

УДК 621.3

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ С ВНУТРИСКВАЖИННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Глазырин Александр Савельевич^{1,2},
asglazyrin@tpu.ru

Исаев Юсуп Ниязбекович¹,
isaev@tpu.ru

Копырин Владимир Анатольевич³,
kopyrinva@gmail.com

Тимошкин Вадим Владимирович¹,
timoshkinvv@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич¹,
kladiev@tpu.ru

Хамитов Рустам Нуриманович^{3,4},
apple_27@mail.ru

Ковалев Владимир Захарович^{2,1},
vz_kovalev@mail.ru

Лосев Федор Алексеевич³,
losevfa@tyuiu.ru

Леонов Андрей Петрович¹,
leonov_ap@tpu.ru

Попов Евгений Игоревич³,
popovei@tyuiu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

³ Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

⁴ Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Актуальность. В настоящее время при повсеместном усложнении технологических процессов для повышения эффективности производственных процессов за счет внедрения нового оборудования происходят конфликты между функциональными возможностями различных технических средств и их способностью функционировать с заданным качеством, в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам. В состав электротехнического комплекса для добычи нефти, под которым понимается совокупность наземного и погружного электрооборудования, скомпонованного для приема, трансформации, управления, преобразования электрической энергии в механическую и передачи её погружному насосу, входят различные электротехнические и электронные устройства: станция управления с преобразователем частоты, повышающий трансформатор, кабельная линия, погружной электродвигатель, внутрискважинный компенсатор реактивной мощности и другие устройства. Любое изменение компоновки электротехнических комплексов для добычи нефти или технических характеристик используемого оборудования требует тщательного исследования переходных процессов между режимами работы электрооборудования для предотвращения рисков ложного срабатывания устройств защиты электротехнического оборудования.

Цель: анализ переходных процессов в электротехническом комплексе добывающей скважины с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности при отключении источника питания с целью предупреждения рисков ложного срабатывания устройств защиты компенсатора.

Объект: участок системы электроснабжения куста нефтедобывающих скважин, оснащенных установками электроцентробежных насосов с внутрискважинными компенсаторами реактивной мощности.

Методы: использованы положения теоретических основ электротехники, теории электропривода, теория дифференциальных уравнений, численные методы.

Результаты. Разработана математическая модель электротехнического комплекса установки электроприводного центробежного насоса с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности, позволяющая исследовать переходные процессы в режиме пуска и остановки погружного асинхронного электродвигателя. Получены характеристики переходных процессов в элементах электротехнического комплекса установки электроприводного центробежного насоса при включении и отключении источника питания. Установлено, что максимальный бросок тока во внутрискважинном компенсаторе реактивной мощности составляет 2,56 раза при принятых в исследовании параметрах электротехнического комплекса добывающей скважины. Предложены мероприятия по снижению количества ложных срабатываний устройств защиты.

Ключевые слова:

внутрискважинный компенсатор, переходные процессы, погружной электроцентробежный насос, погружной электродвигатель, математическая модель.

Введение

В настоящее время снижение финансовых затрат на добычу нефти и увеличение конкурентоспособности нефтедобывающей промышленности являются

важными задачами, решение которых достигается путем повышения энергоэффективности процесса добычи. Суммарное потребление электроэнергии российскими предприятиями нефтегазовой отрасли в

2021 г. оценивается порядка 89,5 млрд кВт·ч, что составляет 8 % от общей выработки электрической энергии в нашей стране [1].

Основная доля потребления электроэнергии в процессе добычи нефти связана с подъемом пластовой жидкости, которая составляет от 55 до 62 % от общего потребления электроэнергии [2].

Основным потребителем электроэнергии в электротехническом комплексе (ЭТК) погружной установки добычи нефти является электродвигатель, который, в свою очередь, приводит во вращение вал электроприводного центробежного насоса. На сегодняшний день в составе ЭТК установки центробежного электронасоса (УЭЦН) применяются асинхронные или вентильные электродвигатели [3–5]. Широкое распространение получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, поскольку при одинаковых мощностных характеристиках имеют меньшую стоимость по сравнению с вентильными электродвигателями и высокую наработку на отказ порядка 790 суток. Тем не менее погружные асинхронные электродвигатели обладают существенным недостатком, а именно, низким коэффициентом мощности, который в номинальном режиме эксплуатации варьируется от 0,8 до 0,84. Низкий коэффициент мощности приводит к дополнительным потерям мощности в токопроводящих элементах ЭТК УЭЦН, достигающим до 40 % от суммарной потребляемой мощности. Далее в статье в качестве погружного электромеханического преобразователя энергии принята асинхронная электрическая машина с короткозамкнутым ротором.

С целью повышения коэффициента мощности и снижения потерь в ЭТК УЭЦН в 2018 г. на заводе ООО «Алмаз-нефтесервис» в г. Радужном при научно-техническом сопровождении авторов статьи и ООО «Научно-производственная компания «Техойл»» изготовлен опытный образец внутрискважинного компенсатора реактивной мощности (ВКРМ) (рис. 1). Изготовленный образец мощностью 53,5 кВАр предназначен для работы в составе погружной установки для добычи нефти, оснащенной двухсекционным погружным электродвигателем марки ЭД-125-117-М5В5 мощностью 125 кВт. В ходе стендовых испытаний опытного образца зафиксировано снижение тока погружного электродвигателя на 16 % – с 51 до 42,8 А. По результатам положительных стендовых испытаний принято решение о проведении опытно-промышленных испытаний.

На сегодняшний день изготовлено шесть опытных образцов ВКРМ мощностью 50, 53,5 и 80 кВАр. По результатам проведения стендовых испытаний зафиксировано снижение тока погружных асинхронных электродвигателей на 20 % и повышение коэффициента мощности с 0,8 до 0,95, согласно программе испытаний. В ходе мониторинга энергопотребления на испытываемых нефтедобывающих скважинах зафиксировано снижение тока УЭЦН от 14,5 до 20 % [6]. С целью снижения рисков преждевременной остановки УЭЦН при неисправности внутрискважинного компенсатора и высокой стоимости спускоподъемных

операций, проводимых в ходе ремонтно-восстановительных работ, последние три опытных образца оснащены устройствами защиты с функцией автоматического отключения.



Рис. 1. Опытный образец внутрискважинного компенсатора реактивной мощности

Fig. 1. Prototype of downhole reactive power compensator (DRPC)

Функция автоматического отключения ВКРМ реализована на базе электромеханического реле, которое позволяет отключить компенсатор при преждевременном выходе из строя конденсаторов, вследствие короткого замыкания или пробоя диэлектрика.

В ходе опытно-промышленных испытаний погружной установки с ВКРМ выявлено, что при отключении станции управления в некоторых случаях происходит ложное срабатывание электромеханического реле внутрискважинного компенсатора, вызванное токами разряда конденсаторов, которые превышают ток отстройки реле. Ток разряда определяется моментом отключения станции управления и амплитудой тока до коммутации. Ввиду конструктивных особенностей скважинного оборудования работа электромеханического реле реализована только на отключение и возможность его повторного включения отсутствует. Дальнейшее включение предполагает проведение спускоподъемных операций, что экономически нецелесообразно. В связи с этим исследование и разработка мероприятий, направленных на снижение случаев ложного срабатывания устройств защиты ВКРМ, являются актуальными.

Объект и методы исследования

Исследуемый участок электротехнического комплекса УЭЦН включает: источник питания (ИП), повышающий (питающий) трансформатор (Т), кабельную линию (КЛ), погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД) [7] и внутрискважинный компенсатор реактивной мощности (рис. 2).

