

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССА ПУСКА ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

ЛЫСОВА О. А.¹, ФРАЙШТЕТЕР В. П.², СМЕРНОВ А. Ю.³

¹ Тюменский индустриальный университет
(Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 38)

² ООО «Юганский научно-исследовательский проектный институт»
(Россия, г. Нефтеюганск, ул. Сургутская, 4а/2)

³ ОАО «НОВАТЭК НТЦ»
(Россия, г. Тюмень, ул. 50 лет ВЛКСМ, 53)

Предмет исследования. В данной статье приведено краткое описание функционирования установки центробежных электронасосов (УЭЦН) и особенностей ее работы. Описаны причины, по которым происходит частичное или полное «подклинивание» рабочих колес погружного насоса (ПЭД). Причем достаточно распространено явление полного «заклинивания» насоса, что приводит к отключению защиты (или перегреву изоляции), срезанию шпонки или скручиванию вала. «Расклинивание» вала ПЭД прежде всего характеризуется работой электродвигателя в режиме короткого замыкания, так называемого «тяжелого пуска». Такой же пуск осуществляется при освоении скважины или ее запуске в эксплуатацию после ремонта. В настоящее время получили широкое распространение частотно-регулируемые электроприводы, где возможно регулирование как частоты, так и величины напряжения питания погружного электродвигателя.

Целью данной работы является разработка методики «расклинивания» рабочих колес погружного насоса УЭЦН при максимально допустимом моменте электродвигателя и минимальном токе обмотки статора, удовлетворяющей условиям нагрева ПЭД.

Методика исследований. В данной работе произведен краткий анализ существующих методов «расклинивания» рабочих колес насоса и сформулированы их основные недостатки. Показано, что основным критерием при «тяжелом пуске» должно быть получение максимально допустимого момента электродвигателя при минимально возможном токе обмотки его статора. На цифровой модели методом имитационного моделирования получены семейства зависимостей моментов короткого замыкания погружного электродвигателя и токов короткого замыкания обмотки статора от частоты напряжения питания при их различных величинах.

Результаты и их анализ. На основании указанных кривых разработана методика «расклинивания» рабочих колес ПЭД путем толчкового снижения частоты напряжения питания, удовлетворяющая сформулированным критериям. Определено время работы ПЭД при пониженной частоте (время толчка) и время паузы между толчками из условий удовлетворительной работы электродвигателя с точки зрения нагрева. Для реализации предложенной методики разработана блок-схема алгоритма расклинивания рабочих колес погружного насоса.

Выводы. Применение предлагаемой методики «расклинивания» вала ПЭД позволяет получить максимальный, в рамках перегрузочной способности, момент ПЭД при минимальном токе обмотки статора и рассчитать параметры процесса «расклинивания» – время толчка и время паузы – из условий нагрева электродвигателя.

Ключевые слова: погружной насос; регулирование скорости; «расклинивание» насоса; толчковое повышение величины напряжения; толчковое понижение частоты напряжения; нагрев электродвигателя.

Введение. Установки погружных центробежных электронасосов (УЭЦН) предназначены для откачки из нефтяных скважин, в том числе и наклонных, пластовой жидкости, содержащей нефть, воду, газ, механические примеси [1].

Анализ литературных данных [1–3] и результаты эксплуатации систем УЭЦН–скважина в промышленных условиях показывают, что при эксплуатации значительной части месторождений имеют место процессы отложения солей и других веществ на стенки насосно-компрессорных труб (НКТ) и рабочие элементы насосов и их абразивный износ. В результате этого в процессе эксплуатации происходит «подклинивание» рабочих колес насоса, заключающееся в том, что рабочие колеса фиксируются, садятся на опорный подшипник и к валу погружного электродвигателя (ПЭД) прикладывается повышенная нагрузка, т. е. возрастает статический момент. Причем в процессе работы происходит стохастическое как заклинивание, так и расклинивание неопределенного количества рабочих колес насоса, что ведет к постоянному колебанию момента статического M_c .

