

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ПОВЫШЕННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ

А.Г. Городнов¹, В.Ю. Корнилов², Е.Ю. Федоров¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.
Туполева - КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
gorodnov_kai@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы определения энергетических параметров мехатронных модулей электротехнических комплексов для добычи нефти с погружными электроцентробежными насосами. Разработать методику определения параметров схемы замещения погружного электродвигателя, как электромеханического модуля движения центробежного насоса для добычи нефти при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя. Разработать методику расчета энергетических показателей мехатронных модулей электротехнического комплекса с электроцентробежными насосами. Провести имитационное моделирование погружного электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялись методы оптимизации по коэффициенту полезного действия, методы коррекции коэффициента мощности, методы расчета электромагнитного поля конечными элементами, методы математического и компьютерного моделирования в программном комплексе ELCUT. РЕЗУЛЬТАТЫ. Повышение энергоэффективности и снижение затрат при эксплуатации погружных насосных установок добычи нефти представляет собой актуальную проблему и требует обоснованного решения. Цена извлеченной нефти зависит от следующих показателей, таких как климатические условия, используемое оборудование, глубина залежей нефти, отдаленность месторождения от центральных дорог и так далее. К наиболее существенным энергоемким процессам при добыче нефти относятся: электромеханизированное извлечение нефти, транспортировка нефти, система поддержания пластового давления. Предложена методика нахождения параметров схемы замещения погружного электродвигателя для добычи нефти и исследование воздействия компенсации реактивной мощности на электрический двигатель в нефтяной скважине при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса. Предложена методика расчета энергетических показателей мехатронных модулей электротехнического комплекса с электроцентробежными насосами. Расчет компенсирующего устройства в нефтяной скважине для электроцентробежного насоса с частотно-регулируемым электроприводом нужно реализовывать с учетом наибольшего значения выдаваемой частоты сети. Произведено имитационное моделирование электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством для установления воздействия компенсирующего устройства реактивной мощности внутри нефтяной скважины на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти. Представлены показатели электромагнитного момента и электромагнитного поля электродвигателя для добычи нефти без подключенного компенсирующего устройства и с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого в первом варианте прокладываются по единой трассе и во втором варианте прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя для добычи нефти. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При проведении исследования влияния непосредственно подключенного компенсирующего устройства на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти определено, что дополнительные обмотки непосредственно подключенного компенсирующего устройства реактивной мощности, проложенные под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя повышают коэффициент полезного действия и электромагнитный момент

электрического двигателя для добычи нефти соответственно на 11% и 15%.

Ключевые слова: электротехнический комплекс; мехатронные модули; нефтедобыча; погружной электродвигатель, как электромеханический модуль движения; реактивная мощность; схема замещения; электромагнитный момент

Для цитирования: Городнов А.Г., Корнилов В.Ю., Федоров Е.Ю. Методика определения параметров схемы замещения электромеханического модуля с повышенным электромагнитным моментом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 3. С. 185-197. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197.

METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A SUBSTITUTION SCHEME FOR AN ELECTROMECHANICAL MODULE WITH AN INCREASED ELECTROMAGNETIC MOMENT WITH INCREASED ELECTROMAGNETIC TORQUE

A.G. Gorodnov¹, V.Yu. Kornilov², E.Yu. Fedorov¹

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gorodnov_kai@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the problems of determining the energy parameters of electrical equipment elements of electrical complexes for oil production with submersible electric centrifugal pumps. Develop a methodology for determining the parameters of the equivalent circuit of an electric motor for oil production when connecting compensating devices to the terminals of the electric motor of a submersible pump. Develop a methodology for calculating the energy performance of electrical equipment elements of an electrical complex with electric centrifugal pumps. Carry out simulation modeling of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device. *METHODS.* When solving the tasks set, optimization methods were used in terms of efficiency, power factor correction methods, methods for calculating the electromagnetic field by finite elements, methods of mathematical and computer modeling in the ELCUT software package. *RESULTS.* Improving energy efficiency and reducing costs in the operation of submersible pumping units for oil production is an urgent problem and dictates a reasonable solution. The price of extracted oil depends on the following indicators, such as climatic conditions, equipment used, depth of oil deposits, remoteness of the field from central roads, and so on. The most significant energy-intensive processes in oil production include: electromechanized oil extraction, oil transportation, reservoir pressure maintenance system. A technique for finding the parameters of the equivalent circuit of an electric motor for oil production and a study of the effect of reactive power compensation on an electric motor in an oil well when compensating devices are connected to the terminals of the electric motor of a submersible pump are proposed. A method for calculating the energy performance of electrical equipment elements of an electrical complex with electric centrifugal pumps is proposed. The calculation of a compensating device in an oil well for an electric centrifugal pump with a frequency-controlled electric drive must be implemented taking into account the highest value of the output network frequency. Simulation modeling of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device was carried out to establish the effect of a reactive power compensating device inside an oil well on the rotating electromagnetic moment of an electric motor for oil production. The indicators of the electromagnetic torque and the electromagnetic field of an electric motor for oil production without a connected compensating device and with a directly connected compensating device are presented, the supply wires of which in the first version are laid along a single route and in the second version are laid at an angle of 120 ° relative to each other in the corresponding grooves of the stator winding of the electric engine for oil production. *CONCLUSION.* When conducting a study of the effect of a directly connected compensating device on the electromagnetic torque of an electric motor for oil production, it was determined that additional windings of a directly connected reactive power compensating device, laid at an angle of 120 ° relative to each other in the corresponding grooves of the stator winding of the electric motor, increase the efficiency and

