УДК 622.276.5; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-3.08
https://orcid.org/0009-0009-5625-7060
https://orcid.org/0000-0002-7680-7084

ПРИМЕНЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСАХ

Н.Б. ҒАДЫЛБЕКОВА,
магистрант,
na_gadylbekova@kbtu.kz

Д.А. ИСМАИЛОВА,
PhD, профессор,
j.ismailova@kbtu.kz

КАЗАХСКО-БРИТАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Толе би, 59

В статье рассматривается применение двигателей с постоянными магнитами в установках электроцентробежных насосов, используемых при добыче нефти. Выполнен сравнительный анализ таких двигателей и асинхронных машин по энергоэффективности, тепловому режиму и эксплуатационной надёжности.

Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной математической модели системы «двигатель-насос», объединяющей электрическую, механическую и гидравлическую подсистемы, и её апробации для глубокой офшорной скважины месторождения Y в программном комплексе Schlumberger DesignPro.

Результаты моделирования показали, что применение двигателя с постоянными магнитами позволяет существенно повысить КПД, снизить потребляемую мощность и уменьшить тепловую нагрузку на оборудование по сравнению с асинхронным двигателем.

Практическая значимость работы состоит в повышении энергоэффективности установки, увеличении межремонтного периода и снижении эксплуатационных затрат, что особенно важно для глубоких и высокотемпературных скважин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *электроцентробежный насос, двигатель с постоянными магнитами, асинхронный двигатель, энергоэффективность, нефтедобыча, DesignPro, энергосбережение, надёжность, моделирование.*

ЭЛЕКТР ОРТАЛЫҚТАН ТЕПКІШ СОРҒЫЛАРДА ТҰРАҚТЫ МАГНИТТІ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРДЫ ҚОЛДАНУ

Н.Б. ҒАДЫЛБЕКОВА, магистрант, *na_gadylbekova@kbtu.kz*
Д.А. ИСМАИЛОВА, PhD, профессор, *j.ismailova@kbtu.kz*

ҚАЗАҚ-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Қазақстан Республикасы, 050000, Алматы қ., Төле би к., 59

Мақалада мұнай өндіруде қолданылатын электр орталықтан тепкіш сорғы қондырғыларында тұрақты магнитті қозғалтқыштарды қолдану қарастырылған. Тұрақты магнитті және асинхронды қозғалтқыштар энергия тиімділігі, жылулық режимі және эксплуатациялық сенімділігі бойынша салыстырылды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы – электрлік, механикалық және гидравликалық ішкі жүйелерді біріктіретін «қозғалтқыш — сорғы» жүйесінің интегралданған математикалық моделін әзірлеу және оны Schlumberger DesignPro бағдарламалық кешенінде Y кен орнының терең офшорлық ұңғымасы жағдайында апробациялау.

Модельдеу нәтижелері тұрақты магнитті қозғалтқышты қолдану асинхронды қозғалтқышпен салыстырғанда ПӘК-ті арттыруға, тұтынылатын қуатты азайтуға және жабдықтың жылулық жүктемесін төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы қондырғының энергия тиімділігін арттырумен, жөндеуаралық кезеңді ұзартумен және пайдалану шығындарын азайтумен байланысты, бұл әсіресе терең және жоғары температуралы ұңғымалар үшін маңызды.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *электр орталықтан тепкіш сорғы, тұрақты магнитті қозғалтқыш, асинхронды қозғалтқыш, энергия тиімділігі, мұнай өндіру, энергия үнемдеу, сенімділік, модельдеу, DesignPro.*

APPLICATION OF PERMANENT MAGNET MOTORS IN ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMPS

N.B. GADYLBEKOVA, Master's student, *na_gadylbekova@kbtu.kz*
D.A. ISMAILOVA, PhD, Professor, *j.ismailova@kbtu.kz*

KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY
Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty, Tole Bi str. 59

This paper examines the use of permanent magnet motors in electrical submersible pump systems for oil production. Permanent magnet motors and induction motors are compared in terms of energy efficiency, thermal performance, and operational reliability.