Известно, что УЭЦН имеет специфические конструктивные и технологические особенности, а именно: в нормальном состоянии рабочие колеса элементов погружного насоса могут свободно перемещаться вдоль вала так, что осевые усилия, связанные с созданием момента, идущего на подъем жидкости в колонне НКТ, передаются на корпус насоса и далее на колонну НКТ. В этом случае на упорный подшипник действует только сила тяжести ЭЦН, а вал привода воспринимает только полезные скручивающие усилия. Однако в реальных условиях на характеристики УЭЦН и величину статического момента погружного электродвигателя оказывает значительное влияние процесс солеотложения на рабочих органах насоса, за счет чего происходит «подклинивание» рабочих колес насоса вплоть до его полного «заклинивания», что приводит к отключению защиты (или перегреву изоляции), срезанию шпонки или к скручиванию вала.

Расклинивание вала УЭЦН – достаточно сложный технологический процесс, требующий комплексного подхода. Как правило, все попытки восстановить работоспособное состояние УЭЦН сводятся к работе установки в режиме перегрузки – это так называемый «тяжелый пуск».

В последние годы для электропривода погружных установок все чаще стала применяться система *преобразователь частоты–асинхронный электродвигатель*. Применение этой системы позволяет оптимизировать функционирование УЭЦН и использовать более совершенные способы расклинивания погружного насоса [4, 5].

При заклинивании рабочих колес насоса, т. е. при статическом моменте M_c , превышающем момент $M_{кз}$ короткого замыкания ПЭД на данной механической характеристике, ток цепи обмотки статора превышает допустимое значение, определяемое уставкой защиты, происходит запираание преобразователя частоты (ПЧ), а затем остановка электродвигателя.

В настоящее время для «расклинивания» ПЭД применяют «толчковый» режим разгона (*Инструкция по выводу на режим скважин при помощи станций управления с частотным регулированием. Радужный Владимирской обл., 2014; Centrilift – Hughes, Ins., one of Huges Tool Co. Haudbook for oilfeld subsurface electrically driven pumps, 1981, section 6, p. 16–44, section 1, p. 136*), заключающийся в том, что при постоянной частоте напряжения питания скачком увеличивают величину напряжения, а затем (если расклинивание произошло) производят согласованное совместное изменение частоты и величины напряжения до требуемого значения. Если расклинивания не произошло, то величина и частота напряжения питания снижаются до нуля.

При этом, согласно регламенту (*Инструкция по выводу на режим скважин при помощи станций управления с частотным регулированием. Радужный Вла-*

дмирской обл., 2014), устанавливаются следующие параметры «толчка»: время толчка $t_T = 12$ с; пауза между толчками $t_P = 12$ с; количество толчков – 5. Количество толчков определяется условиями нагрева ПЭД.

Если после регламентированного количества толчков «расклинивания» не происходит, то установка извлекается из скважины и подвергается ремонту, что влечет за собой значительные материальные затраты на подъем, спуск УЭЦН, ремонт насоса, а значит и потери в добыче нефти.

В [6] указывалось, что расклинивание рабочих колес насоса производится при заторможенном роторе ПЭД, т. е. в точке короткого замыкания. При этом необходимо, чтобы процесс осуществлялся при максимально допустимом моменте электродвигателя и минимально возможном токе обмотки статора.

