

УДК 622.276.53.05-886

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СКВАЖИННЫХ ШТАНГОВЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

В.А. Лоскутников¹, П.Н. Цылев, И.Н. Щапова

¹ООО «ПНППК-Квантек» (614990, Россия, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106)

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

INNOVATIVE DIRECTIONS OF IMPROVING ELECTRIC DRIVE OF SUCKER ROD PUMPING UNITS

V.A. Loskutnikov¹, P.N. Tsylev, I.N. Shchapova

¹LLC "PNPPK-QUANTEK" (106 25 Oktiabria str., Perm, 614990, Russian Federation)

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii ave., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 12.09.2016. Принята / Accepted: 26.10.2016. Опубликовано / Published: 02.12.2016

Ключевые слова:

низкодебитная нефтяная скважина, непрерывный режим эксплуатации, инновационный тихоходный электромеханический преобразователь энергии, энергетические показатели, энергетическая эффективность.

Подъем жидкости из низкодебитных нефтяных скважин осуществляется скважинными штанговыми насосными установками (СШНУ) с электроприводом плунжера от асинхронных электромеханических преобразователей энергии. В зависимости от частоты, с которой вращается вал ротора асинхронного преобразователя энергии, подъем жидкости из низкодебитных нефтяных скважин осуществляется циклически или непрерывно. Отмечаются недостатки, присущие циклическому режиму работы низкодебитных нефтяных скважин. При использовании штатного механического оборудования станка-качалки для перехода к непрерывному режиму подъема жидкости из низкодебитных скважин требуются асинхронные электромеханические преобразователи энергии с низкой частотой вращения. Приводится информация о разработке асинхронных преобразователей энергии с частотой вращения магнитного поля 200 мин⁻¹ мощностью 3 кВт. Предлагается инновационное направление повышения энергетической эффективности тихоходных асинхронных преобразователей энергии, в основу которого положена идея внутренней компенсации реактивного намагничивающего тока. Практическая реализация данной идеи предусматривает размещение в пазах статора электромеханического преобразователя энергии дополнительной компенсационной обмотки и подключение ее к конденсаторам. Излагается методика выбора параметров компенсационной обмотки и конденсаторов, обеспечивающих повышение коэффициента мощности электромеханического преобразователя до значения, равного 1,0. Дается обоснование положения о том, что размещение в пазах статора асинхронного электромеханического преобразователя энергии дополнительной компенсационной обмотки не сказывается на значении коэффициента полезного действия. Серийный выпуск и широкое внедрение в приводе СШНУ тихоходных асинхронных преобразователей энергии, которые осуществляют компенсацию реактивного намагничивающего тока, позволят существенно увеличить объемы добываемой жидкости из нефтяных скважин с низким дебитом и поднять энергетическую эффективность производства нефтяной продукции.

Key words:

low-rate oil well, continuous mode of operation, innovative low-speed electromechanical energy converter, energy indicators, energy efficiency.

Liquid lifting from low-rate oil wells is carried out with sucker rod pumping units (SRPU) with plunger's electric drive from asynchronous electromechanical energy converters. Depending on the rotational speed of rotor shaft asynchronous power converters lift liquid from low-rate oil wells continuously or cyclically. There are some drawbacks of the cyclical operation mode of low-rate oil wells. When using pumping unit's regular mechanical equipment to switch to a continuous mode liquid lifting from low-rate wells it is required to use asynchronous electromechanical energy converters with a low rotational speed. The article gives information about development of asynchronous energy converters with magnetic field rotation frequency 200 min⁻¹, capacity 3 kW. It offers an innovative way to improve the energy efficiency of low-speed asynchronous energy converters, which is based on the idea of reactive magnetizing current's internal compensation. The practical implementation of this idea provides a location in the stator slots the electromechanical energy converter of additional compensation winding and its connection to capacitors. The article describes a technique of selecting parameters of the compensation winding and capacitors, providing increase in power factor of electromechanical converter to a value of 1.0. The substantiation of the provisions that additional compensation winding's location in stator slots of the asynchronous electromechanical power converter does not affect the value of efficiency coefficient. Serial production and widespread introduction in SRPU low-speed asynchronous energy converters, which carry reactive magnetizing current compensation, will significantly increase the volume of produced fluid from oil wells with low flow rate and raise energy efficiency of oil production.

