

В.А. Ведерников, О.А. Лысова, Р.Р. Лопатин

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА «РАСКЛИНИВАНИЯ» ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ УСТАНОВОК ДОБЫЧИ НЕФТИ

Проведено исследование и анализ параметров погружных электродвигателей при «расклинивании» центробежных насосов в составе УЭЦН, оборудованных преобразователями частоты. Даны рекомендации для осуществления более эффективно процесса «расклинивания».

Нефтедобыча, центробежный насос, расклинивание, параметры.

В последние годы на нефтедобывающих предприятиях интенсивно внедряются частотнорегулируемые электроприводы (ЧРП) погружных электроцентробежных установок (УЭЦН). Применение ЧРП УЭЦН позволяет регулировать отбор нефти из скважины, осуществляя плавный пуск погружного электродвигателя (ПЭД) и снижая нагрузку на электрическую сеть, повышает надежность погружных установок, снижает количество отказов УЭЦН, увеличивает межремонтный период (МРП) эксплуатации оборудования. В конечном итоге все это способствует еще и энергосбережению.

Известно, что у УЭЦН в нормальном состоянии рабочие колеса элементов погружного насоса могут свободно перемещаться вдоль вала, так что осевые усилия, связанные с созданием крутящего момента — на вращение рабочих колес насоса, передаются на его корпус и далее на колонну насосно-компрессорных труб (НКТ). В этом случае на упорный подшипник воздействует только сила тяжести ЭЦН, а вал привода воспринимает лишь полезные скручивающие усилия. Но в реальных условиях на характеристики УЭЦН и величину статического момента сопротивления погружного электродвигателя (ПЭД) оказывает значительное влияние процесс солеотложения на рабочих органах насоса, вследствие чего происходит «подклинивание» рабочих колес насоса и появляется дополнительная составляющая $M_{\text{доп}}$ статического момента. Причем количество «подклиненных» рабочих колес, а значит, и изменение величины момента нагрузки носят случайный характер и индивидуальны для различных установок и скважин. Однако в общем случае имеется тенденция увеличения момента нагрузки вплоть до полного «заклинивания» насоса, что приводит к отключению защиты (или перегреву изоляции), срезанию шпонки или скручиванию вала [1, 2].

На рис. 1 приведены рассчитанные кривые, иллюстрирующие процесс изменения механических характеристик насоса при отложении солей в его рабочих колесах в процентном отношении от общего числа колес. Здесь подразумевается, что при отложении солей в 1 % рабочих колес они потеряли осевую подвижность и все их рабочие вращающиеся поверхности имеют трение о налипшие солевые отложения. Причем процесс солеотложения начинается на входе в насос и постепенно распространяется вверх, заполняя все рабочие органы насоса. Соответственно при отложении солей в 100 % все рабочие колеса ЦН потеряли осевую подвижность и имеют трение о налипшие солевые отложения.

Целью данной работы является анализ возможных способов «расклинивания» насоса УЭЦН, определение оптимального способа и разработка рекомендаций по его применению.

В данном случае принимаем, что в процессе заклинивания рабочих колес насоса статический момент $M_{сз}$ превышает момент $M_{кз}$ короткого замыкания ПЭД на данной механической характеристике, происходит заклинивание преобразователя частоты (ПЧ) в результате превышения током цепи статора допустимого значения, определяемого уставкой защиты, и остановка электродвигателя.