В структуре ЭТК УЭЦН внутрискважинный компенсатор реактивной мощности является достаточно емким накопителем энергии. В момент, когда происходит отключение станции управления, сопротивление отключаемого участка цепи ЭТК УЭЦН опреде-

ляется сопротивлениями погружного электродвигателя, повышающего трансформатора, кабельной линии и внутрискважинного компенсатора. Характеристики

напряжения и тока переходного процесса в элементах комплекса определяются начальными условиями и параметрами элементов ЭТК УЭЦН.

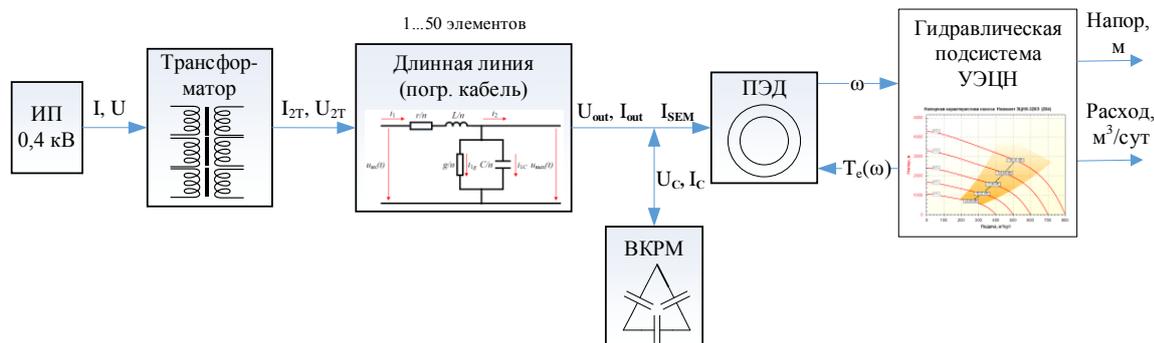


Рис. 2. Структурная схема исследуемого электротехнического комплекса УЭЦН

Fig. 2. Single-line diagram of the investigated electrical complex

При моделировании были приняты следующие допущения и упрощения [8–11]:

1. Параметры элементов ЭТК УЭЦН линейны, т. е. отсутствуют явления гистерезиса и насыщения.
2. Электрические цепи в трехфазных элементах ЭТК УЭЦН считаются симметричными.
3. Питание ЭТК УЭЦН осуществляется системой симметричных синусоидальных напряжений.
4. Питающий кабель по всей длине однороден, т. е. не учитывается соединение между отдельными секциями.
5. Воздушный зазор в расточке статора равномерен, поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие (т. е. без зубцов и пазов), отсутствуют эксцентриситеты расточки статора и поверхности ротора.
6. Реальная распределенная обмотка ПЭД заменяется сосредоточенной.
7. Поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие, намагничивающие силы обмоток и поля распределены вдоль окружности воздушного зазора синусоидально.
8. Пренебрегаем высшими пространственными гармониками магнитного поля.
9. Принимаем число витков обмоток статора и ротора одинаковым.

На сегодняшний день питание УЭЦН, как правило, осуществляется посредством станции управления с преобразователем частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Автономный инвертор напряжения работает в режиме широтно-импульсной модуляции. На выходе станции управления устанавливается синусный фильтр для подавления высокочастотных компонентов спектра напряжений [12, 13]. Коэффициент полезного действия современных станций управления находится в пределах от 0,95 до 0,98. Поэтому станцию управления в данном исследовании можно представить идеальным источником энергии без потерь мощности.

В электрических цепях, в которых элементы системы (статические нагрузки, статорные цепи электрических машин) трехфазные, с физической точки

зрения естественным является составление уравнений переходных процессов в неподвижной трехфазной системе координат А, В, С. В этом случае система напряжений имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2}U \begin{bmatrix} \sin(\omega \cdot t) \\ \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \end{bmatrix},$$

где U – действующее значения напряжения для каждой фазы источника питания; ω – угловая частота напряжения питания, $\omega = 2\pi f$; f – частота напряжения источника питания; t – время.

В качестве питающих трансформаторов УЭЦН, как правило, используются повышающие трехфазные двухобмоточные трансформаторы марки ТМПН со схемой соединения обмоток Y_n/Y_n-0 . В редких случаях используется схема соединения обмоток Y_n/Y_n-0 . При принятых допущениях для симметричных систем сумма потоков от каждой фазы равна нулю:

$$\bar{\Phi}_a + \bar{\Phi}_b + \bar{\Phi}_c = 0,$$

где $\bar{\Phi}_a, \bar{\Phi}_b, \bar{\Phi}_c$ – векторы магнитных потоков фазы А, В, С соответственно.

В конструкции трансформаторов ТМПН используется плоский стержневой магнитопровод, который обладает малой магнитной асимметрией и приводит к несимметрии намагничивающих токов. Тем не менее из-за малости токов намагничивания в сравнении с токами нагрузки данную несимметрию можно не учитывать. Принятое допущение незначительно влияет на определение симметричных переходных процессов, к которым относится отключение источника питания. В этом случае трехфазный двухобмоточный трансформатор можно представить тремя однофазными трансформаторами [11, 13–15]. Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа в матричной форме с учетом принятых допущений:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{i}_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ – субматрицы напряжений и токов; $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ – субматрицы сопротивлений.

Здесь $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ – вектор-столбцы:

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} u_{11}(t) \\ -u_{12}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} u_{21}(t) \\ -u_{22}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_3 = \begin{bmatrix} u_{31}(t) \\ -u_{32}(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{i}_1 = \begin{bmatrix} i_{11}(t) \\ i_{12}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_2 = \begin{bmatrix} i_{21}(t) \\ i_{22}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_3 = \begin{bmatrix} i_{31}(t) \\ i_{32}(t) \end{bmatrix},$$

где u, i – мгновенные напряжения и токи первичной и вторичной обмоток эквивалентирующих однофазных трансформаторов соответственно.

Запишем выражения для входящих в уравнение (1) сложных матриц сопротивлений:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} r_{11} + \frac{d}{dt}L_{11} & -\frac{d}{dt}M_{1,12} \\ -\frac{d}{dt}M_{1,21} & r_{12} + \frac{d}{dt}L_{12} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} r_{21} + \frac{d}{dt}L_{21} & -\frac{d}{dt}M_{2,12} \\ -\frac{d}{dt}M_{2,21} & r_{22} + \frac{d}{dt}L_{22} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} r_{31} + \frac{d}{dt}L_{31} & -\frac{d}{dt}M_{3,12} \\ -\frac{d}{dt}M_{3,21} & r_{32} + \frac{d}{dt}L_{32} \end{bmatrix},$$

где r, L – активное сопротивление и полные индуктивности соответствующих обмоток; M – взаимная индуктивность первичной и вторичной обмоток соответствующих однофазных трансформаторов.

Полные индуктивности определяются суммой взаимной индуктивности обмоток M и взаимной индуктивностью рассеяния L_σ [11]:

$$L = M + L_\sigma.$$

Если принять, что реактивная составляющая тока холостого хода на порядок больше активной составляющей, то последней можно пренебречь. В этом случае взаимная индуктивность обмоток определяется по выражению:

$$M = \frac{\Psi_{0m}}{\sqrt{2}I_0} = \frac{w \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}I_0},$$

где Ψ_{0m}, Φ_m – амплитуда потокосцепления и магнитного потока соответственно; I_0 – действующее значение тока холостого хода; w – число витков обмотки трансформатора.

Индуктивности рассеяния обмоток определим следующим образом:

$$L_{\sigma 1} = \frac{\Psi_{\sigma 1}}{i_1 - i_0}, \quad L_{\sigma 2} = \frac{\Psi_{\sigma 2}}{i_2},$$

где $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток соответственно; i_0 – ток намагничивания; $\Psi_{\sigma 1}, \Psi_{\sigma 2}$ – потокосцепление первичной и вторичной обмоток.