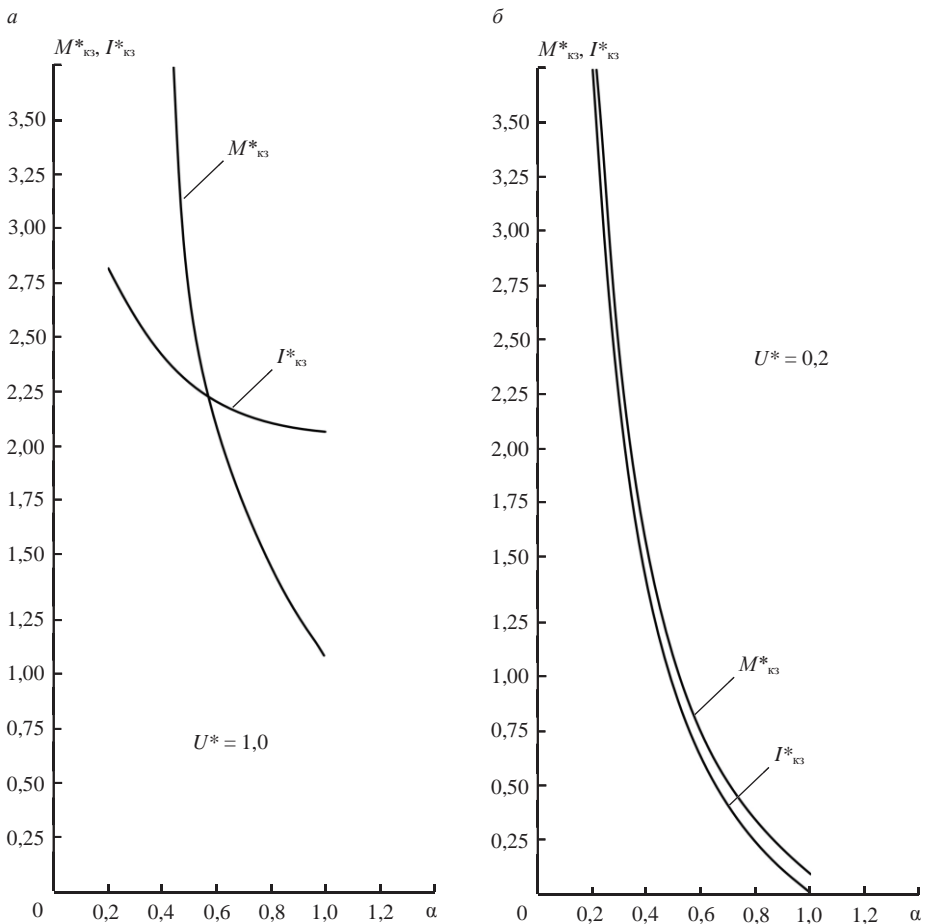


Рис. 1. Зависимости тока $I^*_{кз}$ и момента $M^*_{кз}$ от относительной частоты α при номинальном – а и минимальном – б значениях напряжения питания

Fig. 1. Graphical charts of dependences between current $I^*_{кз}$ and torque $M^*_{кз}$ and relative frequency α under nominal – а and minimum – б values of power supply voltage

Методика проведения исследований. В работе использовались методы имитационного моделирования. На цифровой модели преобразователь частоты–асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД) [7] получены зависимости относительных моментов $M^*_{кз}$ и токов $I^*_{кз}$ короткого замыкания от относительного напряжения U^* при разных относительных частотах α .

Анализ полученных кривых показывает следующее:

– кривые являются нелинейными;

- во всех случаях, в пределах перегрузочной способности ПЭД, относительный ток короткого замыкания превышает относительный момент короткого замыкания, т. е. процесс расклинивания характеризуется повышенными токами;
- величины ускорения $dI_{кз}^*/dU^*$ и $dM_{кз}^*/dU^*$ являются переменными во всем реальном диапазоне изменения величины и частоты напряжения питания;
- при увеличении частоты напряжения питания для обеспечения заданного момента ток короткого замыкания увеличивается.

Таким образом, в производственных условиях практически невозможно достаточно точное прогнозирование величин и частот напряжения питания, при которых выполнялось бы условие получения максимального момента при минимальном токе. Следовательно, при применении традиционного способа расклинивания погружного насоса велика вероятность усугубления существующей аварийной ситуации.

Целью данной работы является разработка методики расклинивания рабочих колес погружного насоса УЭЦН при максимально допустимом моменте электродвигателя и минимальном токе обмотки статора, удовлетворяющей условиям нагрева ПЭД.