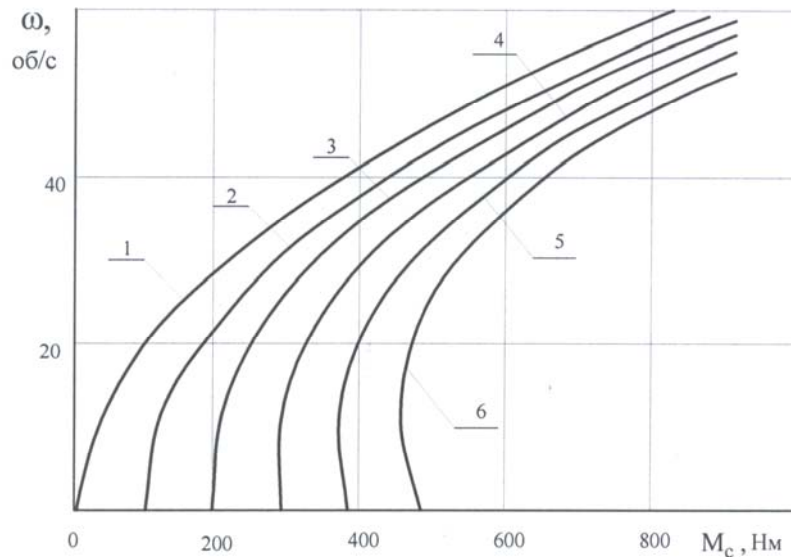


Рис. 1. Механические характеристики насоса установки ЭЦН5-125 при отложении солей в рабочих органах насоса с учетом явления залипания в начальный момент пуска:
 1 — нет солеотложения; 2 — солеотложение в 20 % рабочих органов; 3 — в 40 %;
 4 — в 60 %; 5 — в 80 %; 6 — в 100 %

Для «расклинивания» ПЭД необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие

$$M_{сз} < M < M_{\max}, \quad (1)$$

где M — момент электродвигателя, M_{\max} — максимально допустимый момент на валу насоса.

Так как скорость ω при заклинивании насоса равна нулю, то

$$M = M_{кз}. \quad (2)$$

Если выполнено условие (1), то статическая механическая характеристика насоса, кривая изменения в процессе «расклинивания» статического момента $\omega = f(M_{с})$ и динамическая механическая характеристика ПЭД $\omega = f(M_{д})$ будут иметь вид, представленный на рис. 2.

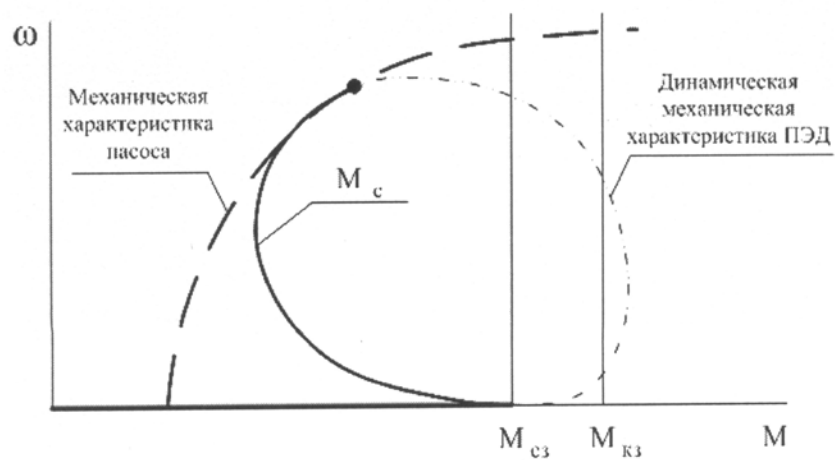


Рис. 2. Статическая механическая характеристика насоса, кривая изменения в процессе «расклинивания» статического момента $\omega = f(M_c)$ и динамическая механическая характеристика ПЭД $\omega = f(M_d)$

В настоящее время для «расклинивания» ПЭД применяют «толчковый» режим разгона, заключающийся в том, что при постоянной частоте напряжения питания скачком увеличивают его величину, а затем производят согласованное совместное изменение частоты и величины напряжения до требуемого значения, как это показано на рис. 3 [3].

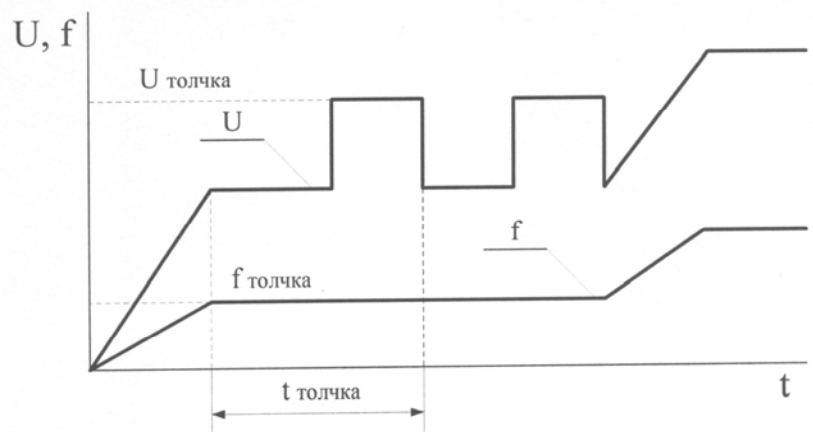


Рис. 3. Изменение выходного напряжения и частоты в режиме разгона «толчковый» путем изменения величины напряжения питания