Кабельная линия в электротехническом комплексе УЭЦН предназначена для передачи электрической энергии от питающего трансформатора к погружному

электродвигателю и внутрискважинному компенсатору реактивной мощности. Кабельная линия может быть представлена схемой замещения с распределенными или с сосредоточенными параметрами. В первом случае линия описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, во втором случае – обыкновенными дифференциальными уравнениями.

В работе [16] авторами предложен метод, позволяющий произвести замену кабельной линии с распределенными параметрами многозвенной схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Проведена оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля марки КПБК-90 3x16 на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики. Определено оптимальное количество звеньев редуцированной модели в количестве 50 каскадно-соединённых четырёхполюсников [17]. При этом ошибка в полученных данных не превышает 0,1 % по сравнению с эталонной моделью, представленной линией с распределёнными параметрами. Переход от модели кабельной линии с распределёнными параметрами к модели линии с сосредоточенными параметрами позволяет произвести расчет переходных процессов в ЭТК УЭЦН при изменении режимов работы и значительном снижении времени моделирования.

Запишем редуцированную математическую модель одной жилы ненагруженного кабеля в трехфазной системе координат в матричной форме [17]:

$$\mathbf{u}_{in} = \left(\mathbf{r} + \mathbf{L} \frac{d}{dt} \right) \mathbf{i}_{in} + \mathbf{u}_{out}, \quad (2)$$

$$\mathbf{i}_{in} = \left(\mathbf{C} \frac{d}{dt} + \mathbf{g} \right) \mathbf{u}_{out} + \mathbf{i}_{out}, \quad (3)$$

где $\mathbf{u}_{in}, \mathbf{u}_{out}$ – вектор-столбцы входных и выходных напряжений i -го звена схемы замещения кабельной линии; $\mathbf{i}_{in}, \mathbf{i}_{out}$ – вектор-столбцы входных и выходных токов i звена схемы замещения кабельной линии; i – количество звеньев, $i=1..n; n=50$; $\mathbf{r}, \mathbf{L}, \mathbf{C}, \mathbf{g}$ – диагональная матрица n -ого порядка активных сопротивлений токоведущих жил, индуктивность токоведущих жил, эквивалентная емкость фазы относительно двух других фаз и брони, проводимость изоляции соответственно.

Вектор-столбцы $\mathbf{u}_{in}, \mathbf{u}_{out}, \mathbf{i}_{in}, \mathbf{i}_{out}$:

$$\mathbf{u}_{in} = \begin{bmatrix} u_m(t) \\ u_i(t) \\ \vdots \\ u_{i-1}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_{out} = \begin{bmatrix} u_i(t) \\ u_{i-1}(t) \\ \vdots \\ u_{out}(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{i}_{in} = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ \vdots \\ i_i(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_{out} = \begin{bmatrix} i_2(t) \\ \vdots \\ i_{i+1}(t) \end{bmatrix},$$

где $u(t), i(t)$ – мгновенные напряжения и токи на входе и выходе i -го звена.

При принятых допущениях запишем выражения для входящих в уравнения (2) и (3) матриц параметров:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_i \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{L_{cab}}{n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{L_{cab}}{n} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L_{cab}}{n} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{C_{cab}}{n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{C_{cab}}{n} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{C_{cab}}{n} \end{bmatrix}, \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \frac{g_{cab}}{n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{g_{cab}}{n} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{g_{cab}}{n} \end{bmatrix},$$

где r_i – активное сопротивление токоведущих жил n -звена редуцированной модели кабельной линии; L_{cab} , C_{cab} , g_{cab} – индуктивность токоведущих жил, эквивалентная емкость фазы относительно двух других фаз и брони, проводимость изоляции кабельной линии соответственно.

На практике температура по глубине скважины непостоянна, что в свою очередь влияет на изменение активного сопротивления по длине кабельной линии. Если учесть, что n -звену редуцированной модели соответствует определенный участок кабельной линии вдоль скважины, то активное сопротивление токоведущих жил на данном участке предлагается определять по общеизвестному выражению [2]:

$$r_i = \rho \cdot \frac{l_i}{S_i} \cdot [1 + 0,004 \cdot (\bar{T}_i - 20)],$$

где ρ – удельное сопротивление проводника при температуре плюс 20 °С; $l_i = l_{cab}/n$ – длина i -го звена редуцированной модели; l_{cab} – длина кабельной линии; S_i – сечение токоведущей жилы i -го звена редуцированной модели; \bar{T}_i – среднее значение температуры на i -м участке.

Внутрискважинный конденсатор реактивной мощности в электротехническом комплексе УЭЦН предназначен для компенсации реактивной составляющей мощности погружного асинхронного электродвигателя. ВКРМ выполнен в виде прочного герметичного корпуса (рис. 1) с возможностью соединения с погружным электродвигателем. Внутри корпуса установлен высокотемпературный трехфазный конденсатор, фазы которого соединены по схеме «треугольник». В современных косинусных конденсаторах удельные потери активной мощности (тепловые потери), обусловленные вязким трением дипольных молекул и другими причинами, не превышают 0,5 Вт на 1000 ВАр. В связи с этим активное сопротивление ВКРМ можно не учитывать при составлении математической модели. Принятое допущение незначительно влияет на точность определения переходных процессов. Запишем систему уравнений по I и II законам Кирхгофа, описывающим переходные процессы в ВКРМ в матричной форме:

$$\mathbf{C} \frac{d}{dt} \mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{i}, \quad (4)$$

где \mathbf{u} – вектор-столбец входных напряжений на ВКРМ; \mathbf{i} – вектор-столбец линейных и фазных токов ВКРМ; \mathbf{A} – квадратная матрица шестого порядка; \mathbf{C} – суммарная емкость конденсаторов ВКРМ.

При принятых допущениях запишем выражения для входящих в уравнение (4) матриц параметров:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{C.ab}(t) \\ u_{C.bc}(t) \\ u_{C.ca}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_{C.A}(t) \\ i_{C.B}(t) \\ i_{C.C}(t) \\ i_{C.ab}(t) \\ i_{C.bc}(t) \\ i_{C.ca}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $u_{C.ab}$, $u_{C.bc}$, $u_{C.ca}$ – мгновенные значения напряжений между соответствующими фазами ВКРМ; $i_{C.A}$, $i_{C.B}$, $i_{C.C}$, $i_{C.ab}$, $i_{C.bc}$, $i_{C.ca}$ – линейные и фазные токи ВКРМ соответственно.

Для описания электромеханических процессов в погружном асинхронном электродвигателе целесообразно использовать неподвижную систему координат α , β , жестко связанную со статором. При этом для систем с незаземленными нулевыми точками аналитическая зависимость между составляющими α , β и мгновенными значениями напряжений симметричной трехфазной системы А, В, С в матричной форме имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{ab}(t) \\ u_{bc}(t) \\ u_{ca}(t) \end{bmatrix},$$

где $u_\alpha(t)$, $u_\beta(t)$, $u_c(t)$ – мгновенные значения фазных напряжений; $u_\alpha(t)$, $u_\beta(t)$ – фазные напряжения эквивалентной двухфазной обмотки статора; K – коэффициент преобразования, при $K=2/3$ преобразование осуществляется с равной амплитудой, при $K=\sqrt{2}/3$ активная и реактивная мощности, рассчитанные в новой системе, имеют те же значения, что и в исходной системе.

