

Моделирование переходных процессов в электротехнической системе скважины для добычи нефти

Ф.А. Лосев, Е.Е. Ревякин, И.С. Сухачев

Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация: В статье рассматривается расчет переходных процессов в электротехнической системе скважины для добычи нефти, состоящей из трансформатора, кабельной линии и погружного асинхронного электродвигателя. Составлена математическая модель для расчета переходных процессов в таких системах, при этом каждый элемент описывается в виде отдельного модуля, содержащего алгебраические и дифференциальные уравнения, что позволяет моделировать динамические и установившиеся режимы работы. Получены зависимости продольной и поперечной составляющих тока статора и частоты вращения ротора погружного асинхронного электродвигателя при пуске, провале напряжения и отключении источника питания для типовой электротехнической системы скважины для добычи нефти.

Ключевые слова: переходный процесс, электротехническая система, добыча нефти, погружной асинхронный электродвигатель, провал напряжения, математическое моделирование.

Электротехническая система нефтегазового месторождения включает большое количество взаимосвязанных систем для добычи, транспортировки, подготовки нефти [1]. В настоящее время наиболее распространена скважинная добыча нефти при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [2]. В состав таких установок входит погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД), который обладает малой постоянной инерции из-за небольшого диаметра ротора. Из-за этой особенности ПЭД чувствителен к возмущениям питающего напряжения [3,4]. В связи с этим необходимо заранее проанализировать переходные процессы, возникающие при подобных возмущениях, для исключения остановки добычи нефти.

Для электроснабжения ПЭД, как правило, используются схемы с двойным преобразованием, когда напряжение 6 кВ преобразуется в 0,4 кВ, а затем 0,4 кВ преобразуется в рабочее напряжение ПЭД [1,5]. Поэтому электротехническая система (ЭТС) скважины для добычи нефти включает в себя: трансформаторы, кабельные линии (КЛ) длиной 1000-2000 м, ПЭД.

Также при анализе переходных процессов в ЭТС УЭЦН необходимо учитывать как электромеханическую, так и электромагнитную составляющие из-за малой постоянной инерции ПЭД, сравнимой с электромагнитной постоянной времени, что приводит к усложнению математического описания элементов системы. Таким образом, моделирование переходных процессов в ЭТС скважины для добычи нефти является актуальной задачей.

На первом этапе все элементы ЭТС представляются в виде четырехполюсников с входными и выходными токами и напряжениями. Рассматривалась типовая ЭТС УЭЦН, включающая трансформатор ТМПН, КЛ и ПЭД, однолинейная схема электроснабжения которой приведена на рис. 1.

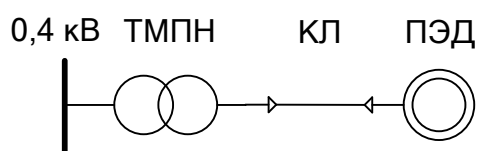


Рис. 1. – Схема электроснабжения ЭТС УЭЦН

В данной ЭТС выделили четыре четырехполюсника: энергосистема (ЭС), трансформатор, КЛ, ПЭД, рис. 2. В результате получили каскадное соединение четырехполюсников. Первый четырехполюсник ЭС и последний четырехполюсник ПЭД являются первым и последним элементом ЭТС, то есть, с точки зрения расчетной схемы, у четырехполюсника ЭС режим короткого замыкания на входе, а у четырехполюсника ПЭД режим короткого замыкания на выходе, что уменьшает количество переменных.

На втором этапе для каждого модуля выбирается математическая модель, позволяющая рассчитывать электромагнитные и электромеханические переходные процессы. Основным преимуществом модульного подхода является возможность замены одной математической модели на другую без изменения всей модели ЭТС. Другие преимущества: возможность создать базу моделей модулей для использования в нескольких

расчетах одновременно; возможность проверять корректность модели каждого модуля независимо от других модулей системы.

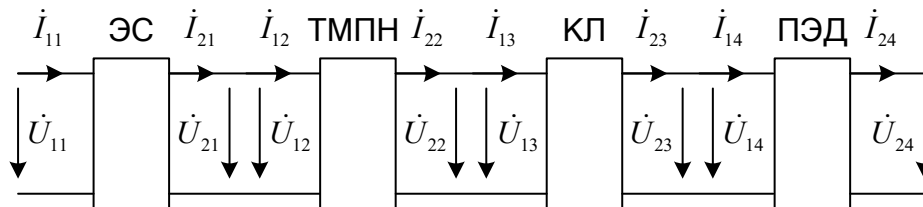


Рис. 2. – Расчетная схема ЭЭСН: первый индекс тока и напряжения модулей показывает: 1 – входные параметры, 2 – выходные параметры; второй индекс тока и напряжения показывает порядковый номер модулей

Для формирования математической модели рассматриваемой ЭЭС использовалась система координат $dq0$, вращающихся синхронно с частотой энергосистемы ω_k . В работе рассматривались только симметричные возмущения, поэтому всеми уравнения составлены только относительно осей dq . Такая система координат позволяет моделировать ЭС как эквивалентной ЭДС за сопротивлением, так и эквивалентным синхронным генератором, при этом возможно моделировать все виды электродвигателей. Для ПЭД использовали Т-образную схему замещения, которая показывает хорошее соответствие реальным процессам в двигателе [6,7], см. рис. 3.