На рис. 4 представлена разработанная в среде Matlab/Simulink модель асинхронного двигателя (АД) с учетом сопротивления длинного кабеля, скорость которого регулируется величиной и частотой напряжения питания обмотки статора. С помощью этой модели построены кривые зависимости пускового момента $M_{кз}$ ПЭД от величины напряжения при его различных частотах [4].

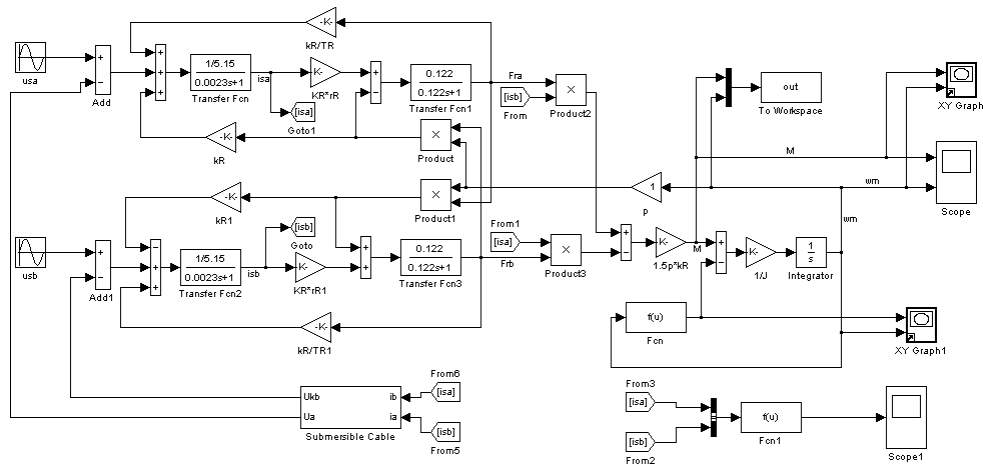


Рис. 4. Схема модели АД в среде Matlab/Simulink

Однако известно, что у АД регламентируется не только электромагнитный момент, но и ток цепи статора. Поэтому в процессе «расклинивания» насоса необходимо учитывать и величину тока. Причем исходя из условий нагрева желательно получение в процессе пуска максимально возможного момента при минимальном токе статорной цепи.

Ток статорной цепи для точек короткого замыкания рассчитывается исходя из следующих соображений.

В точке короткого замыкания при $\omega = 0$ КПД η равен нулю и мощность P_c , потребляемая из сети, полностью расходуется на потери ΔP , т.е.

$$P_c = 3UI \cos \varphi = \Delta P, \quad (3)$$

где U — фазное напряжение питания ПЭД, В; I — ток цепи статора, А; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности.

Потери ΔP складываются из переменных V , зависящих от нагрузки, и постоянных K [5].

Переменные потери определяются как

$$V = M\omega_0 S \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right), \quad (4)$$

где ω_0 — скорость идеального холостого хода ПЭД, рад/с; M — момент ПЭД, Н·м; S — скольжение; R_1, R_2 — активные сопротивления цепей статора и приведенное ротора соответственно, Ом.

Постоянные потери складываются из механических потерь K_m , потерь K_{cc} — в стали статора, потерь K_{cp} — в стали ротора и потерь K_{tm} от тока I_m намагничивания (тока холостого хода).

Механические потери зависят от скорости ПЭД и при $\omega = 0$ равны нулю.

Согласно [6], суммарные потери в стали и потери от тока намагничивания зависят как от величины, так и от частоты напряжения питания и составляют не более 8–10 % от суммарных потерь. Поэтому ими можно пренебречь и считать примерно равными нулю.