electromagnetic torque of an electric motor for oil production by 11% and 15%, respectively.

Keywords: *electrotechnical complex; oil production; submersible motor; reactive power; equivalent circuit; electromagnetic torque.*

For citation: Gorodnov A.G, Kornilov V.Yu., Fedorov E.Yu. Method for determining the parameters of a substitution scheme for an electromechanical module with an increased electromagnetic moment with increased electromagnetic torque. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3): 185-197. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197.

Введение

Актуальность темы заключается в повышении энергоэффективности элементов электрооборудования при извлечении нефти и снижении расходов при использовании насосных установок добычи нефти. В существующих условиях нефтегазовые предприятия являются важнейшим бюджетным сектором стран, обладающими соответствующими нефтяными и газовыми ресурсами. Цена извлеченной нефти зависит от следующих показателей, таких как климатические условия, используемое оборудование, глубина залежей нефти, удаленность месторождения от центральных дорог и т.д. К наиболее существенным энергоемким процессам при добыче нефти относятся: электромеханизированное извлечение нефти, транспортировка нефти, система поддержания пластового давления [1-3]. Например, в Российской Федерации общее энергопотребление нефтяной промышленностью достигает около 50 миллиардов киловатт в час за год.

При электромеханизированном извлечении нефти применяются насосы следующих видов: электроцентробежные насосы, винтовые насосы, глубинные штанговые насосы. Большая часть нефтяных скважин (54%) оборудована погружными электроцентробежными насосами и с помощью погружных электроцентробежных насосов извлекается около 75% нефти [4-6].

Высокая волатильность нефти и большие колебания цены нефти, с постоянно происходящим возрастанием тарифов на электрическую энергию приводят к нестабильности рынка энергоресурсов. Это в свою очередь побуждает искать способы и методы уменьшения расходов нефтедобывающих предприятий, к которым можно отнести повышение энергоэффективности элементов электрооборудования электротехнического комплекса добычи нефти.

Потребность в увеличении энергоэффективности элементов электрооборудования электротехнического комплекса добычи нефти имеет важное значение в труднодоступных областях, где доступность централизованной системы электроснабжения проблематична. Создание автономной системы электроснабжения на нефтедобывающем промысле имеет огромную стоимость, которая приводит в последующем к увеличенной стоимости тарифов на электрическую энергию.

Система электроснабжения на нефтедобывающем промысле охватывает следующие энергоемкие процессы:

- а) электромеханизированное извлечение нефти;
- б) система транспортирования нефти;
- в) система поддержания пластового давления.

Основная часть скважин с электромеханизированным извлечением нефти (54%) оснащена электроцентробежными насосами (ЭЦН), около 41% нефтяных скважин применяют штанговые глубинные насосы (ШГН). Остальные технологии извлечения нефти применяются реже: 3% фонтанирующие нефтяные скважины и 2% это все остальные способы извлечения нефти.

С использованием электрических центробежных насосов извлекается около 75% всей нефти, однако эффективность данных установок ниже чем погружных насосов. Главными потребителями электрической энергии на нефтедобывающих предприятиях являются электроприводы погружных насосов.

Для подъема и перекачки нефти, поддержания пластового давления на нефтедобывающих предприятиях используются управляемые электроприводы с соответствующими преобразователями частоты. Применение таких устройств с одной стороны приводит к целесообразному потреблению электрической энергии, но, с другой точки зрения это приводит к несинусоидальности токов и напряжений в электрической сети, что в свою очередь снижает качество электрической энергии.