The novelty of the study lies in the development of an integrated mathematical model of the "motor — pump" system, which combines electrical, mechanical, and hydraulic subsystems. The model was tested for a deep offshore well at the Y field using Schlumberger DesignPro.

The simulation results show that the use of a permanent magnet motor significantly increases efficiency, reduces power consumption, and lowers the thermal load on the equipment compared with an induction motor.

The practical significance of the study is associated with improved energy efficiency, longer overhaul intervals, and lower operating costs, which is especially important for deep and high-temperature wells.

KEYWORDS: *electrical submersible pump, permanent magnet motor, induction motor, energy efficiency, oil production, energy saving, reliability, modelling, DesignPro.*

Введение. Электроцентробежные насосы являются одним из основных способов механизированной добычи нефти на месторождениях Казахстана, России и других стран [1]. Рост глубины скважин, температуры пласта и обводнённости продукции приводит к повышению требований к энергоэффективности и надёжности погружных насосных систем [1, 2].

Традиционно в установках электроцентробежных насосов применяются трёхфазные асинхронные двигатели, отличающиеся конструктивной простотой и эксплуатационной устойчивостью. Однако для них характерны потери в роторе, сравнительно невысокие коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, а также повышенный тепловой режим, что снижает эффективность работы при частичных нагрузках и переменных режимах добычи [3, 4]. Это приводит к увеличению энергозатрат и сокращению ресурса оборудования.

В условиях роста тарифов на электроэнергию и ужесточения требований к снижению энергопотребления актуальным становится внедрение более эффективных технических решений. Одним из перспективных направлений является применение двигателей с постоянными магнитами, в которых магнитное поле формируется встроенными редкоземельными магнитами [5,6]. Отсутствие роторных потерь позволяет повысить коэффициент полезного действия, улучшить коэффициент мощности и снизить тепловую нагрузку [7, 8]. Кроме того, такие двигатели обладают более высокой удельной мощностью и меньшими габаритами, что важно для глубоких и наклонно-направленных скважин [6].

Практический опыт эксплуатации показывает, что применение двигателей с постоянными магнитами позволяет снизить энергопотребление, уменьшить температуру обмоток и увеличить межремонтный период работы установок электроцентробежных насосов [9–11].

Целью работы является обоснование целесообразности применения двигателей с постоянными магнитами в установках электроцентробежных насосов на основе сравнительного анализа, математического моделирования, расчётов энергосбережения и оценки промысловых данных.

Материалы и методы исследования

В работе использован комплекс методов, включающий сравнительный анализ, математическое моделирование и расчёт энергетических показателей установок ЭЦН.

Сравнительный анализ выполнен для асинхронных и магнитных двигателей по эксплуатационным и энергетическим характеристикам [3-8]. В качестве критериев оценки использованы коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, тепловой режим и параметры работы при переменной нагрузке.

Математическое моделирование установки «двигатель-насос» выполнено с учётом взаимосвязи электрической, механической и гидравлической подсистем [7]. Для описания электрической части использованы уравнения баланса напряжений, для механической – уравнение движения вращающейся системы, а для гидравлической – зависимости напора и расхода насоса [12].

Расчёт годового энергопотребления выполнен для электродвигателя мощностью 22 кВт с учётом коэффициента загрузки и времени эксплуатации. Расчёт ос-

нован на аналитических зависимостях, связывающих потребляемую мощность с КПД двигателя [4-8].

Моделирование работы установки ЭЦН в реальных условиях выполнено в программном комплексе DesignPro [5]. В расчётах учитывались параметры скважины месторождения Y, включая температуру, давление, дебит и свойства добываемой жидкости.

Для верификации результатов использованы данные промысловой эксплуатации, включающие показатели энергопотребления, температурного режима и надёжности оборудования [9-11].

Результаты и обсуждение

Верификация математической модели системы «двигатель-насос». В рамках настоящего исследования разработана интегрированная математическая модель системы «двигатель с постоянными магнитами — электроцентробежный насос», объединяющая электрическую, механическую и гидравлическую подсистемы [7]. Электрическая подсистема описывается уравнениями в системе координат d–q, учитывающими потокосцепление постоянных магнитов, активное сопротивление и индуктивность обмоток статора [3–7].