Так как в данном случае исследуется режим короткого замыкания ПЭД, где $S = 1$, то с учетом всего изложенного (3) можно записать:

$$M\omega_0\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 3UI \cos \varphi. \quad (5)$$

Отсюда ток I статорной цепи определяется следующим образом:

$$I = \frac{M\omega_0\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}{3U \cos \varphi}. \quad (6)$$

Представим (6) в относительных единицах (все параметры в относительных единицах обозначены *):

$$I^* = \frac{M_n \omega_{0n} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}{3U_n I_n \cos \varphi} \times \frac{M^* \alpha}{U^*}, \quad (7)$$

где U_n , I_n , M_n — номинальные напряжение, ток и момент ПЭД соответственно; ω_{0n} — скорость идеального холостого хода ПЭД при номинальной частоте напряжения питания; $\alpha = \frac{f}{f_n}$, $M^* = \frac{M}{M_n}$, $U^* = \frac{U}{U_n}$ — относительные частота, момент и величина напряжения питания соответственно; f_n — номинальная частота напряжения питания.

Введем обозначение

$$C = \frac{M_n \omega_{0n} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}{3U_n I_n \cos \varphi}. \quad (8)$$

Для данной погружной установки R_1 и R_2 являются величинами постоянными.

При $S = 1$ коэффициент мощности определяется величиной критического скольжения, которое не зависит от величины напряжения питания электродвигателя и, при частотном регулировании скорости, от его частоты.

Следовательно, коэффициент C является постоянным для каждого данного ПЭД, т.е., с учетом (7), (8) можно представить в виде

$$I^* = C \frac{M^* \alpha}{U^*}. \quad (9)$$

На рис. 5 показаны рассчитанные по модели АД и приведенным выше формулам кривые зависимостей пускового тока I^* (пунктирной линией) и момента $M^*_{кз}$ (сплошной линией) от величины напряжения при его различных частотах.

Из анализа кривых рис. 5 следует, что указанные зависимости носят нелинейный характер. Причем dI^*/dU^* является величиной переменной во всем реальном диапазоне изменения величины и частоты напряжения питания. Из этого факта следует, что в производственных условиях практически невозможно достаточно точное прогнозирование величин и частот напряжения питания, при которых выполнялось бы условие получения максимального момента при минимальном токе.

Рассмотрим подход к «расклиниванию», когда оно производится путем скачкообразного изменения частоты α при постоянной величине напряжения питания. Кривые зависимостей тока I^* и момента $M^*_{кз}$ от частоты при различных величинах напряжения приведены на рис. 6.

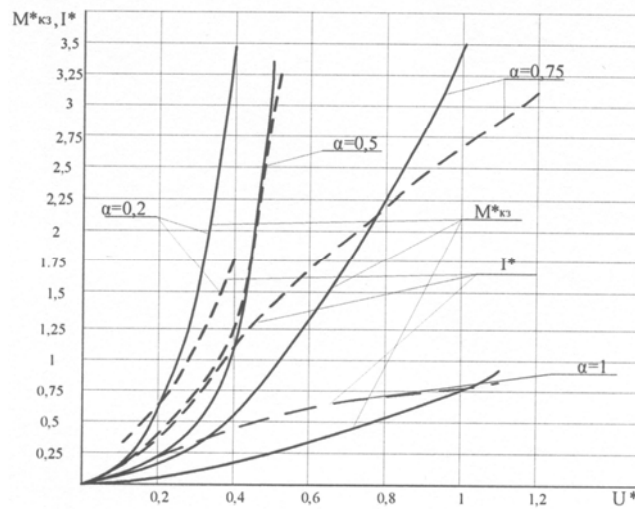


Рис. 5. Кривые зависимостей тока I^* и момента $M_{кз}^*$ от величины напряжения при его различных частотах