Обратное преобразование осуществляется в соответствии с матричным выражением:

$$\begin{bmatrix} u_{ab}(t) \\ u_{bc}(t) \\ u_{ca}(t) \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix}.$$

Аналогичные преобразования для других переменных электрических величин осуществляются путем соответствующей замены.

Математическая модель погружного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат α , β , выраженная через ток статора и потокосцепление ротора, в матричной форме имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_r \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_r \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} z_p \Psi_r^T \cdot \mathbf{i}_s \cdot \mathbf{D} - T_m(\omega) \right), \quad (6)$$

где $\mathbf{u}_s, \mathbf{i}_s, \Psi_r$ – субматрицы проекций векторов напряжений и токов статора, потокоцепления ротора на оси α, β ; \mathbf{L} – диагональная матрица индуктивностей; \mathbf{B} – матрица коэффициентов; ω – угловая частота вращения ротора; L_r – полная индуктивность обмотки ротора; L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины; $T_m(\omega)$ – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя; J – момент инерции, приведенный к валу двигателя; z_p – число пар полюсов машины;

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение (5) описывает электрическую часть машины, уравнение (6) – механическую. В (5) и (6) каждый элемент сложной матрицы-субматрицы. Здесь $\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r, \mathbf{i}_s, \Psi_r$ – вектор-столбцы:

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_{s\alpha}(t) \\ u_{s\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \Psi_s = \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha}(t) \\ \Psi_{s\beta}(t) \end{bmatrix},$$

где $u_{s\alpha}(t) = U_{sm} \cos(2\pi f t)$ – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси α ; $u_{s\beta}(t) = U_{sm} \sin(2\pi f t)$ – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси β ; U_{sm} – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки; f – частота питающего напряжения; $i_{s\alpha}(t), i_{s\beta}(t)$ – составляющие тока статора в системе координат α, β ; $\Psi_{r\alpha}(t), \Psi_{r\beta}(t)$ – составляющие потокоцепления ротора в системе координат α, β .

Запишем выражения для входящих в уравнение (5) матриц параметров:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R'_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \omega \cdot \frac{L_m z_p}{\sigma L_s L_r} \\ 0 & -\frac{R_{eq}}{\sigma L_s} & -\omega \cdot \frac{L_m z_p}{\sigma L_s L_r} & \frac{R'_r L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R'_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R'_r}{L_r} & -z_p \omega \\ 0 & \frac{R'_r L_m}{L_r} & z_p \omega & -\frac{R'_r}{L_r} \end{bmatrix},$$

где L_s – полная индуктивность обмотки статора; R'_r – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора; R_{eq} – эквивалентное активное сопротивление; σ – коэффициент рассеяния.

Полные индуктивности обмоток статора и ротора, эквивалентное активное сопротивление, а также коэффициент рассеяния определяются по выражениям:

$$L_s = L_{1\sigma} + L_m,$$

$$L_r = L'_{2\sigma} + L_m,$$

$$R_{eq} = R_s + R'_r \cdot (L_m / L_r)^2,$$

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r),$$

где $L_{1\sigma}$ и $L'_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора и приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора.

В общем случае выражение для механического полного момента сопротивления на валу электродвигателя имеет вид:

$$T_m(\omega) = a_k \cdot T_k + (1 + b_k) T_k \left(\frac{\omega}{\omega_{nom}} \right)^\gamma,$$

где T_k – полезный момент; a_k, b_k – коэффициенты постоянных и переменных потерь насосной нагрузки в режиме работы с постоянным значением коэффициента полезного действия; ω_{nom} – угловая частота вращения ротора электродвигателя в номинальном режиме; γ – показатель степени, характеризующий нагрузку, $\gamma=2$ для насосной нагрузки [18].

Для (1)–(6) запишем матрицы связей напряжений и токов в неподвижной системе координат α, β :

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1T\alpha}(t) \\ u_{1T\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_{2T\alpha}(t) \\ u_{2T\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{in\alpha}(t) \\ u_{in\beta}(t) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} u_{out\alpha}(t) \\ u_{out\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{c\alpha}(t) \\ u_{c\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{s\alpha}(t) \\ u_{s\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{2T\alpha}(t) \\ i_{2T\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{in\alpha}(t) \\ i_{in\beta}(t) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} i_{out\alpha}(t) \\ i_{out\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha}(t) \\ i_{c\beta}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix},$$

где $u_\alpha(t) = U_\alpha \cos(2\pi f t)$ – косинусоидальная по форме составляющая напряжения источника питания по оси α ; $u_\beta(t) = U_\beta \sin(2\pi f t)$ – синусоидальная по форме составляющая напряжения источника питания по оси β ; $u_{1T\alpha}(t), u_{1T\beta}(t), u_{2T\alpha}(t), u_{2T\beta}(t), u_{in\alpha}(t), u_{in\beta}(t), u_{out\alpha}(t), u_{out\beta}(t), u_{c\alpha}(t), u_{c\beta}(t)$ – напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора, на входе и выходе кабельной линии, на внутрискважинном компенсаторе в системе координат α, β соответственно; $i_{2T\alpha}(t), i_{2T\beta}(t), i_{in\alpha}(t), i_{in\beta}(t), i_{out\alpha}(t), i_{out\beta}(t), i_{c\alpha}(t), i_{c\beta}(t)$ – токи вторичной обмотки трансформатора, на входе и выходе кабельной линии, в внутрискважинном компенсаторе в системе координат α, β соответственно.

Решение задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) применительно к данному исследованию выполнено численными методами. Численные методы основаны на алгоритмах вычисления приближенных значений искомого решения функции $u(x)$ на некоторой выбранной сетке значений аргумента [19–23]:

$$\frac{du_i(x)}{dx} = f_i(x, u_1, u_2, \dots, u_n), \quad u_i(x_0) = u_i^{(0)}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где i – количество точек.

Суть метода заключается в переходе от бесконечно малых приращении в уравнении (системам ОДУ) (9) к конечным:

$$\frac{du}{dx} = f(x, u) \quad (7)$$

при $x > x_0$, $u(x_0) = u_0$, $x = x_i$.

Покрывается область определения решения D функции и (ось аргумента x) сеткой ζ_h равноотстоящих точек, начиная от начальной точки: $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i$. Расстояния между точками считаются равными $h = x_i - x_{i-1} = \text{const}$. Вводятся сеточные функции $u_i = u(x_i)$; $y_i = y(x_i)$; $f_i = f(x_i, y_i)$, определенные в узлах сетки ζ_h , то есть в точках $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i$. Функции $y_i, f(x_i, y_i)$ соответствуют численному решению разностной задачи, а $u(x_i)$ – решению дифференциальной задачи (7).

Предполагая, что известно значение y_i в точке x_i и заменяя производную $u'(x_i)$ в уравнении $u' = f(x, u)$ выражением $u'(x_i) = (y_{i+1} - y_i)/h$, $u(x_i)$ в функции $f(x, u)$ через y_i , получим разностное уравнение:

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{h} = f(x_i, y_i),$$

где h – шаг интегрирования.

В общем случае формула Эйлера имеет вид:

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

Результаты моделирования

В качестве объекта исследования принят электротехнический комплекс УЭЦН, оснащенный погружным асинхронным электродвигателем марки ЭД-63-117, внутрискважинным компенсатором реактивной мощности марки ВКРМ-125-117, кабельной линией длиной 2000 м и питающим трансформатором марки ТМПН-160/3.