Механическая подсистема основана на уравнении динамики вращательного движения:

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_m - T_l,$$

где J – момент инерции вращающейся системы, кг·м²;
ω – угловая скорость, рад/с;
T_m – электромагнитный момент двигателя, Н·м;
T_l – момент нагрузки насоса, Н·м.

Соотношение электромагнитного момента двигателя и момента нагрузки насоса определяет режим разгона, установившуюся работу или торможение системы.

Гидравлическая подсистема включает квадратичную характеристику насоса [12]:

$$H = H_0 - K_Q Q^2,$$

где H – напор насоса, м;
H_0 напор при нулевом расходе, м;
Kq – коэффициент характеристики насоса;
Q –расход, м³/с.
Гидравлическая мощность определяется выражением:

$$P_h = \rho g Q H,$$

где Ph – гидравлическая мощность, Вт;
p – плотность жидкости, кг/м³;
g – ускорение свободного падения, м/с²;
Q – расход, м³/с;
H – напор, м.

Связь между гидравлической и механической подсистемами описывается выражением:

$$T_l = \frac{P_h}{\omega},$$

где T_l – момент нагрузки насоса, Н·м;
Ph – гидравлическая мощность, Вт;
ω – угловая скорость, рад/с.

Разработанная модель позволяет проводить симуляцию переходных и установившихся режимов при различных значениях дебита, давления и температуры пласта, что важно для анализа динамики системы при изменяющихся условиях эксплуатации скважины [7–12]. Результаты моделирования подтвердили, что двигатель с постоянными магнитами обеспечивает стабильное значение момента в широком диапазоне скоростей вращения и характеризуется минимальными потерями в роторе. Это принципиально отличает его от асинхронного двигателя, в котором роторные потери являются неотъемлемой частью рабочего процесса.

Результаты моделирования в программном комплексе DesignPro (кейс Y-field). Для практической верификации теоретических выводов выполнена симуляция установки электроцентробежного насоса в специализированном программном комплексе Schlumberger DesignPro на основе данных офшорного месторождения Y в Северном море [5].

Условия моделирования: глубина скважины – 3500 м, пластовая температура – 85 °С, давление на приёме – 181 бар, дебит – 105 м³/сут, обводнённость – 77%, газовый фактор – 200 м³/м³.

Подобранная конфигурация системы включает насос REDA 400 RC1000 с 300 ступенями, газосепаратор VGSA, защитный модуль LSBPB, двигатель с постоянными магнитами мощностью 90 кВт и кабель длиной 3530 м при рабочей частоте 50,5 Гц.

Симуляция подтвердила выполнение целевых показателей: фактический дебит составил 105,08 м³/сут при динамическом напоре 1829 м, давлении на приёме 181,14 бар и давлении на выкиде 358,61 бар. Эти результаты свидетельствуют о том, что выбранная конфигурация насоса способна преодолевать гидростатические и фрикционные потери в стволе скважины при заданных пластовых условиях [12].

Ключевым результатом сравнительного анализа является существенное превосходство двигателя с постоянными магнитами по энергетическим показателям. Его коэффициент полезного действия составил 94,82% против 76,86% у асинхронного двигателя, что соответствует разнице в 17,96 процентного пункта. Потребляемая мощность установки при использовании двигателя с постоянными магнитами составила 41,1 кВт, тогда как при применении асинхронного двигателя – 81,1 кВт. Таким образом, сокращение энергопотребления достигает примерно 49% [8, 13].

Данный результат обусловлен отсутствием роторных токов и потерь скольжения в двигателе с постоянными магнитами: магнитное поле обеспечивается постоянными магнитами, а не индуцированными токами, что снижает джоулевы потери [4–7]. Снижение потребляемого тока также уменьшает потери в кабеле, пропорциональные I^2R, что особенно актуально для скважин глубиной свыше 3000 м, где длина кабеля превышает 3,5 км.