Лоскутников Василий Алексеевич – инженер-конструктор (моб. тел.: +007 912 787 09 99, e-mail: loskutnikov.vasily@gmail.com).

Цылев Павел Николаевич – кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры горной электромеханики (тел.: +007 342 219 84 21, e-mail: pcprn@pstu.ru).

Щапова Ирина Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики (тел.: +007 342 219 84 21, e-mail: irina.shchapova@gmail.com).

Контактное лицо для переписки.

Vasilii A. Loskutnikov – Design Engineer (mob. tel.: +007 912 787 09 99, e-mail: loskutnikov.vasily@gmail.com).

Pavel N. Tsylev – PhD of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mining Electronics and Mechanics (tel.: +007 342 219 84 21, e-mail: pcprn@pstu.ru).

Irina N. Shchapova – PhD of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mining Electronics and Mechanics (tel.: +007 342 219 84 21, e-mail: irina.shchapova@gmail.com). The contact person for correspondence.

Введение

Подъем жидкости из нефтяных скважин с низким дебитом осуществляется преимущественно с помощью скважинных штанговых насосных установок (СШНУ). Возвратно-поступательное движение подвижной части насоса – плунжера – обеспечивается электрическим и механическим оборудованием станков-качалок. В состав электрического оборудования входит, как один из основных элементов, электромеханический преобразователь энергии, в качестве которого, как правило, используется асинхронный двигатель с обмоткой ротора, выполненной по типу «беличьей клетки» [1]. Механическое оборудование станков-качалок включает клиноременную передачу, редуктор, кривошипно-шатунный механизм, балансир, тросовую подвеску, полированный шток и систему насосных штанг.

Число двойных ходов плунжера вверх–вниз в минуту, которое равняется числу качаний балансира в минуту, определяется из выражения

$$n_0 = n \frac{1}{k_1 k_2}, \quad (1)$$

где n – частота вращения вала ротора электромеханического преобразователя; k_1 – передаточное отношение клиноременной передачи; k_2 – передаточное отношение редуктора; $n = n_0(1-s)$, $n_0 = 60f/p$, f – частота напряжения питающей сети; p – количество пар полюсов обмотки статора; s – скольжение ротора относительно поля статора, $s = (n_0 - n)/n_0$.

Для станков-качалок типа СКД число качаний балансира в минуту находится в диапазоне 4,2–14,7 мин⁻¹ [2]. Нижнее значение числа качаний балансира обеспечивается при установке на станках-качалках асинхронных электромеханических преобразователей энергии с частотой вращения магнитного поля статора 750 мин⁻¹ и размещении на валу ротора шкива с наименьшим диаметром, при котором значение k_1 является максимальным. Верхнее значение числа качаний балансира достигается при установке на станках-качалках асинхронных электромеханических преобразователей энергии с частотой вращения магнитного поля статора 1500 мин⁻¹ и посадке на вал ротора шкива максимального диаметра, при котором величина k_1 является минимальной.

Циклический режим отбора жидкости из скважины с низким дебитом и недостатки, присущие данному режиму

Добыча жидкости из нефтяных скважин с низким дебитом может осуществляться циклически или непрерывно. Используемый режим работы скважин с низким дебитом во многом определяется числом качаний балансира. Исследованиями установлено [3–5], что при числе качаний балансира более 4, как правило, обеспечивается циклический режим работы низкодебитных скважин. Характерным для данного режима является то, что периоды откачки жидкости чередуются с периодами отключения СШНУ, в продолжение которых производится накопление жидкости в скважине. При непрерывном режиме эксплуатации низкодебитные скважины постоянно находятся в работе, для чего число качаний балансира станка-качалки приходится уменьшать до 1, в ряде случаев может потребоваться и меньшая частота качаний балансира.