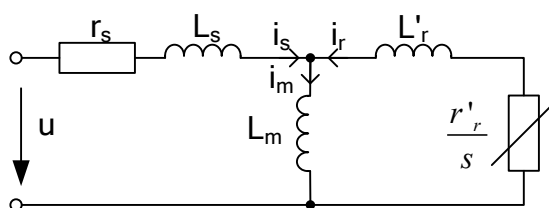


Рис. 3. – Т-образная схема замещения асинхронного ПЭД

Математическая модель асинхронного ПЭД [8]:

$$U_d = \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \Psi_{sq} \cdot \omega_k + I_{sd} \cdot r_s, \quad (1)$$

$$U_q = \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \Psi_{sd} \cdot \omega_k + I_{sq} \cdot r_s, \quad (2)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - \Psi_{rq} \cdot (\omega_k - \omega) + I_{rd} \cdot \frac{r'_r}{\omega_k - \omega}, \quad (3)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + \Psi_{rd} \cdot (\omega_k - \omega) + I_{rq} \cdot \frac{r'_r}{\omega_k - \omega}, \quad (4)$$

$$\Psi_{sd} = (L_s + L_m) \cdot I_{sd} + L_m \cdot I_{rd}, \quad (5)$$

$$\Psi_{sq} = (L_s + L_m) \cdot I_{sq} + L_m \cdot I_{rq}, \quad (6)$$

$$\Psi_{rd} = (L'_r + L_m) \cdot I_{rd} + L_m \cdot I_{sd}, \quad (7)$$

$$\Psi_{rq} = (L'_r + L_m) \cdot I_{rq} + L_m \cdot I_{sq}, \quad (8)$$

$$T_j \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1,5 \cdot (\Psi_{sd} \cdot I_{sq} - \Psi_{sq} \cdot I_{sd}) - M_c, \quad (9)$$

где U – напряжение статора; I – ток; Ψ – потокосцепление; L – индуктивность; r – активное сопротивление; t – время переходного процесса; ω – частота вращения ротора; M_c – момент сопротивления механизма; T_j – электромеханическая постоянная времени; индекс d относится к продольной оси, q – к поперечной оси; s – к обмотке статора, r – к обмотке ротора; m – к ветви намагничивания.

ПЭД приводит во вращения насос, момент сопротивления которого был принят вентиляторным. Математическая модель механизма:

$$M_c = M_0 + (M_n - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (10)$$

где M_n – момент сопротивления при номинальной нагрузке; M_0 – момент сопротивления при трогании; ω – частота вращения насоса; ω_n – номинальная частота вращения насоса.

С точки зрения модуля ПЭД, входными параметрами будут ток и напряжение статора, выходным параметром будет ток ротора, выходное напряжение отсутствует, так как ротор короткозамкнутый.

Для модуля трансформатора выбрали Т-образную схему замещения, но с активным сопротивлением в ветви намагничивания, рис. 4.

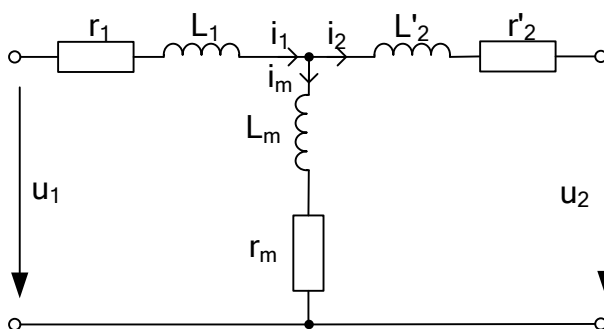


Рис. 4. – Т-образная схема замещения трансформатора

Математическая модель трансформатора составляется на основании двух уравнений по второму закону Кирхгофа для независимых контуров и одного уравнения по первому закону Кирхгофа для верхнего узла. Затем производится замена тока намагничивания i_m в этих уравнениях, и выражаются производные входного и выходного токов. На последнем этапе производится преобразование уравнений к вращающейся системе координат dq . В результате получили математическое описание модуля трансформатора:

$$\frac{dI_{1d}}{dt} = \frac{L'_2 + L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{1d} - \frac{L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{2d} - \frac{r_1 (L'_2 + L_m) + r_m L'_2}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{1d} + \frac{r_m L'_2 - r'_2 L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{2d} + I_{1q} \cdot \omega_k, \quad (11)$$

$$\frac{dI_{1q}}{dt} = \frac{L'_2 + L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{1q} - \frac{L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{2q} - \frac{r_1 (L'_2 + L_m) + r_m L'_2}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{1q} + \frac{r_m L'_2 - r'_2 L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{2q} - I_{1d} \cdot \omega_k, \quad (12)$$

$$\frac{dI_{2d}}{dt} = \frac{L_1 + L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{2d} - \frac{L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{1d} - \frac{r'_2 (L_1 + L_m) + r_m L_1}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{2d} + \frac{r_m L_1 - r'_1 L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{1d} + I_{2q} \cdot \omega_k, \quad (13)$$

$$\frac{dI_{2q}}{dt} = \frac{L_1 + L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{2q} - \frac{L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} U_{1q} -$$

$$- \frac{r'_2 (L_1 + L_m) + r_m L_1}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{2q} + \frac{r_m L_1 - r'_1 L_m}{L'_2 L_m + L_1 (L'_2 + L_m)} I_{1q} - I_{2d} \cdot \omega_k \quad (14)$$

где U – напряжение трансформатора; I – ток трансформатора; индекс 1 относится к первичной обмотке трансформатора, 2 – к вторичной обмотке трансформатора, m – к ветви намагничивания.

Для КЛ использовали упрощенную схему замещения в виде активно-индуктивной ветви, рис. 5.

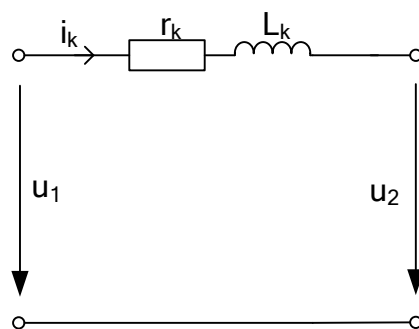


Рис. 5. – Упрощенная схема замещения КЛ

Математическая модель кабельной линии составляется на основании уравнения по второму закону Кирхгофа. Затем производится преобразование уравнения к вращающейся системе координат dq . В результате получили математическое описание модуля КЛ:

$$\frac{dI_{kd}}{dt} = \frac{U_{1d}}{L_k} - \frac{U_{2d}}{L_k} - \frac{r_k}{L_k} I_{kd} + I_{kq} \cdot \omega_k, \quad (15)$$

$$\frac{dI_{kq}}{dt} = \frac{U_{1q}}{L_k} - \frac{U_{2q}}{L_k} - \frac{r_k}{L_k} I_{kq} - I_{kd} \cdot \omega_k, \quad (16)$$

где U – напряжение КЛ; I – ток КЛ; индекс 1 относится к началу КЛ, 2 – к концу КЛ, k – к КЛ.

При использовании такой схемы замещения необходимо учитывать, что входной ток модуля равен выходному току модуля при расчете переходного процесса.

Для модуля ЭС также использовали упрощенную схему замещения в виде ЭДС за постоянным активно-индуктивным сопротивлением. Математическая модель получается путем замены входного напряжения на ЭДС в уравнениях (15) - (16):

$$\frac{dI_{cd}}{dt} = \frac{E_d}{L_c} - \frac{U_{2d}}{L_c} - \frac{r_c}{L_c} I_{cd} + I_{cq} \cdot \omega_k, \quad (17)$$

$$\frac{dI_{cq}}{dt} = \frac{E_q}{L_c} - \frac{U_{2q}}{L_c} - \frac{r_c}{L_c} I_{cq} - I_{cd} \cdot \omega_k, \quad (18)$$

где E – эквивалентная ЭДС ЭС; I – ток ЭС; U_2 – выходное напряжение ЭС; индекс c относится к параметрам ЭС.

Данный модуль выступает началом расчетной схемы, поэтому его основными параметрами являются выходные ток и напряжение, при этом входной ток будет равен выходному.

На третьем этапе добавляются уравнения, описывающие соединения модулей между собой. В рассматриваемом примере имеем каскадное соединение, для него уравнения принимают следующий вид:

$$\begin{cases} I_{2(n-1)d} = I_{1(n)d} \\ I_{2(n-1)q} = I_{1(n)q} \\ U_{2(n-1)d} = U_{1(n)d} \\ U_{2(n-1)q} = U_{1(n)q} \end{cases}, \quad (19)$$

где n – порядковый номер модуля в каскадном соединении; индекс 1 относится к входным параметрам модуля, 2 – к выходным параметрам модуля.