На цифровой модели [7] были получены зависимости относительных моментов $M_{кз}^*$ и токов $I_{кз}^*$ короткого замыкания от относительной частоты α напряжения питания при разных величинах относительного напряжения U^* (рис. 1).

Из анализа кривых следует:

- при всех значениях U^* зависимости $M_{кз}^* = f(\alpha)$ и $I_{кз}^* = f(\alpha)$ имеют точку пересечения;
- в области низких частот соблюдается соотношение $M_{кз}^* > I_{кз}^*$, т. е. в этом случае можно получить пусковой момент при минимальном токе;
- при увеличенных значениях напряжения с уменьшением частоты увеличивается относительный момент $M_{кз}^*$ короткого замыкания и снижается относительный ток $I_{кз}^*$ короткого замыкания;
- при малых величинах напряжения и ток, и момент короткого замыкания значительно возрастают при снижении частоты и могут достичь недопустимо больших значений.

На основании проведенных исследований предлагается производить расклинивание рабочих колес насоса не толчковым повышением величины напряжения, а толчковым понижением частоты.

В этом случае процесс расклинивания производится в следующем порядке.

1. Согласно [8], совместное изменение напряжения и частоты должно производиться по закону

$$U^* = \sqrt{\alpha} \quad (1)$$

и выдерживаться до точки, где $I_{кз}^* = M_{кз}^*$.

2. Величина напряжения в этой точке определяется исходя из следующих соображений. Согласно [10],

$$I_{кз}^* = C \frac{M_{кз}^* \alpha}{U^*}, \quad (2)$$

где $C = M_n \omega_{0н} (1 + R_1/R_2)(3U_n I_n \cos \varphi)^{-1}$; I_n , U_n , M_n – номинальные ток, напряжение и момент ПЭД соответственно; $\omega_{0н}$ – скорость идеального холостого хода ПЭД при номинальной частоте напряжения питания; R_1 , R_2 – активные сопротивления цепей статора и приведенное ротора соответственно; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Следовательно, при $I_{кз}^* = M_{кз}^*$

$$C \frac{\alpha}{U^*} = 1. \tag{3}$$

Подставляем в (3) вместо α значение из (1) и получаем начальное значение относительного напряжения расклинивания $U_{нач}^* = 1/C$.