Основным фактором данной проблемы является аппаратура, обладающая нелинейностью вольт-амперной характеристики. Преобразователь частоты - это характерная нелинейная нагрузка. Преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией широко применяется в электроприводе для регулирования скорости асинхронного двигателя, что позволяет классифицировать такой привод, как электромеханический модуль движения мехатронной системы основного оборудования добывающей скважины. Применение таких преобразователей частоты в электротехнических комплексах с различными режимами работы может уменьшить потребление электрической энергии на 10-25%.

Основной проблемой использования погружных насосных установок добычи нефти (рис. 1) является низкий коэффициент полезного действия (0,75) кабельной линии, протяжённость которой составляет до 3 км [7-9]. Среди немногочисленных способов и методов увеличения коэффициента полезного действия элементов электрооборудования электротехнического комплекса возможно применение компенсирующих устройств для уменьшения реактивной мощности, которая в свою очередь приводит к уменьшению полной мощности [10-12].

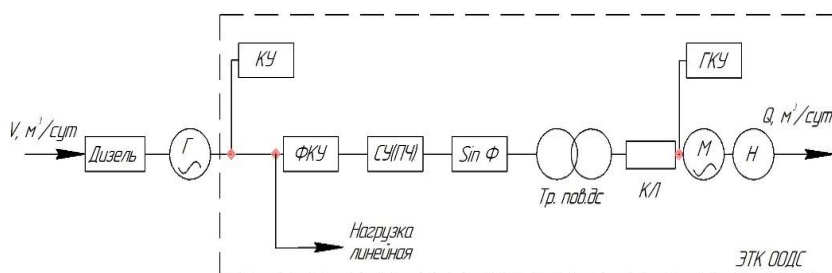


Рис. 1. Элементы электротехнического комплекса нефтедобычи

Fig. 1. Elements of the electrical complex of oil production

На рис. 1 отмечено: ЭТК ООДС – электротехнический комплекс основного оборудования добывающей скважины; Г – генератор; Тр. пов.дс – повышающий трансформатор добывающей скважины; ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство (выполняет роль сетевого фильтра); СУ (ПЧ) – станция управления с преобразователем частоты; SinΦ – синус-фильтр; КЛ – кабельная линия; М – погружной электродвигатель; КУ – компенсирующее устройство; ГКУ – глубинное компенсирующее устройство; Н – насос; V – суточный расход топлива в центрах генерации, м³/сут; Q – суммарный дебит добывающей скважины, м³/сут.

Преобразователь частоты, входящий в ЭТК ООДС способствует плавному пуску и управлению скоростью вращения электрического двигателя для добычи нефти, но из негативных явлений следует отметить, что данное устройство формирует в общую сеть высшие гармонические составляющие, приводящие к уменьшению коэффициента мощности. Для устранения высших гармонических составляющих возможно применение фильтрокомпенсирующих устройств с одновременным увеличением коэффициента мощности [13-14].

Расходуемая насосом мощность состоит из мощности, потребляемой на извлечение нефти, то есть полезной мощности, а также потерь мощности в насосе. Основные потери мощности при извлечении нефти электроцентробежным насосом изображены на рис. 2.

В данной работе предлагается методика нахождения параметров схемы замещения погружного электродвигателя для добычи нефти и исследование воздействия компенсации реактивной мощности на электрический двигатель в нефтяной скважине при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса.

Научная значимость заключается в разработке методики определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя для добычи нефти при непосредственном подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса и методики расчета энергетических показателей элементов электрооборудования электротехнического комплекса с электроцентробежными насосами, обеспечивающие повышение коэффициента полезного действия электротехнического комплекса добывающей скважины.

Практическая значимость заключается в повышении коэффициента полезного действия электротехнического комплекса добывающей скважины с асинхронным погружным электродвигателем с дополнительными обмотками и устройством компенсации реактивной мощности для установки электроцентробежного насоса добычи нефти и техническими рекомендациями по проектированию электротехнического комплекса с погружным электродвигателем для установки электроцентробежного насоса добычи нефти, которые обеспечивают снижение удельного расхода электроэнергии на единицу объема добываемой нефти не менее чем на 10%.