На четвертом этапе производится расчет переходного процесса. Сначала определяются независимые начальные условия электромагнитных

переходных процессов: токи всех ветвей с индуктивными элементами и напряжения всех емкостных элементов. Для электромеханических переходных процессов вычисляются частоты вращения роторов электрических машин. Эти электромагнитные и электромеханические параметры являются независимыми начальными условиями переходного процесса ЭТС, так как не могут измениться мгновенно [8,9]. Далее вычисляются входные и выходные напряжения модулей согласно расчетной схемы и входные и выходные токи модулей, не вошедшие в начальные независимые условия. В итоге, будут найдены все электрические и механические величины, описывающие режим работы ЭТС. Затем берется шаг интегрирования Δt и вычисляются параметры следующего режима работы ЭТС в два этапа аналогично исходному.

Для корректного расчета переходного процесса настраивается передача данных (токов и напряжений) между модулями. Напряжение передается от модуля $(n-1)$ к модулю n , от модуля n к модулю $(n+1)$ и т.д. Ток передается от модуля $(n+1)$ к модулю n , от модуля n к модулю $(n-1)$ и т.д. Этот подход построен на принципе, что напряжение определяется эквивалентной ЭДС ЭС, а токи в большей степени определяются подключенной нагрузкой.

Применим описанные выше подходы для рассматриваемой ЭТС, рис. 2. Начнем с определения независимых начальных условий, при этом модули перебираем от последнего к первому согласно принципу описанному ранее. По математической модели ПЭД (1)-(10) можно определить токи статора и ротора, а также угловую частоту вращения ротора по дифференциальным уравнениям. Затем найденный входной ток модуля ПЭД (ток статора) передается на модуль КЛ, этот модуль не требует дополнительных расчетов, так его входной ток равен выходному. Далее входной ток модуля КЛ передается на модуль трансформатора, для которого он является выходным. Остается найти только входной ток модуля трансформатора по

дифференциальным уравнениям (11)-(12). Потом входной ток модуля трансформатора передается на модуль ЭС, который не требует расчетов, так как у него входной ток равен выходному. В итоге получается система дифференциальных и алгебраических уравнений (1)-(12), которая позволяет определить все начальные независимые условия для расчета переходного процесса в ЭТС УЭЦН.

Вторая часть расчета переходного процесса заключается в определении входных и выходных напряжений модулей расчетной схемы ЭТС, так как все токи модулей являются независимыми начальными условиями. Для этого расчета составляется система алгебраических уравнений относительно искомых напряжений и дифференциалов токов модулей, при этом расчет производим с учетом соединения модулей между собой. Модуль ЭС (4 неизвестных) описывается уравнениями (17)-(18), к ним добавляется система уравнений (19), описывающая соединение двух модулей. Модуль трансформатора (8 неизвестных) включает в себя уравнения (11)-(14), к ним также добавляем систему (19). Модуль КЛ (6 неизвестных) описывается уравнениями (15)-(16), еще добавляем систему уравнений (19). Электрическая часть модуля ПЭД (6 неизвестных) состоит из уравнений (1)-(8), которые можно упростить подстановкой до четырех уравнений. В итоге получаем систему из 24 алгебраических уравнений с 24 неизвестными.

Таким образом, каждый промежуточный режим при расчете переходного процесса включает расчет систем дифференциальных уравнений и систем алгебраических уравнений, количество промежуточных режимов определяется шагом интегрирования Δt и временем переходного процесса.

Для моделирования переходных процессов была выбрана ЭТС УЭЦН, состоящая из оборудования, приведенного в таблице №1.

Таблица № 1

Оборудование ЭТС УЭЦН

Обозначение согласно рис. 1	Оборудование
ТМПН	Трансформатор ТМПН-160-0,4/1,25
КЛ	КПБК-90 3х16, длина 1300 м
ПЭД	Погружной асинхронный электродвигатель ЭД-63-117
Нагрузка ПЭД	Насос ЭЦН 5А-800

Значения сопротивлений схемы замещения ТМПН-160-0,4/1,25 взяты из работы [10]. Для КЛ были рассчитаны активное и индуктивное сопротивление на основе погонных данных из работы [11]. Параметры схемы замещения погружного асинхронного электродвигателя ЭД-63-117 были взяты из работы [10]. В качестве нагрузки ПЭД был взят насос ЭЦН 5А-800, момент сопротивления которого был задан вентиляторной характеристикой согласно выражению (10). Для расчетов использовались следующие значения моментов: момент сопротивления при трогании 0,3 о.е.; момент сопротивления при номинальной нагрузке 0,7 о.е. Значения моментов сопротивления записаны относительно номинального момента электродвигателя. Момент инерции насоса был принят $0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, исходя из массогабаритных параметров [12]. Для уменьшения влияния ЭС активное сопротивление не учитывали, индуктивное сопротивление было принято равным 0,01 Ом. Затем все схемы замещения были пересчитаны в относительные единицы, за базисную мощность была принята активная мощность ПЭД $S_6=63 \text{ кВА}$, за базисное напряжение – номинальное напряжение ПЭД $U_6=1040 \text{ В}$ и за базисную угловую частоту – синхронная частота ЭС $\omega_6=314 \text{ рад/с}$.