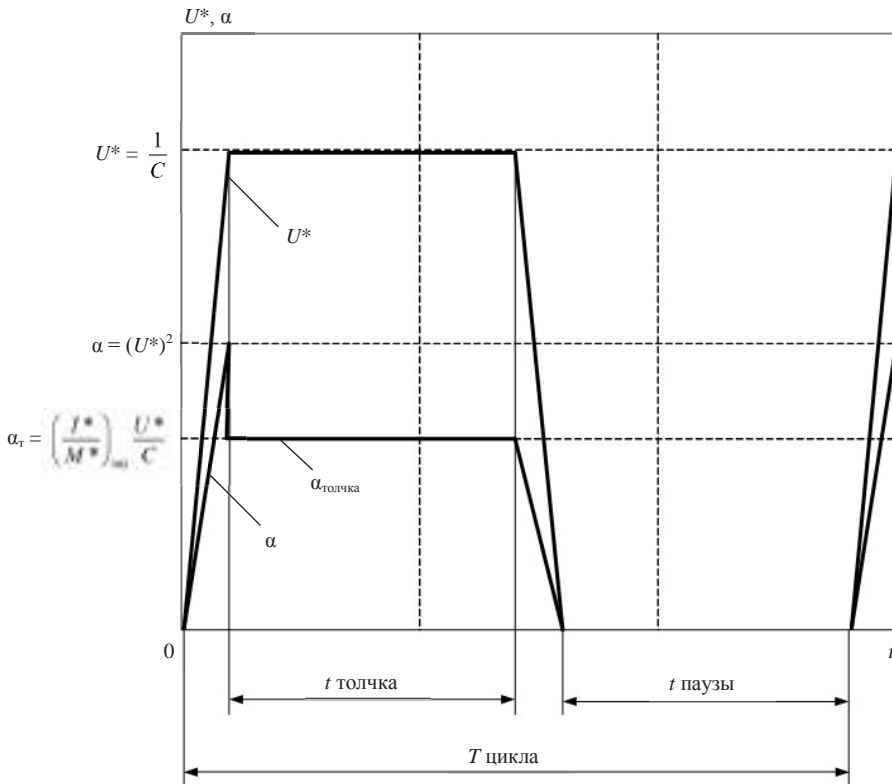


Рис. 2. Упрощенные диаграммы изменения частоты и величины напряжения питания при расклинивании рабочих колес насоса путем толчкового снижения частоты и напряжения питания
 Fig. 2. Simplified diagrams of frequency and power supply voltage value variation under pump impellers wedging out by means of logging decrease in the frequency of voltage of power supply

3. При рассчитанном таким образом напряжении относительная частота определяется $\alpha_{нач} = (U^*)^2$.

4. Значение относительной частоты α_T , до которого происходит ее снижение при толчке, определяется из условия получения требуемого соотношения тока и момента короткого замыкания, а именно: из (2) получаем

$$\frac{I_{кз}^*}{M_{кз}^*} = C \frac{\alpha_T}{U^*}. \tag{4}$$

Из (4) получаем

$$\alpha_T = \left(\frac{I_{кз}^*}{M_{кз}^*}_{зад} \right) \frac{U^*}{C}, \tag{5}$$

т. е. исходя из технологических требований и уставок защит необходимо задать величину $(I_{кз}^* / M_{кз}^*)_{зад}$ и согласно (5) произвести расчет толчкового значения частоты. При этом величина момента короткого замыкания выбирается из условия получения динамического момента, не превышающего допустимого значения.

5. Для улучшения условий работы ПЭД с точки зрения нагрева во время паузы между толчками частота и величина напряжения питания снижаются до нуля.

6. Если расклинивание произошло, производят согласованное совместное изменение частоты и величины напряжения до требуемого значения.

Исходя из изложенного, изменение частоты и величины напряжения питания можно представить в виде диаграмм (рис. 2).

Время работы ПЭД при пониженной частоте (время толчка) и время паузы между толчками определяется из условий удовлетворительной работы электродвигателя с точки зрения нагрева.

В рассматриваемом случае ПЭД работает на прямолинейных участках механических характеристик при примерно постоянном магнитном потоке [8]. Следовательно, проверку по нагреву можно осуществить методом эквивалентного момента:

$$M_{э} \leq M_{н}.$$

Проведем проверку ПЭД по нагреву для наиболее тяжелых, с точки зрения нагрева, условий, когда пусковой и тормозной моменты максимальны в течение всего времени пуска и торможения и расклинивание производится при моменте короткого замыкания:

$$M_{э} = \sqrt{\frac{M_{п}^2 t_{п} + M_{пр}^2 t_{пр} + M_{т}^2 t_{т}}{t_{п} + t_{пр} + t_{т} + t_0}} \leq M_{н}, \quad (6)$$

где $M_{э}$ – эквивалентный момент; $M_{п} = M_{кз}$ – максимальный пусковой момент; $M_{пр} = M_{кз}$ – момент расклинивающего толчка; $M_{т} = M_{п}$ – максимальный момент при торможении; $t_{п}$, $t_{пр}$, $t_{т}$, t_0 – время пуска, расклинивающего толчка, торможения и паузы соответственно.

Представим (6) в относительных единицах:

$$\sqrt{\frac{(M_{п}^*)^2 t_{п} + (M_{пр}^*)^2 t_{пр} + (M_{т}^*)^2 t_{т}}{t_{п} + t_{пр} + t_{т} + t_0}} \leq 1. \quad (7)$$

Пусть $t_{п} + t_{т} = t_{пп}$, где $t_{пп}$ – время переходных процессов.