Таблица 1. Параметры трансформатора ТМПН-160/3

Параметр/Parameter	Значение/Value	
	Обмотка НН LV winding	Обмотка ВН HV winding
Номинальное напряжение, В Rated voltage, V	380	1250
Номинальная полная мощность, ВА Rated apparent power, VA	160000	
Потери короткого замыкания, Вт Short circuit losses, W	2650	
Потери холостого хода, Вт No-load losses, W	440	
Напряжение короткого замыкания Short circuit voltage, %	5,5	
Ток холостого хода/No-load current, %	1,7	
Активное сопротивление обмотки, Ом Active resistance of the winding, Ohm	0,022	0,243
Индуктивность обмотки, Гн Inductance of the winding, H	$3,387 \cdot 10^{-5}$	$3,665 \cdot 10^{-4}$
Активное сопротивление контура намагничивания, Ом Active resistance of the magnetizing circuit, Ohm	278,776	
Индуктивность контура намагничивания, Гн Inductance of the magnetization circuit, H	1,599	

Параметры трансформатора ТМПН приведены в табл. 1 и приведены к обмотке высшего напряжения. Расчет параметров схемы замещения произведен по методике, изложенной в [24, 25].

В качестве питающего кабеля выбран погружной бронированный кабель марки КПБК-90 3х16 [17] (табл. 2).

Таблица 2. Параметры нефтепогружного кабеля КПБК-90 3×16 [17]

Table 2. Parameters of the oil submersible cable KPBK-90 3×16 [17]

Погонная ёмкость, C_0 , Ф/км Linear capacity, C_0 , F/km	Погонная индуктивность, L_0 , Гн/км Linear inductance, L_0 , H/km	Погонная проводимость, g_0 , См/км Linear conductivity, g_0 , Ω^{-1}/km	Погонное сопротивление, r_0 , Ом/км Linear resistance, r_0 , Ω/km
$2,125 \cdot 10^{-7}$	$300,676 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	1,204

Средняя температура токопроводящей жилы кабеля принята плюс 50 °С для одного звена редуцированной модели.

Реактивная мощность ВКРМ составляет 35 кВАр при номинальном напряжении 1040 В и частоте 50 Гц. Суммарная емкость ВКРМ после эквивалентных преобразованиях составляет $C = 3 \times 34,35 \cdot 10^{-6}$ Ф.

Параметры погружного асинхронного электродвигателя марки ЭД-63-117 приведены в табл. 3 и верифицированы с протоколами стендовых испытаний [26, 27]. Авторами показано, что в номинальном режиме отклонение расчетных значений потребляемого тока от экспериментальных данных составляет 0,9 % для потребляемой активной мощности минус 0,1 %. Максимальная относительная погрешность с учетом допустимых погрешностей измерений на испытательных стендах (не более 0,5 %), соответствующая области малых нагрузок (40 % от номинальной нагрузки), составляет для тока 3,0 % и уменьшается с увеличением нагрузки до 0,9 % [26].

Таблица 3. Параметры модели погружного асинхронного электродвигателя ЭД-63-117 [26, 27]

Table 3. Parameters of the submersible induction motor model ED-63-117 [26, 27]

Параметр Parameter	Значение Value
Номинальное напряжение, В/Rated voltage, V	1040
Номинальная полная мощность, ВА Rated apparent power, VA	88757
Активное сопротивление обмотки статора, Ом Active resistance of the stator winding, Ohm	1,0
Индуктивность обмотки статора, Гн Inductance of the stator winding, H	$3,17 \cdot 10^{-3}$
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом Reduced active resistance of the rotor winding, Ohm	0,676
Приведенная индуктивность обмотки ротора, Гн Reduced inductance of the rotor winding, H	$3,17 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность контура намагничивания, Гн Inductance of the magnetization circuit, H	$67,0 \cdot 10^{-3}$
Момент инерции ротора, кг·м ² Moment of rotor's inertia, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0,11
Коэффициент трения, Н·м·с Friction coefficient, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$	0,022

Анализ совокупности собственных чисел элементарных подсистем электротехнического комплекса УЭЦН показывает, что решаемая задача Коши по критерию времени и точности счета позволяет применить метод Эйлера. При принятых параметрах электротехнического комплекса УЭЦН и рациональном шаге интегрирования он обеспечивает достаточную точность при приемлемых затратах вычислительных ресурсов. Шаг интегрирования выбран на основе анализа корней характеристического уравнения. Максимально возможный шаг дискретизации по времени определяется в соответствии с величиной удвоенной частоты Найквиста, которая определяется максимальной мнимой частью корня характеристического уравнения. При моделировании переходных процессов шаг интегрирования принят с запасом $h=2 \cdot 10^{-7}$ с целью повышения детализации переходного процесса, количество точек $i=5 \cdot 10^6$.

Отключение источника питания произведено в момент времени 0,5 с, когда погружной электродвигатель работал в установившемся режиме.

На рис. 3 приведены зависимости фазных токов источника питания от момента пуска погружного асинхронного электродвигателя до вывода в установившейся режим работы. Амплитуда тока 683,6 А в режиме пуска, в установившемся режиме 212,2 А.

На рис. 4 приведены зависимости фазных токов погружного электродвигателя в режиме пуска (рис. 4, а) и при отключении источника питания (рис. 4, б). В момент пуска амплитудное значение тока ПЭД составляет 216,3 А, в установившемся режиме – 70,7 А. Согласно законам коммутации, ток в индуктивности

(в нашем случае в обмотках статора ПЭД) не может измениться мгновенно (скачкообразно), что согласуется с характеристикой переходного процесса. Характеристики токов статора имеют колебательный характер, затухающий по амплитуде. Колебательный характер вызван обменом энергией между конденсатором ВКРМ, кабельной линией и погружным электродвигателем. Периодический обмен энергией продолжается до тех пор, пока накопленная энергия не рассеется в виде тепла на активном сопротивлении участка ЭТК после коммутации.

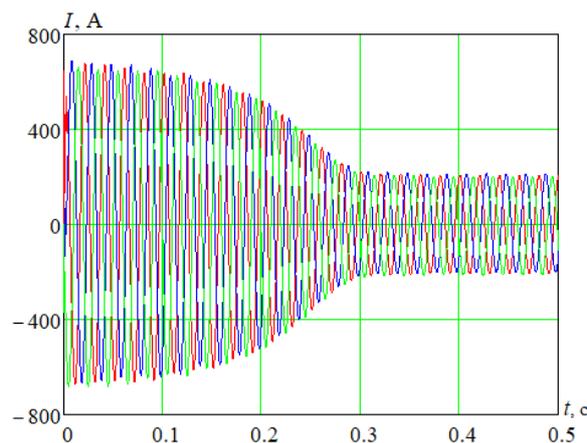


Рис. 3. Токи в первичной обмотке повышающего трансформатора (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый)

Fig. 3. Currents in the primary winding of a step-up transformer (phase A – red; phase B – blue; phase C – green)

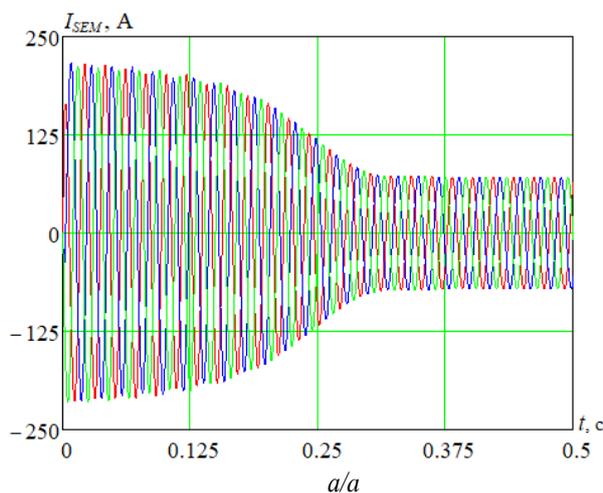
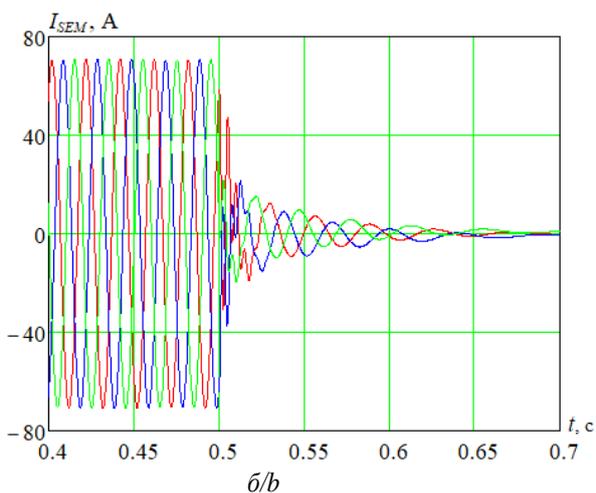