Расчет переходных процессов заключается в решении систем дифференциальных и алгебраических уравнений. Для этого был использован программный пакет Mathcad 15. Дифференциальные уравнения решались

методом Рунге-Кутты четвертого порядка, а алгебраические – матричным методом.

В качестве первого переходного процесса был выбран прямой пуск ПЭД с подключенным насосом. На рис. 6 приведены зависимости продольной и поперечной составляющих тока статора, а также угловой частоты вращения ротора от момента пуска до выхода на установившийся режим. Согласно результатам моделирования, при пуске максимальное значение продольной составляющей тока статора составило 4,74 о.е., а максимальное значение поперечной составляющей тока статора – 2,86 о.е. В установившемся режиме работы ПЭД значение продольной составляющей тока статора равно 0,56 о.е., а значение поперечной составляющей тока статора – 0,74 о.е. Через $t=52$ о.е. после начала пуска частота вращения ротора достигает номинального значения 0,98 о.е., затем наблюдаются ее небольшие колебания возле этого значения, обусловленные особенностями расчета по математическим моделям [13].

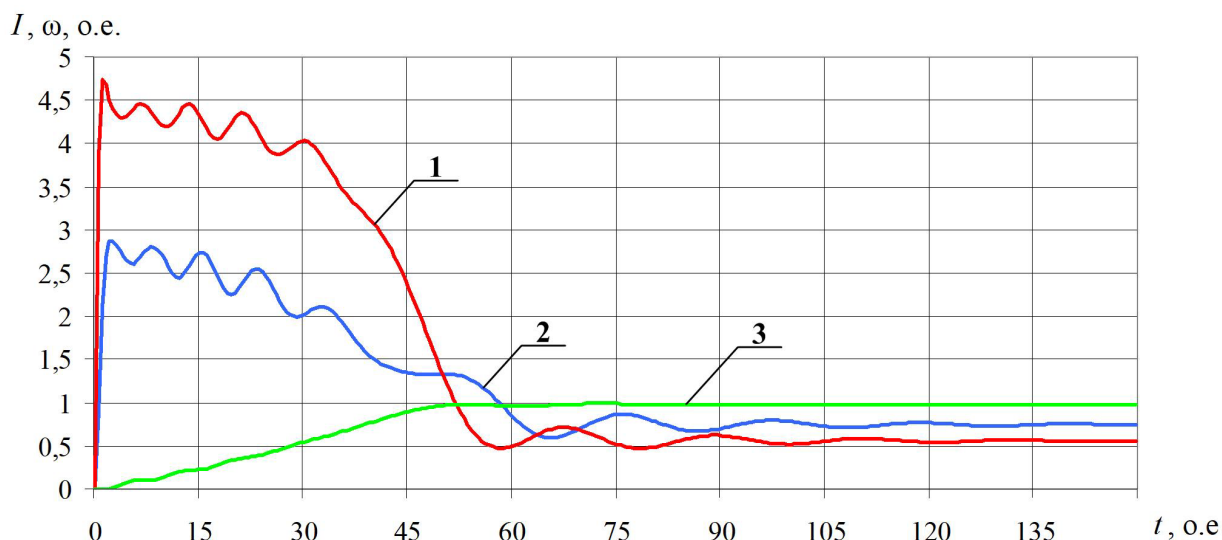


Рис. 6. – Графики зависимостей при пуске ПЭД: 1 – продольная составляющая тока статора; 2 – поперечная составляющая тока статора; 3 – угловая частота вращения ротора

Основным возмущающим воздействием на ЭТС являются провалы напряжения, возникающие в результате коротких замыканий в энергосистеме [14,15]. В связи с этим было выполнено моделирование провала напряжения с остаточным напряжением $U_{ост}=0,5$ о.е. на входе ЭТС в момент времени $t=30$ о.е., до этого момента ПЭД работал в установившемся режиме. На рис. 7 приведены зависимости составляющих тока статора и угловой частоты вращения ротора.