Из (7) получаем

$$(M_{п}^*)^2 t_{пп} + (M_{пр}^*)^2 t_{пр} \leq t_{пп} + t_{пр} + t_0. \quad (8)$$

Если при пуске и расклинивании насоса максимально допустимый момент регламентируется перегрузочной способностью λ ПЭД, то (8) можно представить в виде

$$\lambda^2 t_{пп} + \lambda^2 t_{пр} \leq t_{пп} + t_{пр} + t_0. \quad (9)$$

Время расклинивающего толчка и паузы между толчками значительно превышает время переходных процессов, а именно: суммарное время пуска и торможения не превышает 1 с, а суммарное время толчка и паузы составляет более 24 с (Станция управления Электон-05 ПЧ-ТТПТ-380-50-1 УХЛП. Руководство по эксплуатации ЦТКД 065 РЭ. ЗАО "ЭЛЕКТОН", ЗАТО, Радужный Владимирской обл., 2010). Причем, как правило, такие системы оптимизированы по техническому оптимуму, т. е. пусковой момент не превышает максимально допустимый [9].

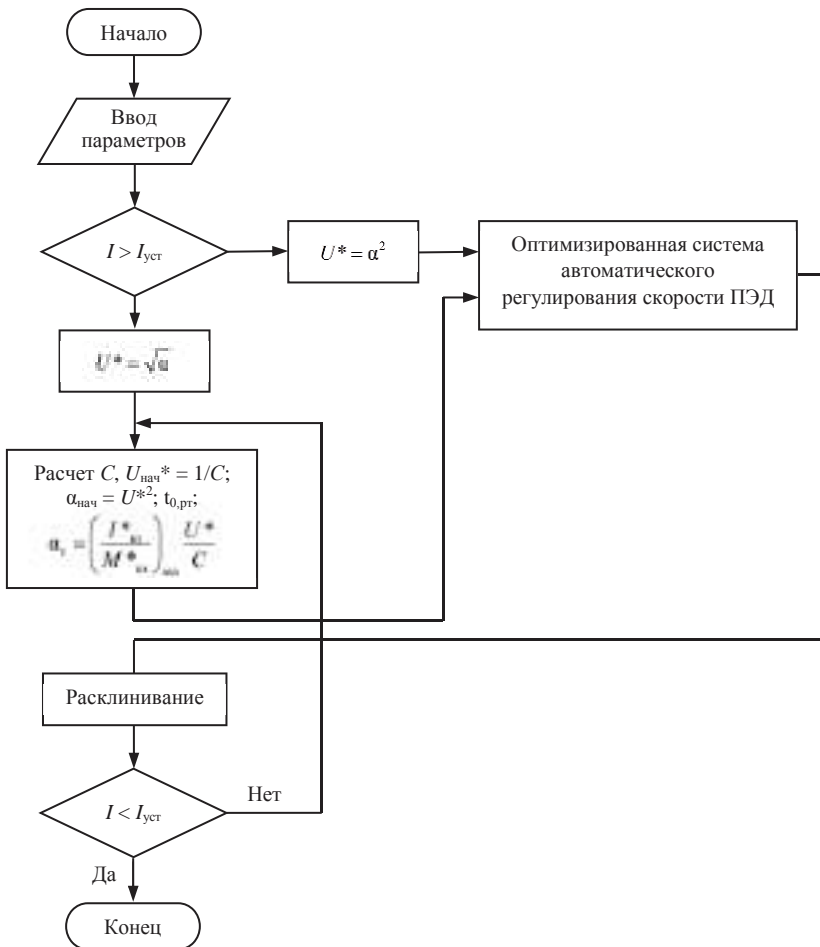


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расклинивания рабочих колес погружного насоса
 Fig. 3. Control flow chart for SEM impellers wedging out algorithm

Следовательно, в данном случае временем переходных процессов можно пренебречь, и тогда (9) можно представить в виде:

$$\lambda^2 t_{пр} \leq t_{пр} + t_0.$$

Тогда соотношение между временем толчка и временем паузы можно представить в следующем виде:

$$t_0 \geq (\lambda^2 - 1)t_{пр}. \tag{10}$$

В зависимости от конкретных условий задается время толчка или время паузы, а вторая величина рассчитывается из (10).