Циклический режим эксплуатации скважин характеризуется рядом недостатков, из которых следует отметить следующие [6–8]:

- уменьшаются объемы добываемой жидкости;
- повышается процентное содержание воды в жидкости;
- существенно возрастает установленная мощность асинхронных преобразователей энергии;
- увеличиваются габариты и стоимость электрического оборудования, входящего в систему электроснабжения кустов скважин;
- наблюдается рост динамических нагрузок на звенья кинематической цепи;
- имеет место ускоренный износ сальников, установленных на устье скважин.

Непрерывный режим отбора жидкости из скважины с низким дебитом и актуальность разработки тихоходных асинхронных электромеханических преобразователей энергии

Переход к непрерывному режиму эксплуатации скважин с низким дебитом позволяет во многом устранить отмеченные выше недостатки. Если не прибегать к установке на входе асинхронного двигателя преобразователя электрических параметров и не

осуществлять замену редуктора и клиноременной передачи, находящихся в эксплуатации на станке-качалке, то реализация непрерывного режима отбора жидкости становится возможной при использовании асинхронных двигателей с низкой частотой вращения вала ротора.

Разработка асинхронных электромеханических преобразователей энергии с низкой частотой вращения магнитного поля статора и исследование их характеристик проводятся в течение многих лет в Пермском национальном исследовательском политехническом университете. Важным результатом этих исследований явилась разработка усовершенствованных методов электромагнитного расчета асинхронных электромеханических преобразователей энергии [9, 10]. С использованием этих методов в 2004 г. было осуществлено проектирование трехфазного асинхронного электрического двигателя мощностью 3 кВт, синхронная частота вращения ротора которого составляла 200 мин^{-1} [11]. Три опытно-промышленных образца такого двигателя по заданию ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» были изготовлены в холдинговой компании ОАО «Привод» (г. Лысьва). Заводские испытания электродвигателей и последующая их эксплуатация на нефтяных промыслах предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» показали достаточно высокую для тихоходных двигателей энергетическую эффективность. Так, электрический коэффициент полезного действия двигателей составил 0,73, коэффициент мощности – 0,60, а энергетический коэффициент полезного действия – 0,44.

Увеличение объемов потребления электрической энергии предприятиями нефтегазовой отрасли и рост стоимости электрической энергии выдвигают в качестве одной из приоритетных задачу дальнейшего совершенствования тихоходных асинхронных преобразователей энергии, в частности задачу повышения их энергетической эффективности. Одним из инновационных решений данной задачи является электропривод с асинхронным электромеханическим преобразователем энергии, в котором осуществляется внутренняя компенсация реактивной мощности [12, 13].

Асинхронный электромеханический преобразователь энергии с внутренней компенсацией намагничивающего тока статора отличается от асинхронных преобразователей, серийно выпускаемых мировыми электротехническими компаниями [14, 15], тем, что в пазах стального

сердечника статора размещается не одна, а две изолированные друг от друга трехфазные обмотки. Одна из обмоток является сетевой, ее фазы соединяются в схему «звезда» или в схему «треугольник» и включаются в сеть трехфазного переменного напряжения. Вторая обмотка является компенсационной. Фазы этой обмотки соединяются по той же схеме, что и сетевая обмотка. Начала фаз компенсационной обмотки подключаются к конденсаторам, собранным в схему «треугольник». Сечение провода и количество витков в секциях сетевой и компенсационной обмоток различны. Схемы соединения секций, из которых образуются фазы сетевой и компенсационной обмоток, одинаковы.