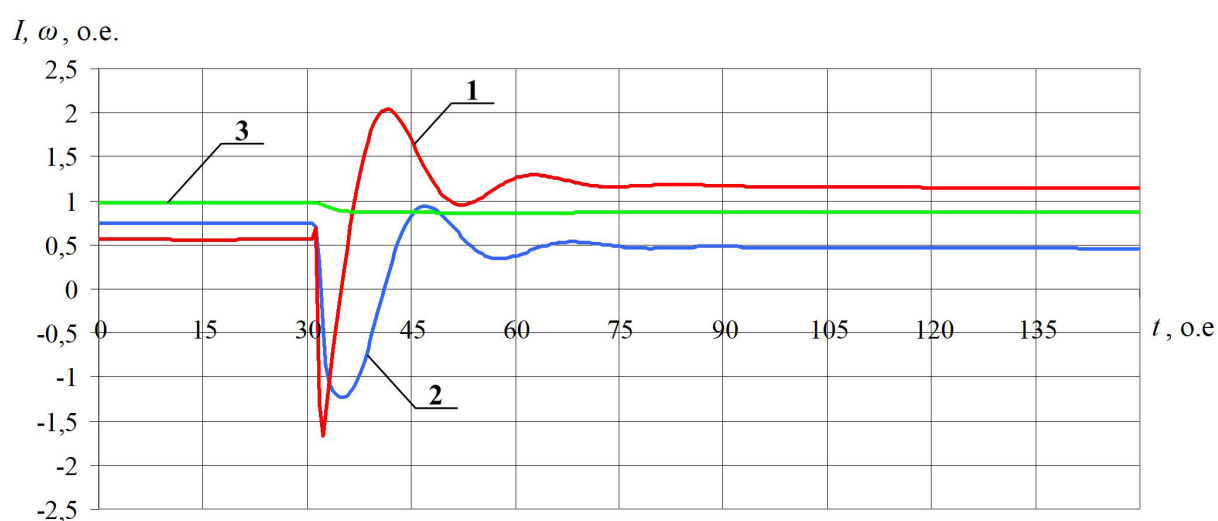


Рис. 7. – Графики зависимостей параметров ПЭД при провале напряжения: 1 – продольная составляющая тока статора; 2 – поперечная составляющая тока статора; 3 – угловая частота вращения ротора

После возникновения провала напряжения происходит увеличение тока статора: продольная составляющая тока статора достигает значения -1,67 о.е., поперечная составляющей тока статора – -1,23 о.е., при этом частота вращения ротора снижается до 0,86 о.е. Далее ПЭД выходит на новый установившийся режим, в котором значение продольной составляющей тока статора равно 1,14 о.е., а значение поперечной составляющей тока статора – 0,46 о.е., частота вращения ротора 0,87 о.е. ПЭД вышел на новый установившийся режим, так как коэффициент загрузки задан 0,7 о.е., а момент нагрузки задан вентиляторным. Этот результат согласуется с

работами [3,4,13], в которых показано значительное влияние коэффициента загрузки двигателей на их устойчивость при провалах напряжения.

Для оценки возможности полноценного расчета одноступенчатых провалов напряжения было смоделировано восстановление напряжения на входе ЭТС до номинального значения после его снижения в момент времени $t=30$ о.е. На рис. 8 приведены зависимости составляющих тока статора и угловой частоты вращения ротора. При восстановлении напряжения происходит увеличение тока статора: продольная составляющая достигает значения 3,43 о.е., поперечная составляющей тока статора – 2,24 о.е. Частота вращения ротора увеличивается в течение 19 о.е. и достигает своего номинального значения 0,98 о.е., после этого составляющие тока статора также стремятся к установившемуся режиму, соответствующему рис. 6.