Таблица 1 – **Сравнение энергетических показателей двигателя с постоянными магнитами и асинхронного двигателя при моделировании в DesignPro**

Параметр	ДПМ	Асинхронный двигатель
КПД	94,82%	76,86%
Рабочий ток	28,3 А	45,3 А
Коэффициент мощности	98,9%	69,67%
Потребляемая мощность	41,1 кВт	81,1 кВт

Анализ чувствительности системы. Анализ чувствительности показал устойчивость спроектированной системы к вариациям основных эксплуатационных параметров [5]. При изменении дебита в допустимом диапазоне система сохраняет работоспособность без критического снижения коэффициента полезного действия. Умеренное изменение давления на приёме не оказывает существенного влияния на общую производительность, тогда как регулирование частоты питающего напряжения в диапазоне, близком к 50,5 Гц, является наиболее эффективным инструментом адаптации системы к изменяющимся условиям [3–7].

Это особенно важно с учётом аффинных законов подобия центробежных машин: дебит пропорционален частоте, напор — квадрату частоты, а мощность — кубу частоты. Следовательно, частотно-регулируемый привод в сочетании с двигателем с постоянными магнитами является эффективным решением для адаптивного управления подъёмом жидкости при изменяющихся пластовых условиях [7].

Анализ тепловых режимов и надёжности. Сравнительный анализ тепловых режимов подтвердил преимущество двигателя с постоянными магнитами при работе в условиях глубокой скважины месторождения Y. Более высокий коэффициент полезного действия означает, что меньшая доля подводимой энергии рассеивается в виде тепла. В результате температура обмоток остаётся ниже, что замедляет термическое старение изоляции и повышает ресурс двигателя [4–8].

Анализ статистики отказов по данным 120 установок электроцентробежных насосов с двигателями с постоянными магнитами на глубинах 1500–2500 м выявил следующее распределение: тепловые повреждения обмоток статора — 30%, попадание воды в корпус — 25%, отказы магнитной системы, включая размагничивание, — 18%, механические повреждения подшипников и ротора — 15%, прочие причины — 12% [9].

Таким образом, тепловые факторы в совокупности с влагопроникновением обусловливают более половины всех отказов. Это подтверждает необходимость применения высокотемпературных магнитов типа NdFeB, рассчитанных на работу до 180 °C, двойного герметичного исполнения корпуса, а также систем непрерывного мониторинга температуры и тока [6].

Использование цифровых двойников для предиктивного обслуживания представляется перспективным направлением снижения внеплановых простоев. Это особенно актуально для офшорных объектов ввиду высокой стоимости подъёмных операций [11].

Экономическая оценка внедрения ДПМ. Экономический анализ показал, что использование двигателей с постоянными магнитами в установках электроцентро-

бежных насосов месторождения Y обеспечивает значительный экономический эффект [12]. По расчётным оценкам, экономия электроэнергии составляет около 40–50 тыс. долл. США на одну скважину в год. При парке из 20 добывающих скважин суммарная ежегодная экономия достигает 800 тыс. – 1 млн долл. США.

Данный эффект обусловлен сочетанием трёх факторов: прямым снижением потребления электроэнергии, сокращением потерь в кабельной линии и снижением нагрузки на поверхностное электрооборудование – трансформаторы и частотно-регулируемые приводы [8, 13].

Дополнительный экономический эффект формируется за счёт увеличения межремонтного периода, уменьшения количества подъёмных операций и сокращения потерь добычи при внеплановых остановках. Эти факторы особенно значимы в офшорных условиях, где стоимость одной подъёмной операции может исчисляться миллионами долларов [11].

Обсуждение и сопоставление с литературными данными. Полученные результаты согласуются с данными промышленных испытаний, представленных компаниями Schlumberger, Baker Hughes, Medco E&P и Ecopetrol. В этих материалах отмечается снижение энергопотребления при переходе с асинхронных двигателей на двигатели с постоянными магнитами в схожих условиях эксплуатации [9–11].

