cable line – induction motor» and a methodology for its configuration. The settlement of this issue will create prerequisites for implementation of a vector control system by a submersible electric motor.

The main aim: to develop and experimentally validate the effectiveness of a full-order observer for the electrical complex «cable line – induction motor» using voltage and current measurements at a cable line input.

Methods: literature analysis, system analysis, mathematical modeling, experimental research.

Results. The authors have developed and tested a full-order observer for the «cable line – induction motor» electrical complex. The results of this study confirm the efficiency of the developed observer and its potential applicability for implementing a vector control system for electric submersible pumps. Ultimately, this will enable the transition of low- and medium-flow-rate oil wells to a cyclically operated mode without a significant reduction of the mean time between failures.

Key words:

full-order observer, electromechanical complex, cable line, induction motor, experimental workbench testing, observer tuning methodology, genetic algorithm, observer adjustment, control system, electric submersible pump, cyclic well operation, periodic well operation, mean time between failures, low- and moderate-flow wells, stochastic nature of electrical energy consumption.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no. FENG-2023-0001 «Predictive control of energy flows of electricity generating complexes in the Arctic and the Far North, with stochastic patterns of consumption and generation of electrical energy: theory, synthesis, experiment»).

REFERENCES

1. *Informatsionno pravovoy material «O merakh po povysheniyu nefteotdachi plastov na period do 2035 goda» v Komitet Soveta Federatsii Rossii po ekonomicheskoy politike* [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]. Available at: <http://council.gov.ru/media/files/VGdL7GEAXLLocKmDf9tiKPD8fS0xuyQA.pdf> (accessed 19 May 2023).
2. *Prognoz dolgosrochnogo sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya RF na period do 2030 goda* [Forecast of the long-term socioeconomic development of the Russian Federation for the period up to 2030]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (accessed 12 May 2023).
3. Kontorovich A.E., Filippov S.P., Alekseenko S.V., Bukhtiyarov V.I., Aldoshin S.M. Discussion on the priority: speech of the RAS academicians A.E.Kontorovich, S.P. Filippov, S.V. Alekseenko, V.I. Bukhtiyarov, S.M. Aldoshin. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 4, pp. 343–347. In Rus. DOI: 10.31857/S0869-5873894343-347

4. 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. 8, pp. 220–231. In Rus.
5. Isaev Y.N., Arkhipova O.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Adaptive short-term forecasting of electricity consumption by autonomous power systems of small northern settlements based on correlation analysis methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 224–239. In Rus.
6. Romanov V.S., Goldstein V.G., Senko V.V. Resource and lifecycle management of submersible electrical equipment for oil production based on technical diagnostics and the dynamics of changes in its current state. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2021, vol. 64, no. 4–5, pp. 46–52. In Rus. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-46-52
7. Ivanovskiy V.N., Sazonov Yu.A., Sabirov A.A., Sokolov N.N., Donskoy Yu.A. O nekotorykh perspektivnykh putyakh razvitiya UECN [On some potential ways of ESP development]. *Territoriya neftegaz*, 2008, no. 5, pp. 24–33.
8. 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 Rus. DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58>
9. Antipin M.N. Resultaty vnedreniya tsiklicheskoj ekspluatatsii UETS v OAO «Samotorneftegaz» [Results of introduction of the electrical submersible cyclic operation pump units on JSC «Samotorneftegaz»]. *Innovatsii i novye tehnologii v oblasti mekhanizirovannoy dobychi nefti*, 2011, no. 5, pp. 74–81.
10. Pashali A.A., Khalifin 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 submersible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian). *OIJ*, 2021, pp. 92–96. DOI: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-4-92-96>
11. Iudin R., Petrochenkov A., Krause B., Solodkiy E., Panchenko G. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing. *2021 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.
12. 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.
13. Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. pp. 1–7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
14. Deng Y., Liang Z., Xia P. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable. *J. Electr. Eng. Technol.*, 2019, vol. 14, pp. 219–229. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42835-018-00023-7> (accessed 19 May 2023).
15. Hoefel A., Rendusara D. *ESP pump flow rate estimation and control*. United States patent US 2017/0045055, 2017 Feb 16.
16. Abdelsalam A.K., Masoud M.I., Finney S.J., Williams B.W. Vector control PWM-VSI induction motor drive with a long motor feeder: performance analysis of line filter networks. *IET Electr. Power*, Jun. 2011, vol. 5, no. 5, pp. 443–456.
17. Liu J., Dai J., Royak S., Schmidt P., Al-nabi E., Nondahl T. Design and implementation of position sensorless starting control in industrial drives with output filter and transformer for oil/pump applications. *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Tampa, FL, USA, 2017. pp. 578–584. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930752.
18. Liang X., Kar N.C., Liu J. Load filter design method for medium-voltage drive applications in electrical submersible pump systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, May–June 2015, vol. 51, no. 3, pp. 2017–2029. DOI: 10.1109/TIA.2014.2369814.
19. Xie Pk., Lu Jz., Chen Gz. Influence of motor cable on common-mode currents in an inverter-fed motor drive system. *Frontiers Inf Technol Electronic Eng*, 2018, vol. 19, pp. 273–284. Available at: <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601518> (accessed 19 May 2023).
20. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Philipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167.
21. Rakov I.V. Dynamic estimation parameters of the elimination circuit of induction motor on the basis of instant full power balance in a steady-state mode. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, vol. 19, no. 1, pp. 24–48. In Rus. DOI: <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48>.
22. Debabrata P. Observers design and implementation for DC motor. *International Journal of Science and Research*, 2016, vol. 5, pp. 1232–1235.
23. Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and tasks]. St Petersburg, Lan Publ., 2021. 512 p.
24. Chaudhary R., Sanghavi R., Mahagaokar S. Optimization of induction motor using genetic algorithm and GUI of optimal induction motor design in MATLAB. *Advances in Systems, Control and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2018, vol. 442, pp. 127–132. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4762-6_12 (accessed 19 May 2023).
25. Elgbaily M., Anayi F., Packianather M. Genetic and particle swarm optimization algorithms based direct torque control for torque ripple attenuation of induction motor. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 577–590. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.293> (accessed 19 May 2023).

Received: 24 August 2023.

Reviewed: 25 September 2023.

Information about the authors

Ivan V. Rakov, 1 category engineer, Limited Liability Company «Gazprom transgaz Tomsk».

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yuga State University.

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