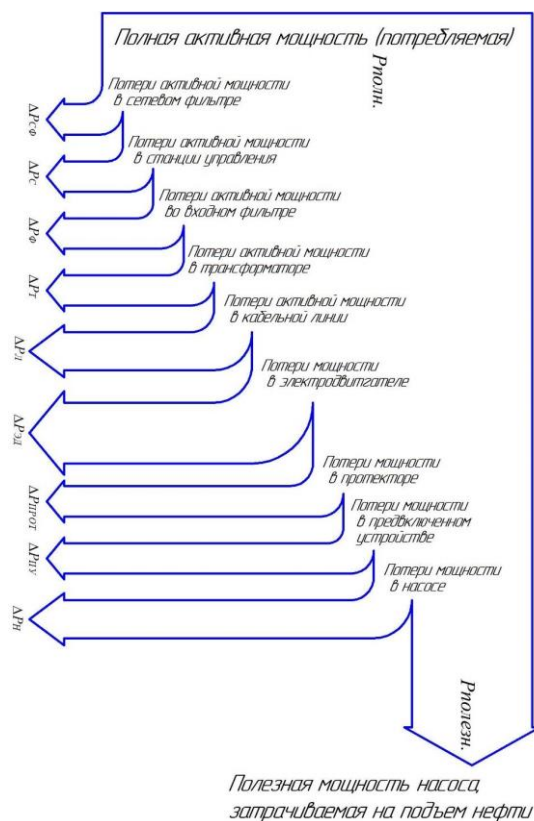


Рис. 2. Потери активной мощности при извлечении нефти ЭЦН

Fig. 2. Loss of active power during oil extraction by an electric submersible pump

Материалы и методы

Поправка коэффициента мощности благодаря применению компенсирующих устройств реактивной мощности и поправка коэффициента мощности благодаря уменьшению гармоник тока позволяет получить некоторые положительные результаты. Первый результат сводится к тому, что уменьшается полная мощность, что далее приводит к снижению расхода электрической энергии. Второй результат сводится к тому, что с понижением реактивной мощности снижается ток, проходящий через элементы электрооборудования электротехнического комплекса для извлечения нефти.

Методика нахождения параметров элементов электрооборудования электротехнического комплекса ЭЦН состоит из следующих пунктов [15-16]:

1. Определение параметров электродвигателя для извлечения нефти согласно характеристикам ЭЦН.
2. Определение мощности отдельного компенсирующего устройства электродвигателя для извлечения нефти.
3. Определение параметров кабельной линии электрического двигателя для извлечения нефти.
4. Определение параметров синус-фильтра, исходя из поправки коэффициента мощности.
5. Определение параметров трансформатора, повышающего напряжение.
6. Определение параметров преобразователя частоты для частотно-регулируемого электропривода.
7. Определение параметров фильтрокомпенсирующего устройства.

8. Определение параметров компенсирующего устройства на стороне 0,4кВ понижающего трансформатора.

9. Определение параметров трансформатора 0,4кВ.

10. Разработка системы электроснабжения элементов электрооборудования электротехнического комплекса для добычи нефти.

Определение параметров отдельного глубинного компенсирующего устройства электродвигателя для извлечения нефти с частотно-регулируемым электроприводом нужно производить исходя из наибольшей частоты электрической сети, данное условие обосновано для предупреждения режима перекомпенсации.

Результаты исследования соотношений емкостной реактивной мощности и индуктивной реактивной мощностей компенсирующего устройства электрического двигателя для извлечения нефти от частоты электрической сети изображены на рис. 3. Согласно данным исследованиям, например, для частоты 55Гц необходимо подобрать поправочный коэффициент, составляющий значение 0,77.

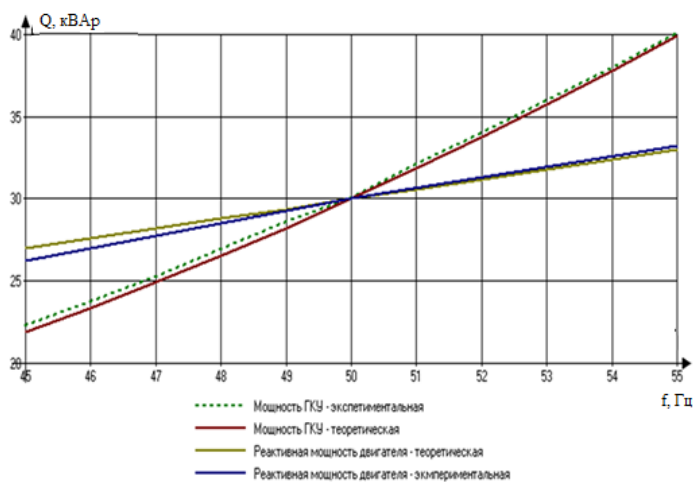


Рис. 3. Соотношения емкостной реактивной мощности и индуктивной реактивной мощностей компенсирующего устройства электрического двигателя для извлечения нефти от частоты электрической сети

Fig. 3. Ratios of capacitive reactive power and inductive reactive power of the compensating device of the electric motor for oil extraction from the frequency of the electrical grid

Для нахождения параметров элементов электрооборудования электротехнического комплекса ЭЦН разработана схема замещения электродвигателя для извлечения нефти при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса, питающие провода которого в первом варианте прокладываются по единой трассе и во втором варианте прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя для добычи нефти [17] (рис. 5).