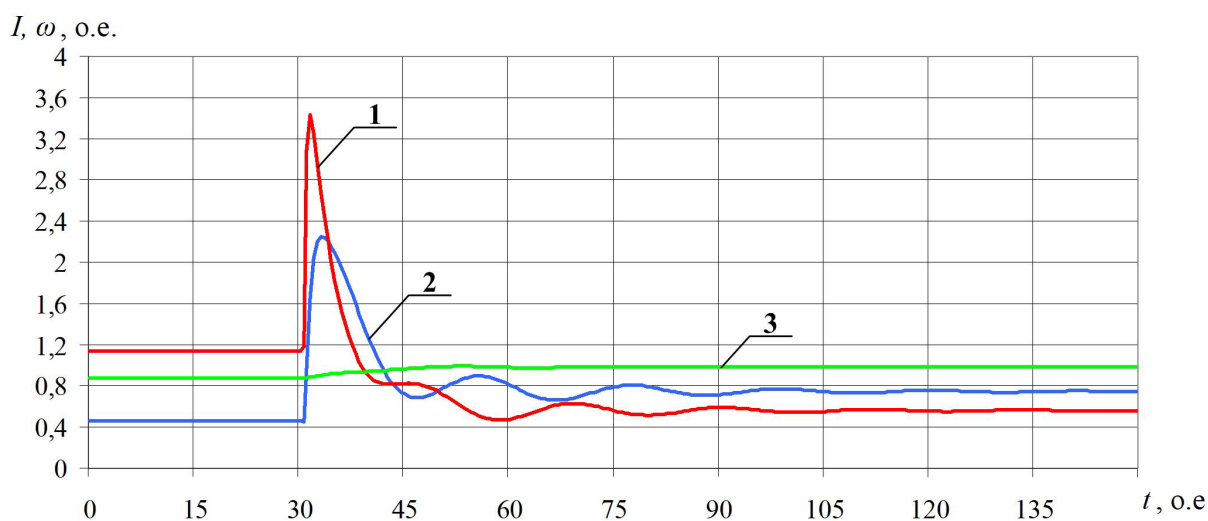


Рис. 8. – Графики зависимостей параметров ПЭД при восстановлении напряжения: 1 – продольная составляющая тока статора; 2 – поперечная составляющая тока статора; 3 – угловая частота вращения ротора

Затем было смоделировано отключение источника питания ЭТС, работавшей в установившемся режиме, в момент времени $t=30$ о.е. На рис. 9 приведены зависимости составляющих тока статора и угловой частоты вращения ротора. При отключении источника питания происходит

увеличение тока статора: продольная составляющая достигает значения -3,91 о.е., поперечная составляющей тока статора – -2,94 о.е. Далее составляющие тока и угловая частота вращения ротора снижаются до нуля. Ротор ПЭД остановится за время $t=137$ о.е.

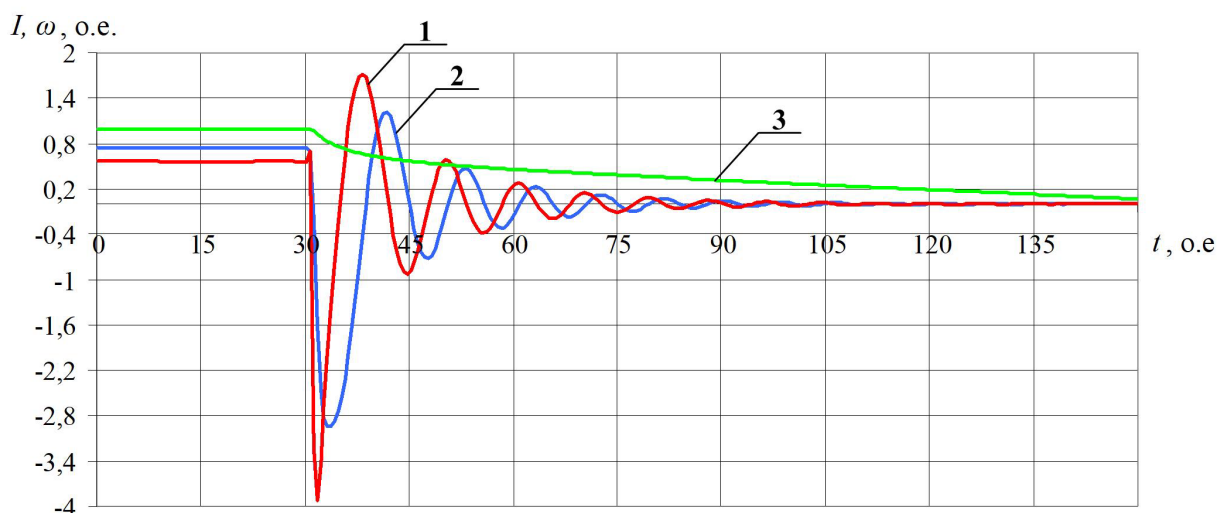


Рис. 9. – Графики зависимостей параметров ПЭД при отключении источника питания: 1 – продольная составляющая тока статора; 2 – поперечная составляющая тока статора; 3 – угловая частота вращения ротора

В итоге было смоделировано четыре переходных процесса как при снижении напряжения на входе ЭТС, так и при его повышении. При всех возмущающих воздействиях ток статора имел затухающие колебания и стремился к установившемуся значению, при этом у него не было разрывов, что объясняется первым законом коммутации. Электромеханическая составляющая переходного процесса была показана угловой частотой вращения ротора, которая также при всех моделируемых возмущениях стремилась к установившемуся значению.

Выводы

1. Составлена математическая модель ЭТС скважины для добычи нефти в виде отдельных модулей, содержащих алгебраические и

дифференциальные уравнения, что позволяет моделировать динамические и установившиеся режимы работы системы.