Рис. 4. Зависимости тока статора ПЭД от времени (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый): а) в режиме пуска; б) при отключении источника питания

Fig. 4. Dependences of the stator current SEM on time (phase A – red; phase B – blue; phase C – green): a) in the start mode; b) when the power supply is turned off



На рис. 5 приведены зависимости линейных токов внутрискважинного компенсатора в режиме пуска ПЭД (рис. 5, а) и при отключении источника питания (рис. 5, б). Анализ кривой (рис. 5, б) показал, что в момент отключения источника питания происходит бросок тока внутрискважинного ком-

пенсатора. Амплитудные значения линейных токов ВКРМ до отключения источника питания – 28,1 А. После отключения источника питания амплитудное значение тока фазы А равно 61,3 А, фазы В – 62,4 А, фазы С – минус 1,1 А. Изменение тока ВКРМ при переходном процессе имеет колебательный характер

и затухает по амплитуде. Максимальный бросок тока ВКРМ наблюдается в момент отключения, при

котором мгновенное значение тока ПЭД равно амплитудному.

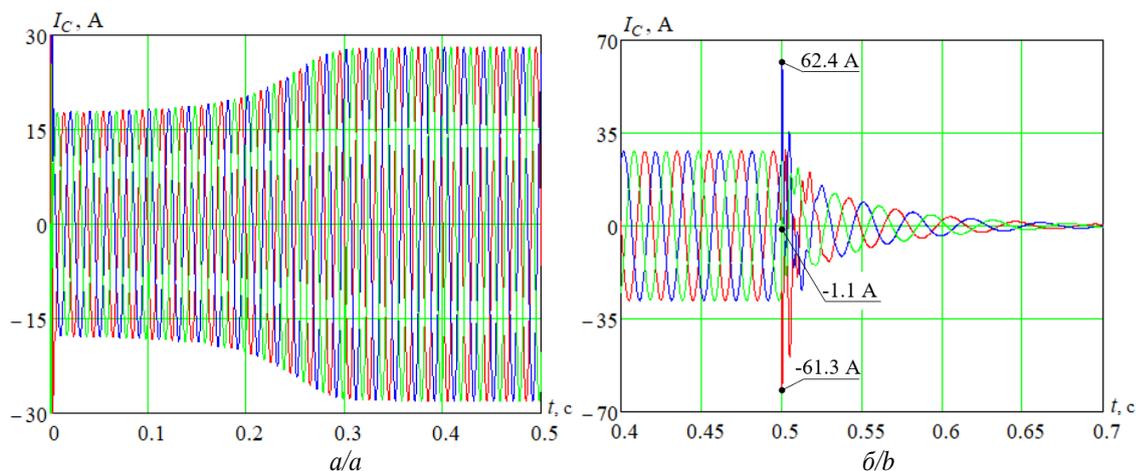


Рис. 5. Зависимости тока ВКРМ от времени (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый): а) в режиме пуска ПЭД; б) при отключении источника питания

Fig. 5. Dependences of the DRPC current on time (phase A – red; phase B – blue; phase C – green): a) in SEM start mode; b) when the power supply is turned off

На рис. 6 приведены зависимости фазных напряжений на внутрискважинном компенсаторе в режиме пуска ПЭД (рис. 6, а) и при отключении источника питания (рис. 6, б). Согласно законам коммутации, напряжение на емкостном элементе (в нашем случае на конденсаторе ВКРМ) не может измениться мгновенно

(скачкообразно), что согласуется с характеристикой переходного процесса. Амплитудные значения фазных напряжений на ВКРМ до и после отключения источника питания составляют 864,5 В. Изменение напряжения на ВКРМ при переходном процессе имеет колебательный характер и затухает по амплитуде.

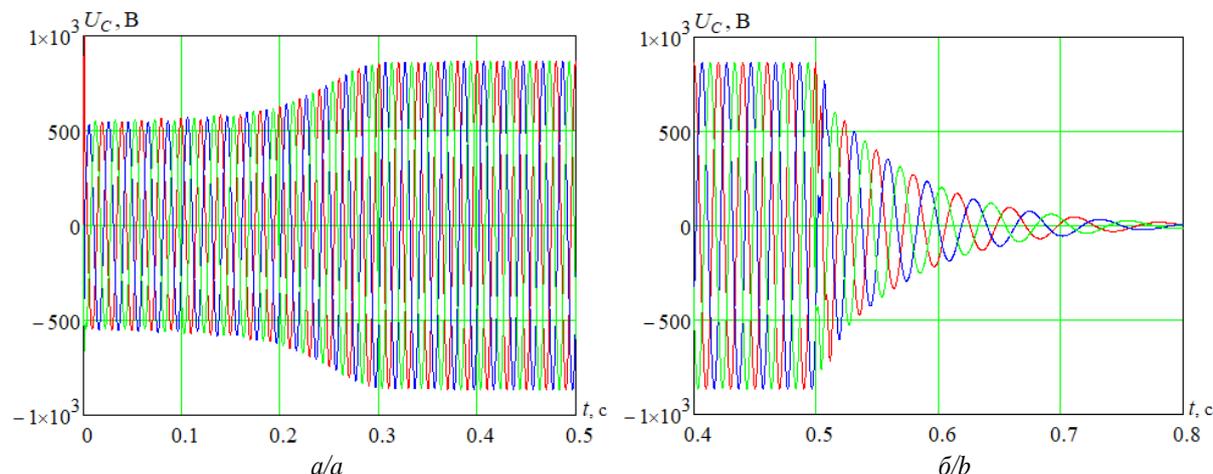


Рис. 6. Зависимости фазных напряжений на ВКРМ от времени (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый): а) в режиме пуска ПЭД; б) при отключении источника питания

Fig. 6. Dependences of phase voltages on DRPC from time (phase A – red; phase B – blue; phase C – green): a) in the start mode; b) when the power supply is turned off

На рис. 7, 8 приведены зависимости угловой скорости ротора и электромагнитного момента на валу погружного асинхронного электродвигателя соответственно. Показан промежуток времени при пуске и выбеге.

нической инерции частота вращения ротора при отключении источника питания плавно снижается.

Анализ электромеханических характеристик показал, что электромагнитный момент погружного электродвигателя в установившемся режиме составляет 205,6 Н·м. В момент переходного процесса электромагнитный момент снижается до нуля. За счет меха-

Полученные результаты переходных процессов позволили установить причину ложных срабатываний устройств защиты внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности и выработать комплекс мер по их предотвращению. Времятоковые зависимости устройств защиты ВКРМ необходимо дополнительно исследовать с учетом специфики оборудования электротехнического комплекса.