Расчет параметров цепи компенсации намагничивающего тока асинхронных электромеханических преобразователей энергии

Для полной компенсации намагничивающего тока сетевой обмотки необходимо выполнение следующего условия:

$$F_c = F_k, \quad (2)$$

где F_c, F_k – магнитодвижущие силы фазы сетевой и компенсационной обмоток.

Равенство (2) может быть записано в следующем виде:

$$w_c I_c \sin \varphi_c = w_k I_k, \quad (3)$$

где w_c, w_k, I_c, I_k – количество витков и действующие значения токов фаз соответственно сетевой и компенсационной обмоток; $\sin \varphi_c$ – синус угла сдвига фаз между напряжением и током сетевой обмотки.

Для действующего значения тока фазы компенсационной обмотки справедливо выражение

$$I_k = E_c \frac{w_k}{w_c} \frac{1}{x_c}, \quad (4)$$

где E_c – электродвижущая сила фазы сетевой обмотки; x_c – емкостное сопротивление, соответствующее включению конденсаторов по схеме «звезда»; $E_c = 0,85U_{\text{сф}}$, $x_c = 10^6 / 2\pi fC$, $U_{\text{сф}} = U_{\text{сл}} / \sqrt{3}$, $U_{\text{сф}}$, $U_{\text{сл}}$ – фазное и линейное напряжения в питающей сети.

Посредством несложных преобразований (2)–(4) получаем выражение, устанавливающее количественную связь между числом витков и емкостью конденсаторов, включенных в фазу компенсационной обмотки, при которых обеспечивается компенсация намагничивающего тока сетевой обмотки асинхронного двигателя с заданными паспортными данными:

$$w_k = w_c \sqrt{\frac{P_n \sin \varphi_n 10^9}{1,7 \pi f U_n^2 \eta_n \cos \varphi_n C}}, \quad (5)$$

где P_n , U_n , η_n , $\cos \varphi_n$ – номинальные значения активной мощности, линейного напряжения, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности; C – емкость конденсаторов.

Для расчета количества витков в фазе сетевой обмотки используется формула

$$w_c = S_n z_1 / 6a, \quad (6)$$

где S_n – площадь паза; z_1 – количество пазов; a – число параллельных ветвей обмотки статора.

Так, применительно к асинхронному электромеханическому преобразователю энергии типа 4А80А4УЗ ($S_n = 60 \text{ мм}^2$, $z_1 = 36$; $a = 1$, $P_n = 1,1 \text{ кВт}$; $U_n = 380 \text{ В}$; $n_0 = 1500 \text{ мин}^{-1}$, $\eta_n = 0,75$; $\cos \varphi_n = 0,81$)

$$w_k = 1890 \sqrt{1/C}. \quad (7)$$

Зависимость $w_k(C)$ в графическом виде приведена на рисунке. Здесь же изображены зависимости $E_k(C)$ и $I_k(C)$, из которых первая построена по выражению $E_k = E_c w_k / w_c$, а вторая – по формуле (4).

Работа асинхронных электромеханических преобразователей энергии с внутренней компенсацией намагничивающего тока статора основана на использовании вращающегося магнитного поля, которое возбуждается трехфазной системой токов, проходящих в контурах, образованных фазами компенсационной обмотки и конденсаторами. Намагничивающий ток в фазах сетевой обмотки практически равен нулю, и поэтому из питающей электрической сети потребляется только активная составляющая тока и активная мощность. В связи с этим коэффициент мощности таких двигателей близок к единице, и это его значение сохраняется как в рабочих режимах работы, так и в режиме холостого хода и при перегрузках.