Достигнутый в настоящей работе расчётный показатель энергосбережения оказался выше ряда опубликованных промысловых оценок. Это может объясняться значительной глубиной скважины и, соответственно, большей длиной кабеля, при которой разница в токопотреблении двигателей проявляется наиболее выраженно [8].

Таким образом, преимущества двигателей с постоянными магнитами возрастают по мере увеличения глубины скважины и длины кабельной линии. Это является важным выводом для практики подбора оборудования на глубоких офшорных скважинах. Вместе с тем следует учитывать более высокую начальную стоимость таких двигателей и необходимость применения специализированных частотно-регулируемых приводов, что требует индивидуального технико-экономического обоснования для каждого объекта [6–12].

Заключение и выводы

В результате проведённого исследования установлено, что применение двигателей с постоянными магнитами в составе установок электроцентробежных насосов позволяет существенно повысить энергетическую эффективность системы добычи нефти.

Сравнительный анализ показал, что коэффициент полезного действия двигателя с постоянными магнитами достигает 94,82%, что выше аналогичного показателя асинхронного двигателя – 76,86%

Использование двигателя с постоянными магнитами позволяет снизить рабочий ток с 45,3 до 28,3 А и повысить коэффициент мощности до 98,9%, что способствует уменьшению электрических потерь в системе.

Расчёты показали, что при эксплуатации на глубине 3500 м энергопотребление установки может быть снижено примерно на 49%. Это обеспечивает значительный экономический эффект – порядка 40–50 тыс. долл. США на одну скважину в год.

Моделирование в программном комплексе Schlumberger DesignPro подтвердило устойчивость работы системы «двигатель — насос» и снижение тепловой нагрузки на оборудование.

Таким образом, применение двигателей с постоянными магнитами является эффективным техническим решением для повышения энергоэффективности и надёжности установок электроцентробежных насосов, особенно в глубоких и высокотемпературных скважинах.

ЛИТЕРАТУРА

1. API RP 11S: Recommended Practice for Electric Submersible Pump Systems. – Washington, DC: American Petroleum Institute, 2018.
2. Baker Hughes. Magnefficient™ Permanent Magnet Motor [Электронный ресурс] // Baker Hughes. – URL: https://www.bakerhughes.com/ (дата обращения: 15.01.2026).
3. Contractor Magazine. Maximize Pumping Efficiency with Permanent Magnets [Электронный ресурс] // Contractor Magazine. – URL: https://www.contractormag.com/ (дата обращения: 15.01.2026).
4. Ecopetrol. Energy Efficiency Improvement Using ESP with Permanent Magnet Motors: Technical Report. – Bogotá: Ecopetrol, 2017.
5. ENPMSM. Energy-Saving Comparison of Permanent Magnet Motors and Induction Motors [Электронный ресурс] // ENPMSM. – URL: https://ru.enpmsm.com/ (дата обращения: 15.01.2026).
6. Guo B., Lyons W.C., Ghalambor A. Petroleum Production Engineering: A Computer-Assisted Approach. – Burlington: Gulf Professional Publishing, 2007. – 288 p.
7. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. – 4th ed. – Oxford: Elsevier, 2013. – 430 p.
8. Medco E&P. Application of Permanent Magnet Motors in Artificial Lift Systems in Indonesia: Technical Report. – Jakarta: Medco E&P, 2017.
9. Pillay P., Krishnan R. Modeling of permanent magnet motor drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1988. – Vol. 35, No. 4. – P. 537–541.
10. Schlumberger. Electrical Submersible Pump Systems [Электронный ресурс] // Schlumberger. – URL: https://www.slb.com/ (дата обращения: 15.01.2026).
11. Schlumberger. Permanent Magnet Motor Applications in ESP Systems // Oilfield Review. – 2017.– Vol. 29, No. 1. – P. XX–XX.
12. Takács G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations, and Maintenance. – Burlington: Gulf Professional Publishing, 2009. – 816 p.
13. Wildi T. Electrical Machines, Drives and Power Systems. – 6th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2006. – 896 p.