Ранее предложены методики расчета основных параметров процесса частотного расклинивания рабочих колес погружного насоса и определения времени толчка или паузы между расклинивающими толчками. Однако ручное осуществление этих расчетов является неудобным и не всегда возможным. В настоящее время ПЧ для погружных установок комплектуются микропроцессорными контроллерами, далее предлагается алгоритм для расчета указанных параметров (рис. 3).

Область применения результатов. Предлагаемая методика «расклинивания» рабочих колес ПЭД может быть применена на скважинах с УЭЦН, в состав электропривода которых входит преобразователь частоты. Причем такие системы электропривода могут быть как разомкнутыми, так и замкнутыми. Однако применение блок-схемы алгоритма расклинивания рабочих колес погружного насоса возможно только в замкнутых системах электропривода.

Выводы. На основании проведенных исследований определено следующее:

– при предлагаемой в данном случае методике «расклинивания» погружного насоса можно добиться получения максимального, в рамках перегрузочной способности, момента электродвигателя при минимальном токе обмотки статора, в отличие от общепринятой методики;

– предлагаемая методика позволяет рассчитать параметры процесса «расклинивания», время толчка и время паузы из условий нагрева электродвигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Centrilift hughes and division of hughes tool company. Electrical Submersible Pumps and Equipment, 1993. 136 p.
2. Ведерников В. А., Лысова О. А. Описание и анализ стендовых исследований насосной электроцентробежной установки (УЭЦН) // Известия вузов. Горный журнал. 2003. № 5. С. 89–92.
3. Бруслова О. В. Классификация отказов скважин после капитального ремонта по статистическим данным // Нефть и газ. 1998. № 6. С. 23.
4. TRW Reda Pump Division. Variable Speed Drivers, Specification and Recomded Installation Proadures, 1984, 2 p.
5. TRW Reda Pump Division. Variable Speed Drivers, 1983, 2 p.
6. Лысова О. А., Фрайштетер В. П., Смирнов А. Ю. Анализ способов пуска УЭЦН в осложненных условиях // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 87–95.
7. Ведерников В. А., Лысова О. А., Кречина Г. С., Смирнов А. Ю. Разработка математической модели системы ПЧ–погружной электродвигатель // Электротехника. 2006. № 3. С. 48–51.
8. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов / Онищенко Г. Б. [и др.]. М.: МОУ, 2001. 520 с.
9. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для вузов. М.: Академия, 2006. 265 с.

Поступила в редакцию 29 марта 2018 года

Лысова О. А., Фрайштетер В. П., Смирнов А. Ю. Методика управления параметрами процесса пуска погружного электродвигателя в осложненных условиях // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 7. С. 95–103.

Сведения об авторах:

Лысова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета. E-mail: lisova_oa@mail.ru

Фрайштетер Виталий Пинкосович – кандидат технических наук, начальник электротехнического отдела ООО «Юганский научно-исследовательский проектный институт». E-mail: frayshteter52@mail.ru

Смирнов Александр Юрьевич – начальник отдела геологии и разработки месторождений Ямал ОАО «НОВАТЭК НТЦ». E-mail: smirnoffau@mail.ru

METHODS OF CONTROLLING THE PARAMETERS OF SUBMERSIBLE ELECTRIC MOTOR STARTING PROCESS IN ABNORMAL OPERATING CONDITIONS

Lysova O. A.¹, Fraishteter V. P.², Smirnov A. Iu.³

¹ Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia.

² OOO Yugansk Scientific Research Design Institute, Nefteyugansk, Russia.

³ OAO NOVATEK STC, Tyumen, Russia.