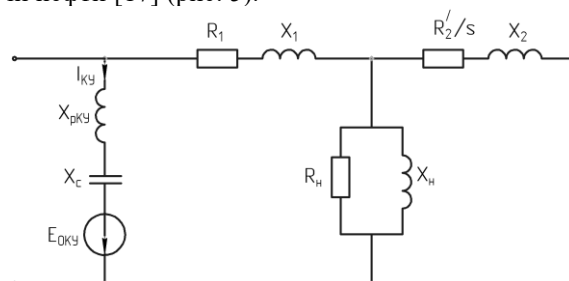


Рис. 4. Схема замещения электрического двигателя для извлечения нефти при подключении компенсирующего устройства к клеммам электродвигателя ЭЦН

Fig. 4. The equivalent circuit of an electric motor for oil recovery when a compensating device is connected to the terminals of the ESP motor

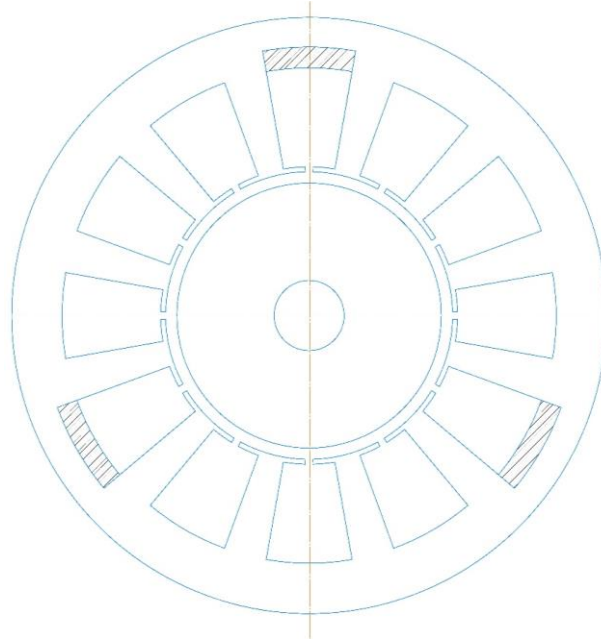


Рис. 5. Расположение проводов компенсирующего устройства в пазах обмотки статора электродвигателя

Fig. 5. Arrangement of the wires of the compensating device in the grooves of the stator winding of the electric motor

Емкостное реактивное сопротивление:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

где ω - угловая частота, C - емкость конденсатора.

Полная реактивная мощность компенсирующего устройства (КУ):

$$Q_{КУ} = \frac{U^2}{X_c} \quad (2)$$

где U - напряжение в сети.

Напряжение на емкостном элементе:

$$U_c = U_1 - jX_{pКУ}I_{КУ} - E_{0КУ} \quad (3)$$

где U_1 - напряжение в статоре, $X_{pКУ}$ - сопротивление компенсирующего устройства, $I_{КУ}$ - ток компенсирующего устройства, $E_{0КУ}$ - ЭДС КУ.

$$Q_{КУ} = Q_{pКУ} + Q_1 + Q_2 + Q_n \quad (4)$$

где $Q_{pКУ}$ - реактивная мощность КУ, Q_1 - реактивная мощность в статоре двигателя, Q_2 - реактивная мощность в роторе двигателя, Q_n - реактивная мощность нагрузки.

$$Q_{pКУ} = X_{pКУ}I_{КУ}^2 \quad (5)$$

$$Q_1 = X_1I_2^2 \quad (6)$$

где X_1 - реактивное сопротивление статора, I_2 - ток ротора.

$$Q_2 = X_2I_2^2 \quad (7)$$

где X_2 - реактивное сопротивление ротора.

$$Q_n = X_nI_n^2 \quad (8)$$

где X_n - реактивное сопротивление нагрузки, I_n - ток нагрузки.

$$E_{0КУ} = \kappa_{обКУ}E_1 \quad (9)$$

где $\kappa_{обКУ}$ - обмоточный коэффициент компенсирующего устройства, E_1 - ЭДС статора.