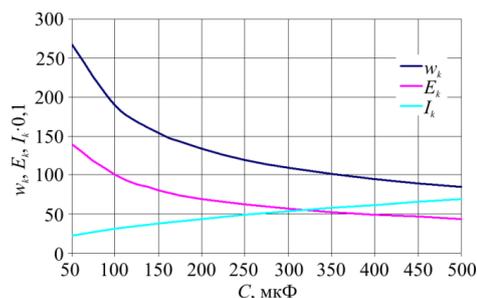


Рис. Зависимости числа витков w_k , электродвижущей силы E_k и тока I_k в компенсационной обмотке от емкости C

Инвариантность величины потерь в обмотке статора некомпенсированного и компенсированного асинхронных электромеханических преобразователей энергии

Вместе с тем размещение в пазах статора компенсированных асинхронных преобразователей энергии дополнительной обмотки не приводит к изменению электрического коэффициента полезного действия.

Действительно, потери в обмотке статора асинхронного двигателя без внутренней компенсации намагничивающего тока рассчитываются по формуле

$$\Delta P_1 = m I_1^2 R_1, \quad (8)$$

где m – число фаз обмотки статора; I_1 – ток; R_1 – активное сопротивление.

Потери в обмотках статора асинхронного двигателя с внутренней компенсацией намагничивающего тока определяются по выражению

$$\Delta P_1^* = m I_c^2 R_c + m I_k^2 R_k, \quad (9)$$

где I_c, I_k, R_c, R_k – токи и активные сопротивления фаз сетевой и компенсационной обмоток статора.

Составляющие электрических потерь ΔP_1^* рассчитываются по следующим выражениям:

$$m I_c^2 R_c = m \cdot (\Delta \cdot s_c)^2 \frac{w_c \cdot l_B}{\gamma \cdot s_c} = m \cdot \Delta^2 \cdot s_c \frac{w_c \cdot l_B}{\gamma}, \quad (10)$$

$$m I_k^2 R_k = m \cdot (\Delta \cdot s_k)^2 \frac{w_k \cdot l_B}{\gamma \cdot s_k} = m \cdot \Delta^2 \cdot s_k \cdot \frac{w_k \cdot l_B}{\gamma}, \quad (11)$$

где Δ – плотность тока; s_c, s_k, w_c, w_k, l_B – сечение провода, количество витков и длина витка соответственно сетевой и компенсационной обмоток.

Следовательно,

$$\Delta P_1^* = \frac{m \cdot \Delta^2 \cdot I_B}{\gamma} (w_c \cdot s_c + w_k \cdot s_k). \quad (12)$$

При одинаковом значении коэффициента заполнения паза

$$w_c \cdot s_c + w_k \cdot s_k = w_1 \cdot s_1, \quad (13)$$

где w_1, s_1 – число витков и сечение провода обмотки статора асинхронного электрического двигателя без внутренней компенсации намагничивающего тока.

Тогда

$$\Delta P_1^* = \frac{m \cdot \Delta^2 \cdot I_B}{\gamma} w_1 \cdot s_1. \quad (14)$$

Умножив и разделив правую часть данного равенства на величину s_1 , получим

$$\Delta P_1^* = m \cdot (\Delta \cdot s_1)^2 \frac{w_1 \cdot I_B}{\gamma \cdot s_1} = m I_1^2 R_1 = \Delta P_1. \quad (15)$$

Следовательно, электрические потери в обмотке статора асинхронных электромеханических преобразователей энергии без компенсации и с компенсацией намагничивающего тока сетевой обмотки являются одинаковыми. Поэтому одинаковыми будут и значения электрического коэффициента полезного действия этих электродвигателей.

Осуществление внутренней компенсации намагничивающего тока сетевой обмотки статора высокоскоростного асинхронного двигателя с данными, приведенными выше, позволяет повысить номинальный коэффициент мощности с 0,81 до 1,0, т.е. на 23 %. В той же мере, т.е. на 23 %, увеличивается энергетический коэффициент полезного действия.