2. Получены зависимости продольной и поперечной составляющих тока статора и частоты вращения ротора ПЭД при пуске, провале напряжения и отключении источника питания. Установлено, что во всех моделируемых режимах ток статора изменялся по колебательному закону и стремился к установившемуся режиму, частота вращения ротора изменялась по аperiodическому закону и также стремилась к установившемуся значению.

Благодарность

Статья подготовлена в рамках реализации гранта ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (проект «Программный комплекс поддержки принятия решений по обеспечению надёжности и устойчивости функционирования электротехнической системы нефтяного промысла»).

Литература

1. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. 487 с.
2. Уразаков К.Р. Основные направления развития техники и технологии механизированной добычи нефти // Нефтяное хозяйство. 2007. № 8. С. 126-127.
3. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Поляков В.Е. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. 2010. № 9. С. 104-106.
4. Лосев Ф. А., Сушков В. В. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла

асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 94-98.

5. Глазырин А.С., Попов Е.И., Копырин В.А., Хамитов Р.Н., Боловин Е.В., Попов С.С., Беляускене Е.А. Проекционная идентификация параметров настраиваемой математической модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением // Инженерный вестник Дона, 2025, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10341.

6. Галеева Р.У., Куксов С.В. Алгоритм моделирования самозапуска группы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 3. С. 181-193.

7. Славутский А. Л. Моделирование переходных режимов узла нагрузки с асинхронным двигателем в фазных координатах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. №1. С. 38-45.

8. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.

9. Олейников К. А. Синтез векторной системы управления двигателем электромобиля с прямым регулированием момента // Инженерный вестник Дона, 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6738.

10. Глазырин А.С., Исаев Ю.Н., Копырин В.А., Тимошкин В.В., Кладиев С.Н., Хамитов Р.Н., Ковалев В.З., Лосев Ф.А., Леонов А.П., Попов Е.И. Переходные процессы в электротехническом комплексе добывающей скважины с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. № 5. С. 168–180.

11. Глазырин А.С., Исаев Ю.Н., Кладиев С.Н., Леонов А.П., Раков И.В., Колесников С.В., Ланграф С.В., Филипас А.А., Копырин В.А., Хамитов Р.Н.,

Ковалев В.З. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 9. С. 154–167.

12. Каталог компании АЛМАЗ-Нефтесервис. URL: almaz-neft.ru.

13. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: ООО «Издательский дом «Недра», 2010. 319 с.

14. Caicedo J. E., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E., Meyer J. A Systematic Review of Real-Time Detection and Classification of Power Quality Disturbances // Protection and Control of Modern Power Systems. 2023. №1. pp. 1-37.

15. Li S., Wang Y., Yu H., Xiao X., He H. Detection Methodology for Multistage Voltage Sag Based on Residual Analysis // 21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Chengdu, China, 2024. pp. 508-512.

References

1. Menshov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D. Ehlektrotekhnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoy promyshlennosti [Electrotechnical units and complexes in the oil and gas industry]. Moskva: Nedra Publ., 2000. 487 p.

2. Urazakov K.R. Neftyanoye khozyaystvo. 2007. № 8. pp. 126–127.

3. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Polyakov V.E. Neftyanoye khozyaystvo. 2010. № 9. pp. 104–106.

4. Losev F. A., Sushkov V. V. Omskiy nauchnyy vestnik. 2018. № 4 (160). pp. 94-98.

5. Glazyrin A.S., Popov YE.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Bolovin YE.V., Popov S.S., Belyauskene YE.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10341.
 6. Galeeva R.U., Kuksov S.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2021. № 3. pp. 181-193.
 7. Slavutskiy A. L. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy. 2015. №1. pp. 38-45.
 8. Venikov V.A. Perekhodnye elektromekhanicheskie processy v elektricheskikh sistemah [Transient electromechanical phenomena in electrical systems]. Moskva: Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.
 9. Oleynikov K. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6738.
 10. Glazyrin A.S., Isayev YU.N., Kopyrin V.A., Timoshkin V.V., Kladiyev S.N., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Losev F.A., Leonov A.P., Popov YE.I. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2023. № 5. pp. 168–180.
 11. Glazyrin A.S., Isayev YU.N., Kladiyev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2021. № 9. pp. 154–167.
 12. Katalog kompanii ALMAZ-Nefteservis [ALMAZ Oilfield Service product list]. URL: almaz-neft.ru.
 13. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. Ustoychivost promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem [Stability of the industrial electrotechnical systems]. Moskva: Nedra Publ., 2010. 319 p.
 14. Caicedo J. E., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E., Meyer J. Protection and Control of Modern Power Systems. 2023. №1. pp. 1-37.
-



15. Li S., Wang Y., Yu H., Xiao X., He H. 21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Chengdu, China, 2024. pp. 508-512.

Дата поступления: 5.11.2025

Дата публикации: 20.12.25