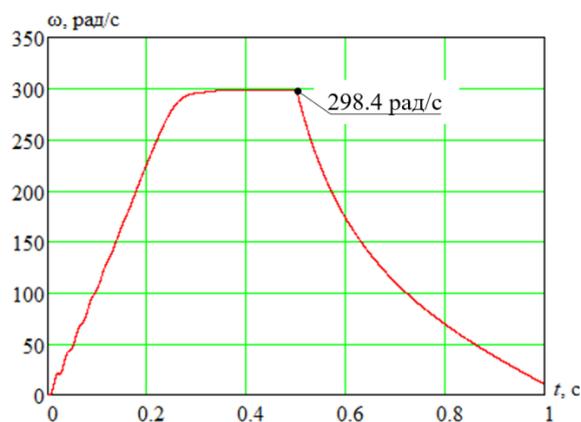


Рис. 7. Частота вращения ротора погружного электродвигателя

Fig. 7. Rotor speed of submersible induction motor

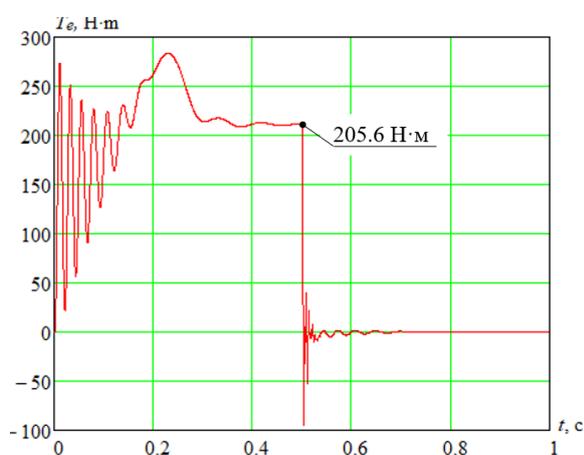


Рис. 8. Электромагнитный момент на валу ПЭД

Fig. 8. Electromagnetic torque on the shaft of submersible induction motor

Обсуждение результатов

На основании исследования предложены мероприятия по снижению количества ложных срабатываний

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о функционировании ЭЭС России в 2021 году. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (дата обращения: 08.06.2022).
2. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, А.В. Деговцов, Ю.А. Донской, А.В. Булат, А.С. Зуев, С.Б. Якимов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 4. – С. 25–30.
3. Fakher S., Khlaifat A., Nameer H. Improving electric submersible pumps efficiency and mean time between failure using permanent magnet motor // Upstream Oil and Gas Technology. – 2022. – V. 9. DOI: 10.1016/j.upstre.2022.100074.
4. Lea J.F., Rowlan L. 12 - Electrical submersible pumps // Gas Well Deliquification. 3rd ed. – 2019. – P. 237–308. DOI: 10.1016/B978-0-12-815897-5.00012-3.
5. Takacs G. Chapter 3. Electrical submersible pump components and their operational features. – Cambridge, Gulf Professional Publ., 2018. – P. 55–152. DOI: 10.1016/B978-0-12-814570-8.00003-9.
6. Внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности. Первый опыт / А.В. Фаткин, А.А. Ожегов, В.А. Копырин, А.А. Юкин // Инженерная практика. – 2019. – № 8. – С. 18–26.

устройств защиты внутрискважинного компенсатора реактивной мощности:

1. Установка в схему управления электромеханическим реле токоограничивающих диодов или супрессоров, например, диодов Зенера, для предотвращения перенапряжений, вызванных токами разряда конденсаторов ВКРМ.
2. Согласование уставок электромеханического реле с токами разряда конденсаторов ВКРМ.
3. Настройка алгоритмов отключения станции управления таким образом, чтобы минимизировать фазный ток статора погружного электродвигателя.

Выводы

1. Разработана математическая модель электротехнического комплекса УЭЦН с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, которая позволяет исследовать динамические и установившиеся режимы работы комплекса.
2. Получены характеристики переходных процессов в элементах электротехнического комплекса УЭЦН при включении и отключении источника питания. Установлено, что в момент времени 0,5 с при отключении источника питания происходит бросок тока ВКРМ в фазе В в 2,21 раза относительно рабочего тока. Максимальный бросок в 2,56 раза тока в одной из фаз наблюдается в момент отключения источника питания, при котором ток соответствующей фазы ПЭД имеет максимальное значение. Данное обстоятельство необходимо учитывать при определении уставок защиты ВКРМ.
3. Разработаны мероприятия по снижению количества ложных срабатываний устройств защиты внутрискважинного компенсатора реактивной мощности.

7. Machado A.P.F., Resende C.Z., Cavalieri D.C. Estimation and prediction of motor load torque applied to electrical submersible pumps // Control Engineering Practice. – 2019. – V. 84. – P. 284–296. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.11.019
8. Аникин В.В. Методика и средства предварительной идентификации параметров модели послеремонтных регулируемых погружных асинхронных электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Ханты-Мансийск, 2020. – 182 с.
9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Изд-во «Питер», 2010. – 543 с.
10. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 324 с.
11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. в двух т. Т. 1. – М.: ИД МЭИ, – 2006. – 652 с.
12. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Chapter 2. Harmonic models of transformers // Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives 3rd ed. – 2023. – P. 99–196. DOI: 10.1016/B978-0-12-817856-0.00002-9.
13. Pijarski P. Modelling of multi-winding transformers for short-circuit calculations in the power system – modelling accuracy and differences in equivalent circuits // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2023. – V. 148. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.108971.

14. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 87–95.
15. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview / Z. Hu, Y. Han, A.S. Zalhaf, S. Zhou, E. Zhao, P. Yang // Electric Power Systems Research. – 2023. – V. 218. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
16. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / 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, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
17. 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.
18. Лысова О.А., Фрайштетер В.П., Смирнов А.Ю. Анализ способов пуска установок центробежных электронасосов в осложненных условиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 87–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-87-96.
19. Пантелеев А.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения в примерах и задачах. – М.: Изд-во «Высшая Школа», 2001. – 376 с.
20. Hairer E., Wanner G. Solving ordinary differential equations II: stiff and differential-algebraic problems. 2nd revised ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 614 p.
21. Le Veque R.J. Finite difference methods for ordinary and partial differential equations. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. – 341 p.
22. Dormand J.R. Numerical methods for differential equations: a computational approach. – Florida: CRC Press, 1996. – 384 p.
23. Rapp B.E. Chapter 27. Numerical methods for solving differential equations // Microfluidics (Second Edition). – 2023. – P. 581–638. DOI: 10.1016/B978-0-12-824022-9.00047-4
24. Семина И.А., Андреева Е.Г. Имитационное моделирование максимальной токовой защиты силового трансформатора в программе Matlab Simulink // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – Т. 17. – № 1. – С. 27–32. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-27-32.
25. Татевосян А.А., Конакбаева К.С. Программное обеспечение по выбору мощности цеховых трансформаторных подстанций // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2013. – № 2. – С. 334–336.
26. Копырин В.А., Портнягин А.Л., Хамитов Р.Н. Пути повышения эффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 155–162.
27. Оценка совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором / В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, А.Л. Портнягин, А.А. Маркова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. С. 166–175. DOI: 10.18799/24131830/2021/02/3053.

Поступила 15.05.2023 г.

Прошла рецензирование 25.05.2023 г.