Research subject. The given article presents a brief description of centrifugal electric pumps unit (CEPU) functioning and its operation features. The article describes the reasons why partial or complete “wedging” of submersible pump (SEM) impellers occurs. At that, the notion of complete “wedging up” of a pump is widespread, which leads to security shutdown (or insulation thermal overload), key cut-off, and shaft twisting off. SEM shaft “wedging out” is first and foremost characterized by the electric motor operation in the mode of short circuit, so called “heavy start”. The same start is carried out at a well exploitation or its putting into operation repaired. Nowadays variable-frequency electric drives have come into common use, where the regulation of both frequency and SEM power supply voltage is possible.

The research aim is the development of the methods of CEPU submersible pump impellers “wedging out” under maximum allowable electric motor torque and stator winding minimum current, meeting the requirements of SEM heating.

Research methodology. The present work has carried out a brief analysis of existing methods of the pump impellers “wedging out” and their main disadvantages are formulated. It has been shown that the basic criterion under “heavy start” must be the obtaining maximum allowable torque of electric motor under minimum stator winding current. At a digital model, the sets of dependences of SEM short circuit torques and stator winding short circuit currents on the power supply voltage frequency under their various values have been obtained.

Results and their analysis. On the basis of the referred curves, the methods of SEM impellers “wedging out” have been developed by means of jogging decrease in the frequency of power supply voltage, meeting the requirements of the formulated criteria. Time of SEM operation at underfrequency (log time) and pause time between the logs has been determined through the conditions of the satisfactory operation of the electric motor as regards heating. To implement the suggested methods, control flow chart for SEM impellers wedging out algorithm has been developed.

Conclusions. The use of the suggested methods of “wedging out” of SEM shaft allows, within the limits of the overload capability, acquiring maximum SEM torque under minimum stator winding current and calculating the parameters of the process of “wedging out” – log time and pause time – through the conditions of the electric motor heating.

Key words: submersible pump; velocity control; pump “wedging out”; logging increase in the power supply voltage frequency; logging decrease in the power supply voltage frequency; electric motor heating.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7-95-103

REFERENCES

1. Centrifugal pumps and division of pumps tool company. *Electrical Submersible Pumps and Equipment*, 1993. 136 p.
2. Vedernikov V. A., Lysova O. A. [Description and analysis of centrifugal electric pumps unit (CEPU) bench test]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2003, no. 5, pp. 89–92. (In Russ.)
3. Bruslova O. V. [Classification of wells breakdowns after the general overhaul according to the statistics data]. *Neft' i gaz – Oil and Gas*, 1998, no. 6, pp. 23. (In Russ.)
4. TRW Reda Pump Division. Variable Speed Drivers, Specification and Recommended Installation Procedures, 1984, 2 p.
5. TRW Reda Pump Division. Variable Speed Drivers, 1983, 2 p.
6. Lysova O. A., Fraishteter V. P., Smirnov A. Iu. [Centrifugal electric pumps units startup methods analysis in abnormal operating conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2018, no. 4, pp. 87–95. (In Russ.)
7. Vedernikov V. A., Lysova O. A., Krechina G. S., Smirnov A. Iu. [Developing the mathematical model of FC (frequency converter)–submersible electric motor]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 48–51. (In Russ.)
8. Onishchenko G. B., and others. [Automated electrical drive for industrial mechanisms]. Moscow, MOU Publ., 2001. 520 p.
9. Sokolovskii G. G. [School book for the institutions of higher education “Frequency regulated alternating current drives”]. Moscow, Akademiia Publ., 2006. 265 p.

Information about authors

Lysova Ol'ga Aleksandrovna – Candidate of Engineering Science, associate professor of the Department of Power Engineering of Tyumen Industrial University. E-mail: lisova_oa@mail.ru

Fraishteter Vitalii Pinkosovich – Candidate of Engineering Science, Head of the Electrical Engineering Department of OOO Yugansk Scientific Research Design Institute. E-mail: frayshteter52@mail.ru

Smirnov Aleksandr Iur'evich – Head of the Department of Geology and Deposits Exploitation of Yamal OAO NOVATEK STC. E-mail: smirnoffau@mail.ru