Так как $E_1 \approx U_1$, тогда:

$$E_{0\text{КУ}} = \kappa_{0\text{КУ}} U_1 \quad (10)$$

$$\kappa_{0\text{КУ}} = \frac{w_1 \kappa_{0\text{б1}}}{\kappa_{0\text{бКУ}}} \quad (11)$$

$$\kappa_{0\text{бКУ}} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

Результаты и обсуждение

Для создания имитационной модели разработанной установки ЭЦН с электродвигателем, к клеммам которого подключено компенсирующее устройство, питающие провода которого прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя можно воспользоваться специализированной программой ELCUT. ELCUT - это актуальная программа для имитационного моделирования тепловых, механических и электромагнитных задач способом конечных элементов. Данная специализированная программа позволяет осуществлять решение таких задач как:

- а) определение параметров электрического поля:
 - электростатическое поле.
 - электрическое поле от постоянных токов.
 - электрическое поле от переменных токов.
 - электрическое поле нестационарное.
- б) определение параметров магнитного поля:
 - магнитостатическое поле.
 - магнитное поле от переменных токов (в том числе вихревых токов).
 - магнитное поле нестационарное (в том числе нелинейных материалов и вихревых токов).

Для решения задачи имитационного моделирования магнитного поля, возникающего от переменных токов необходимо указать электропроводность, две составляющих магнитной проницаемости и реальный источник электромагнитного поля.

К первоначальным параметрам электрического двигателя для извлечения нефти относятся: коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, мощность, напряжение, ток статора, скольжение, частота электрической сети, число пар полюсов, кратность пускового момента, частота вращения вала, момент инерции, кратность пускового тока [18-19].

Цель эксперимента – определение воздействия компенсирующего устройства реактивной мощности, питающие провода которого прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя ЭЦН для извлечения нефти.

План эксперимента:

1. Получить значение полного вращающего электромагнитного момента погружного электродвигателя без компенсатора реактивной мощности.
2. Получить значение полного вращающего электромагнитного момента электродвигателя ЭЦН для извлечения нефти, питающие провода компенсирующего устройства прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя, проложенными по одной трассе.
3. Получить значение полного вращающего электромагнитного момента электродвигателя ЭЦН для извлечения нефти, питающие провода компенсирующего устройства прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя, проложенные под углом 120° относительно друг друга

На рис. 6-8 представлены результаты исследования электромагнитного поля и электромагнитного момента погружного электродвигателя без компенсирующего устройства реактивной мощности и с компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя, проложенные по одной трассе и под углом 120° относительно друг друга.

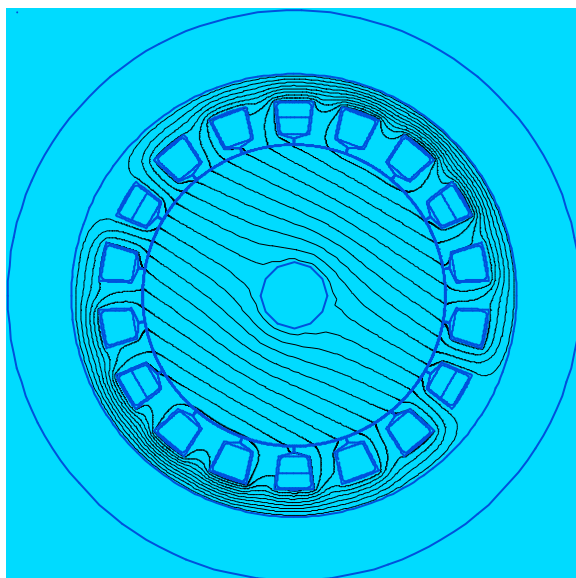


Рис. 6. Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя ЭЦН без компенсирующего устройства реактивной мощности ($M = 14301 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

Fig. 6. Total electromagnetic torque of the ESP motor without a reactive power compensating device ($M = 14301 \text{ N} \cdot \text{m}$)

Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя ЭЦН без компенсирующего устройства реактивной мощности $M = 14301 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются по единой трассе в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя $M = 14265 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя $M = 16111 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