Информация об авторах

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

Исаев Ю.Н., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Копырин В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Тимошкин В.В., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Ковалев В.З., доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лосев Ф.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Леонов А.П., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Попов Е.И., ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.3

TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRICAL COMPLEX OF PRODUCTION WELL WITH DOWNHOLE COMPENSATOR OF REACTIVE POWER

Alexander S. Glazyrin^{1,2},
asglazyrin@tpu.ru

Yusup N. Isaev¹,
isaev@tpu.ru

Vladimir A. Kopyrin³,
kopyrinva@gmail.com

Vadim V. Timoshkin¹,
filipas@tpu.ru

Sergey N. Kladiev¹,
kladiev@tpu.ru

Rustam N. Khamitov^{3,4},
apple_27@mail.ru

Vladimir Z. Kovalev^{2,1},
vz_kovalev@mail.ru

Fedor A. Losev³,
losevfa@tyuiu.ru

Andrey P. Leonov¹,
leonov_ap@tpu.ru

Evgeny I. Popov³,
popovoi@tyuiu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

³ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

⁴ Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

The relevance. At the present time at routine complication of technological processes to increase efficiency of production processes due to introduction of new equipment the conflicts between functional capabilities of various technical means and their ability to function with specified quality, in specified electromagnetic environment and do not create inadmissible electromagnetic interference to other technical means occur. The electrical engineering complex for oil production includes a combination of ground and submersible electrical equipment assembled for receiving, transforming electrical energy, controlling its flow, converting electrical energy into mechanical energy and transmitting it to a submersible pump, including various electrical and electronic devices: a control station with a frequency converter, a step-up transformer, a cable line, a submersible electric motor, a downhole reactive power compensator and other devices. Any change in the layout of electrical systems for extracting oil or technical characteristics of the equipment used requires careful analysis of transient processes between the operating modes of electrical equipment in order to prevent the risks of false triggering of electrical equipment protection devices.

The purpose: analysis of transient processes in the electrical system of the production well with the downhole reactive power compensator when the power supply is disconnected in order to prevent the risks of false operation of the compensator protection devices.

The object: section of a power supply system for a cluster of oil producing wells equipped with electric centrifugal pump installations with downhole reactive power compensators.

Methods: positions of theoretical bases of electrical engineering, theory of electric drive, theory of differential equations, numerical methods.

Results. The authors developed the mathematical model of the electrical system of the submersible unit for oil production with a downhole reactive power compensator, which enables to investigate transient processes in start-up and shutdown mode of the submersible induction motor. Characteristics of transient processes are obtained in elements of electrical complex of submersible plant for oil production when power supply is switched on and disconnected. It is established that the maximum current surge in the downhole reactive power compensator is 2,56 times with the parameters of the electrical system of the production well accepted in the study. The inventive measures for reducing the number of false actuations of the protection devices are also disclosed.

Key words:

downhole compensator, transient processes, submersible electric centrifugal pump, submersible induction motor, mathematical model.

REFERENCES

1. *Otchet o funktsionirovani EES Rossii v 2021 godu* [Report on the functioning of the UES of Russia in 2021]. Available at: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (accessed 6 August 2022).
2. Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Dugowson A.V., Donskoy Yu.A., Bulat A.V., Zuev A.S., Yakimov S.B. Energy efficiency installations of electric centrifugal pumps. *Equipment and technologies for oil and gas industry*, 2016, no. 4, pp. 25–30. In Rus.
3. Fakher S., Khlaifat A., Nameer H. Improving electric submersible pumps efficiency and mean time between failure using permanent magnet motor. *Upstream Oil and Gas Technology*, 2022, vol. 9. DOI: 10.1016/j.upstre.2022.100074.
4. Lea J.F., Rowlan L. 12 – Electrical submersible pumps. *Gas Well Deliquification*. 3rd ed. 2019, pp. 237–308. DOI: 10.1016/B978-0-12-815897-5.00012-3.
5. Takacs G. *Chapter 3 – Electrical submersible pump components and their operational features*. Cambridge, Gulf Professional Publ., 2018. pp. 55–152. DOI: 10.1016/B978-0-12-814570-8.00003-9.

6. Fatkin A.V., Ozhegov A.A., Kopyrin V.A., Yukin A.A. Downhole reactive power compensators. First experience. *Engineering practice*, 2019, no. 8, pp. 18–26. In Rus.
7. Machado A.P.F., Resende C.Z., Cavalieri D.C. Estimation and prediction of motor load torque applied to electrical submersible pumps. *Control Engineering Practice*, 2019, vol. 84, pp. 284–296. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.11.019.
8. Anikin V.V. *Metodika i sredstva predvaritel'noy identifikatsii parametrov modeli posleremontnykh reguliruemyykh pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelye*. Dis. Kand. nauk [Methods and means of preliminary identification of the parameters of the model of post-repair adjustable submersible asynchronous electric motors. Cand. Diss. Abstract]. Khanty-Mansisk, 2020. 182 p.
9. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric cars. AC machines]. St. Petersburg, Piter Publ. House, 2010. 543 p.
10. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines. 3rd ed., revised and added]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 324 p.
11. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, MPEI Publ. House, 2006. Vol. 1, 652 p.
12. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Chapter 2 – Harmonic models of transformers. *Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives*. 3rd ed. 2023, pp. 99–196. DOI: 10.1016/B978-0-12-817856-0.00002-9.
13. Pijarski P. Modelling of multi-winding transformers for short-circuit calculations in the power system – modelling accuracy and differences in equivalent circuits. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, vol. 148. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.108971.
14. Pustovetov M.Yu. Experience in developing sine-wave filter for power circuit of vvvf-drive with induction motor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 87–95. In Rus.
15. Hu Z., Han Y., Zalhaf A.S., Zhou S., Zhao E., Yang P. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview. *Electric Power Systems Research*, 2023, vol. 218. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
16. Glazyrin A.S. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
17. Glazyrin A.S. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. In Rus.
18. Lysova O.A., Fraishteter V.P., Smirnov A.Yu. Centrifugal electric pumps units startup methods analysis in abnormal operating conditions. *News of higher educational institutions. Mining magazine*, 2018, no. 4, pp. 87–96. In Rus.
19. Pantelev A.V. *Obyknovennyye differentsialnye uravneniya v primerakh i zadachakh* [Ordinary differential equations in examples and tasks]. Moscow, Vysshaya shkola Publ. House, 2001. 376 p.
20. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II: stiff and differential-algebraic problems*. 2nd revised ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. 614 p.
21. Le Veque R.J. *Finite difference methods for ordinary and partial differential equations*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. 341 p.
22. Dormand J.R. *Numerical methods for differential equations: a computational approach*. Florida, CRC Press, 1996. 384 p.
23. Rapp B.E. Chapter 27 – Numerical methods for solving differential equations. 2nd ed. *Microfluidics*, 2023. pp. 581–638. DOI: 10.1016/B978-0-12-824022-9.00047-4.
24. Semina I.A., Andreeva E.G. Simulation modeling of the maximum current protection of a power transformer in the Matlab Simulink program. *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2021, vol. 17, no. 1, pp. 27–32. In Rus. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-27-32.
25. Tatevosyan A.A., Konakbaeva K.S. Software for selecting the capacity of workshop transformer substations. *Young Russia: advanced technologies for industry*, 2013, no. 2, pp. 334–336. In Rus.
26. Kopyrin V.A., Portnyagin A.L., Khamitov R.N. Ways to improve the efficiency of electric submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 155–162. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361.
27. Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Glazyrin A.S., Kladiyev S.N., Rakov I.V., Portnyagin A.L., Markova A.A. Evaluation of total cost of possessing the electric centrifugal pump with submersible compensator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 166–175. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/02/3053.

*Received: 15 May 2023.
Reviewed: 25 May 2023.*

Information about the authors

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

Yusup N. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Vadim V. Timoshkin, Cand. Sc, associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Industrial University of Tyumen; professor, Omsk State Technical University.

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., professor, Yugra State University; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Fedor A. Losev, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

Andrey P. Leonov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeny I. Popov, assistant, Industrial University of Tyumen.