В электроприводе СШНУ с тихоходными асинхронными преобразователями энергии энергетическая эффективность применения внутренней компенсации реактивного намагничивающего тока несравнимо выше. Так, в тихоходных асинхронных преобразователях энергии, изготовленных в ОАО «Привод», осуществление внутренней компенсации намагничивающего тока сетевой обмотки статора позволяет повысить номинальный коэффициент мощности с 0,60 до 1,0, а энергетический коэффициент полезного действия с 0,44 до 0,73.

Применение тихоходных асинхронных преобразователей энергии позволяет увеличить объемы добываемой жидкости за счет перехода к непрерывному режиму эксплуатации скважин с низким дебитом и существенно улучшить показатели энергетической эффективности посредством осуществления компенсации реактивного намагничивающего тока сетевой обмотки статора.

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – С. 358–364.
2. Каталог нефтяного оборудования, средств автоматизации, приборов и спецматериалов: в 2 т. / ВНИИОЭНГ. – М., 1994. – Т. 2. – 165 с.
3. Чаронов В.Я. Экономичные электроприводы для станков-качалок малodeбитных скважин // Нефтяное хозяйство. – 1996. – № 12. – С. 46–48.
4. Совершенствование электропривода и электрооборудования системы электроснабжения станков-качалок куста низкодебитных скважин / П.Н. Цылев, Е.М. Огарков, И.Н. Щапова, А.Д. Коротаяев // Вестник Пермского государственного технического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2006. – № 1. – С. 253–259.
5. Повышение эффективности добычи нефти из низкодебитных скважин за счет совершенствования электрооборудования станков-качалок / Е.Ф. Беляев, Е.А. Власов, Е.М. Огарков, П.Н. Цылев // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 7. – С. 66–70.
6. Нефтегазовое дело: учеб. пособие: в 6 т. / под ред. проф. А.М. Шаммазова. Т. 3. Зейгман Ю.В. Добыча нефти и газа. – СПб.: Недра, 2011. – С. 156–157.
7. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие для вузов. – М.: Нефть и газ, 2003. – 816 с.
8. Цылев П.Н., Щапова И.Н. Направления повышения коэффициента мощности асинхронных электроприводов механизмов предприятий нефтяной отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 16. – С. 77–85. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.9.
9. Огарков Е.М. Квазитрехмерная теория линейных асинхронных двигателей: моногр. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2003. – 218 с.
10. Беляев Е.Ф., Шулаков Н.В. Дискретно-полевые модели электрических машин: учеб. пособие. Ч. I, II. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 457 с.
11. Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылев П.Н. Совершенствование электропривода станков-качалок нефтяных скважин с малым дебитом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 4. – С. 91–102.

12. Трёхфазный асинхронный электрический двигатель: пат. 2478249 Рос. Федерация № 2011138279/07 / Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылев П.Н.; заявл. 16.09.11; опубл. 27.03.13. Бюл. № 9. – 10 с.

13. Цылев П.Н., Щапова И.Н., Щапов В.А. Повышение энергоэффективности асинхронных электромеханических преобразователей энергии

электропривода скважинных штанговых насосов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 5. – С. 110–113.

14. Oberretl K. Dreidimensionale berechnung des linearmotors mit berucksichtigung der endeffekte und der wicklungsverteilung // Arch. f. Elektr. – 1973. – Vol. 55, № 4. – P. 111–116.

15. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей / пер. с англ. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с.

References

1. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. 2 izd., pererab. i dop. Leningrad: Energiia, 1974, pp.358-364.

2. Katalog nefnianogo oborudovaniia, sredstv avtomatizatsii, priborov i spetsmaterialov [Catalog of oil equipment, automation equipment, instruments and special materials]: v 2 t. Moscow: VNIIOENG, 1994, vol.2, 165 p.

3. Charonov V.Ia. Ekonomichnye elektroprivody dlia stankov-kachalok malodebitnykh skvazhin [Cost effective electric pumping units for low production wells]. *Neftianoe khoziaistvo*, 1996, no.12, pp.46-48.