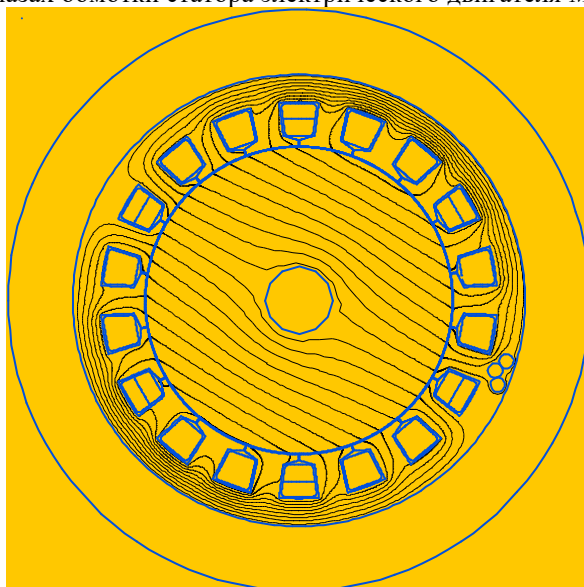


Рис. 7. Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются по единой трассе ($M = 14265 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

Fig. 7. Total electromagnetic torque of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device, the supply wires of which are laid along a single route ($M = 14265 \text{ N} \cdot \text{m}$)

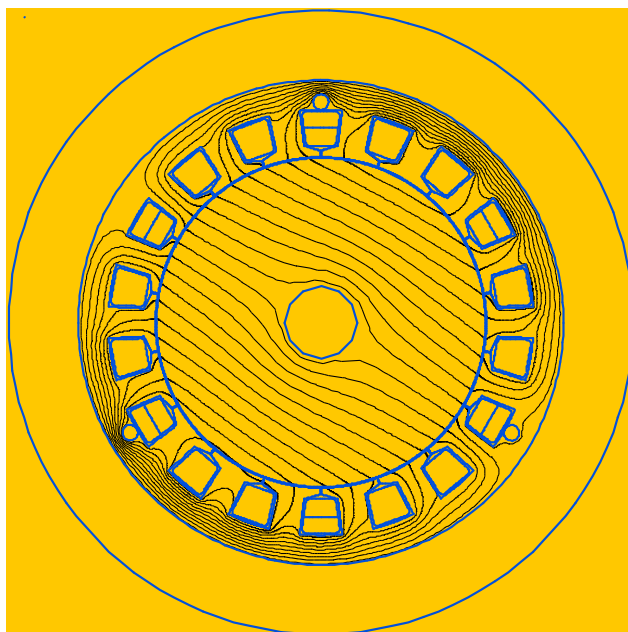


Рис. 8. Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются под углом 120° относительно друг друга ($M = 16111 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

Fig. 8. Total electromagnetic torque of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device, the supply wires of which are laid at an angle of 120° relative to each other ($M = 16111 \text{ N} \cdot \text{m}$)

Выводы

При проведении исследования влияния непосредственно подключенного компенсирующего устройства на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти определено, что дополнительные обмотки непосредственно подключенного компенсирующего устройства реактивной мощности, проложенные под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя повышают коэффициент полезного действия и электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти соответственно на 11% и 15%.

Разработана методика расчета и определения параметров схемы замещения электродвигателя для извлечения нефти при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса, питающие провода которого в первом варианте прокладываются по единой трассе и во втором варианте прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя для добычи нефти.

Литература

1. Gabor Takacs. Electrical Submersible Pumps Manual. - 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. - 440 p.
2. Xiaodonz Liang, Ahmad El-Kadri, "Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation" in Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.
3. O.V. Thorsen, M. Dalva, "Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps" in Transactions on Industry Applications, 2001, Volume 37, Issue 2. pp. 541-547
4. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. - Volume 53, Issue 3. – pp. 3164-3174
5. A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat, "A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system" in International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.

6. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez, "Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique" in *ANDESCON*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.

7. Power factor correction and harmonic filtering in electrical installations // Series of a design engineer. ABB. 2018. 58 p.

8. F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov, F. F. Khusainov and I. N. Shafikov, "Analysis of losses in the cable line of well submersible electric motor," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076285.

9. J. Zhang and J. Wan, "Application of the cable laying coiled tubing in electric submersible pump," 2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP), 2021, pp. 293-296, doi: 10.1109/ICMSP53480.2021.9513368.

10. I. Shafikov and M. Khakimyanov. Assessment of Reliability of the Electric Submersible Pump Variable Frequency Drive. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112074.

11. F.A. Gizatullin, M.I. Khakimyanov and F.F. Khusainov. Technological Parameters Influence on Energy Intensity of Oil Wells Pumps. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728790.

12. A. Yashin and M. Khakimyanov, "Characteristics Analysis of Linear Submersible Electric Motors for Oil Production," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 2020, pp. 15-19, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234346.

13. Букреев В. Г. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия / В. Г. Букреев, Н. Ю. Сипайлова, В. А. Сипайлов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 75-84.