4. Tsylev P.N., Ogarkov E.M., Shchapova I.N., Korotaev A.D. Sovershenstvovanie elektroprivoda i elektrooborudovaniia sistemy elektrosnabzheniia stankov-kachalok kusta nizkodebitnykh skvazhin [Improvement of electric power and electric equipment of power supply systems of marginal wells cluster pumping units]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2006, no.1, pp.253-259.

5. Beliaev E.F., Vlasov E.A., Ogarkov E.M., Tsylev P.N. Povyshenie effektivnosti dobychi nefti iz nizkodebitnykh skvazhin za schet sovershenstvovaniia elektrooborudovaniia stankov-kachalok [Effectiveness increase of oil recovery from low oil output because of electric equipment conventional pumping unit improvement]. *Neftpromyslovoe delo*, 2010, no.7, pp.66-70.

6. Neftgazovoe delo [Oil and gas business]: v 6 t.: ucheb. posobie. Ed. A.M. Shammazova. Vol. 3. Zeigman Iu.V. Dobycha nefti i gaza [Oil and gas production]. Sankt-Petersburg: Nedra, 2011, pp.156-157.

7. Mishchenko I.T. Skvazhinnaia dobycha nefti [Oil well production]: ucheb. posobie dlia vuzov. Moscow: Neft' i gaz, 2003, 816 p.

8. Tsylev P.N., Shchapova I.N. Napravleniia povysheniia koeffitsienta moshchnosti asinkhronnykh elektroprivodov mekhanizmov predpriatii neftianoj otrasli [Alternatives to improve capacity coefficient of induction motors for oil-gas industry]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo*

issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo, 2015, no.16, pp.77-85. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.9.

9. Ogarkov E.M. Kvazitrekhnernaia teoriia lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [The quasi three-dimensional theory of linear asynchronous motors]: monogr. Perm': Perm. gos. tekhn. un-t, 2003, 218 p.

10. Beliaev E.F., Shulakov N.V. Diskretno-polevyie modeli elektricheskikh mashin [Discrete-field models of electric machines]: ucheb. posobie. Perm': Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta, 2009, part I, II, 457 p.

11. Beliaev E.F., Tashkinov A.A., Tsylev P.N. Sovershenstvovanie elektroprivoda stankov-kachalok neftianykh skvazhin s malym debitom [Improvements of the beam pumping unit electrical drive of the dripper]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2012, no.4, pp.91-102.

12. Beliaev E.F., Tashkinov A.A., Tsylev P.N. Trekhfaznyi asinkhronnyi elektricheskii dvigatel' [Three-phase asynchronous electric motor]: pat. 2478249 Ros. Federatsiia no.2011138279/07; zaiavl. 16.09.11; opubl. 27.03.13. Biul. no.9, 10 p.

13. Tsylev P.N., Shchapova I.N., Shchapov V.A. Povyshenie energoeffektivnosti asinkhronnykh elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii elektroprivoda skvazhinnykh shtangovykh nasosov [Direction to increase the energy efficiency of asynchronous electromechanical energy converters for electric drive of sucker rod pumping installations]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no.5, pp.110-113.

14. Oberretl K. Dreidimensionale berechnung des linearmotors mit berucksichtigung der endeffekte und der wicklungsverteilung. *Arch. f. Elektr.*, 1973, vol. 55, no.4, pp.111-116.

15. Yamamura S. Teoriia lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [Theory of linear induction motors]: per. s angl. L.: Energoatomizdat, 1983, 180 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лоскутников В.А., Цылев П.Н., Щапова И.Н. Инновационные направления совершенствования электропривода скважинных штанговых насосных установок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №21. – С.339–344. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.5

Please cite this article in English as:

Loskutnikov V.A., Tsylev P.N., Shchapova I.N. Innovative directions of improving electric drive of sucker rod pumping units. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.21, pp.339–344. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.5