14. Невоструев, В. А. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. 2017. № 8. С. 28-32.

15. Городнов А.Г. Построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 4. С. 64-78.

16. Gorodnov A., Fedorov E., Kornilov V., Al-Ali M.A. Submersible pumping unit with increased electromagnetic moment of the submersible electric motor/ Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. 2021. С. 363-366.

17. Городнов А.Г., Корнилов В.Ю., Федоров Е.Ю. Погружная насосная установка с повышенным электромагнитным моментом погружного электродвигателя Патент на полезную модель RU 205204 U1, 02.07.2021.

18. V. A. Kopyrin, A. L. Portnyagin, A. V. Logunov, N. V. Shatalova, M. V. Deneko and R. N. Khamitov, "Investigation of Resonance Effect in the Oil Production Electrotechnical Complex with the Downhole Reactive Power Compensator," 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944635.

19. V. A. Kopyrin, M. V. Deneko, E. A. Engel and R. N. Khamitov, "Determination of the Downhole Compensator's Optimal Power Considering the Cable Line's Length and Cross Section," 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.

Авторы публикации

Городнов Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ.

Корнилов Владимир Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета.

Федоров Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ.

References

1. Gabor Takacs. Electrical Submersible Pumps Manual. - 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. - 440 p.
2. Xiaodong Liang, Ahmad El-Kadri, "Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation" in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.
3. O.V. Thorsen, M. Dalva, "Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps" in *Transactions on Industry Applications*, 2001, Volume 37, Issue 2. pp. 541-547
4. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2017. - Volume 53, Issue 3. – pp. 3164-3174
5. A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat, "A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system" in *International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
6. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez, "Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique" in *ANDESCON*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.
7. Power factor correction and harmonic filtering in electrical installations // Series of a design engineer. - ABB. - 2018. -- 58 p.
8. F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov, F. F. Khusainov and I. N. Shafikov, "Analysis of losses in the cable line of well submersible electric motor," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076285.
9. J. Zhang and J. Wan, "Application of the cable laying coiled tubing in electric submersible pump," 2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP), 2021, pp. 293-296, doi: 10.1109/ICMSP53480.2021.9513368.
10. I. Shafikov and M. Khakimyanov, "Assessment of Reliability of the Electric Submersible Pump Variable Frequency Drive," 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112074.
11. F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov and F. F. Khusainov, "Technological Parameters Influence on Energy Intensity of Oil Wells Pumps," 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728790.
12. A. Yashin and M. Khakimyanov, "Characteristics Analysis of Linear Submersible Electric Motors for Oil Production," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 2020, pp. 15-19, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234346.
13. Bukreev V. G., Bukreev V. G., Sipailova N. Yu., Sipailov V. A. Management strategy for the electrical complex of mechanized oil production based on economic criteria // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. - 2017. - T. 328. - No. 3. - pp. 75-84.
14. Nevostruev, V. A. Integrated approach to energy efficiency in oil production ESP. *Inzhenernaya praktika*. - 2017. - No. 8. - S. 28-32.
15. Gorodnov A.G. Construction of energy-efficient electrical engineering complexes with an autonomous power supply system. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2020. V. 22. No. 4. pp. 64-78.
16. Gorodnov A., Fedorov E., Kornilov V., Al-Ali M.A. Submersible pumping unit with increased electromagnetic moment of the submersible electric motor/ *Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*. 2021. C. 363-366.
17. Gorodnov A.G., Kornilov V., Yu., Fedorov E.Yu. Submersible pumping unit with increased electromagnetic torque of the submersible motor Utility model patent RU 205204

U1, 07/02/2021.

18. V. A. Kopyrin, A. L. Portnyagin, A. V. Logunov, N. V. Shatalova, M. V. Deneko and R. N. Khamitov, "Investigation of Resonance Effect in the Oil Production Electrotechnical Complex with the Downhole Reactive Power Compensator," 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944635.

19. V. A. Kopyrin, M. V. Deneko, E. A. Engel and R. N. Khamitov, "Determination of the Downhole Compensator's Optimal Power Considering the Cable Line's Length and Cross Section," 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.

Authors of the publication

Anton G. Gorodnov - Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev- KAI.

Vladimir Yu. Kornilov - Dr. Tech. Sciences, Professor, Professor of the Instrument Engineering and Mechatronics Department, Kazan State Power Engineering University.

Evgenii Yu. Fedorov - Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev- KAI.

Получено

12.04.2022г.

Отредактировано

25.04.2022г.

Принято

30.04.2022г.