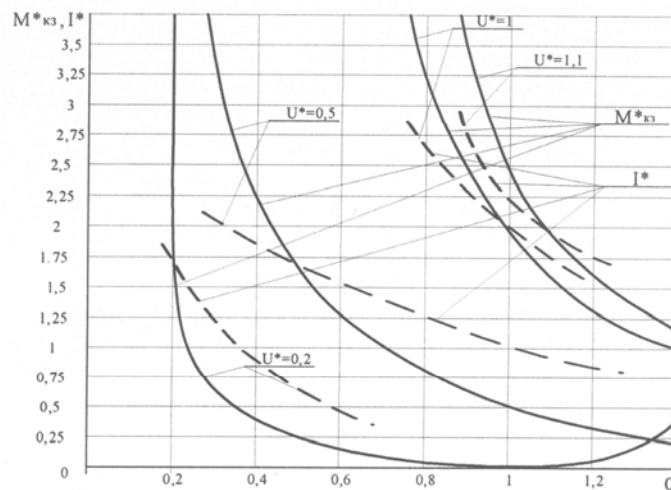


Рис. 6. Кривые зависимостей тока I и момента $M_{кз}$ от частоты при различных величинах напряжения

Из анализа представленных кривых следует, что здесь зависимости токов от частоты более близки к линейным, чем в предыдущем случае. Кроме того, видно, что

$$\frac{dI^*}{d\alpha} < \frac{dM_{кз}^*}{d\alpha}. \quad (10)$$

Следовательно, определение желательных значений частоты и величины напряжения при «расклинивании» является более простым и программируемым, чем в предыдущем случае. Причем здесь возможно предварительное задание пусковых значений момента и тока.

Из (9) получаем

$$\frac{I^*}{M_{кз}^*} = \frac{U^*}{C\alpha}. \quad (11)$$

Согласно (11) задаем соотношение тока и момента для расклинивания и при данном C получаем величины напряжения и частоты, обеспечивающие это соотношение. Причем это соотношение должно быть рассчитано также из условия получения момента, не превышающего максимального, указанного в паспортных данных двигателя, а с другой стороны, достаточного, чтобы преодолеть момент статического сопротивления насоса.

При этом диаграмма изменения величины и частоты напряжения питания будет иметь вид, представленный на рис. 7.

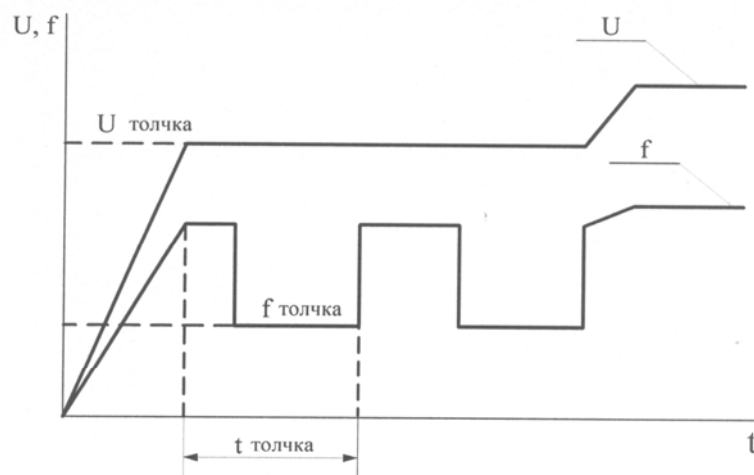


Рис. 7. Изменение выходного напряжения и частоты в режиме разгона «толчковый» путем изменения частоты напряжения питания

Так как современные ПЧ имеют в комплекте поставки микропроцессорные контроллеры (МПК), в данном случае предлагается программное задание уравнения (11) для различных ситуаций «расклинивания» рабочих колес насоса.

Известно, что в процессе функционирования УЭЦН производится мониторинг тока статорной цепи ПЭД, величины и частоты напряжения питания. Предварительно разрабатывается и закладывается в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) микропроцессорного контроллера зависимость $M_c^* = f(U^*, \alpha, I^*)$.

Если произошло «заклинивание» насоса, из указанной выше зависимости по значению тока статорной цепи, по величине и частоте напряжения определяется величина M_c , при котором произошло «заклинивание». В зависимости от этой величины программно формируется задание $\frac{I^*}{M_{кз}^*}$.

Задающий сигнал U_3 поступает в систему широтно-импульсного управления (СШИУ) автономного инвертора напряжения (АИН) ПЧ, где формируются соответствующие управляющие импульсы, подаваемые на управляющие электроды транзисторов инвертора ПЧ (рис. 8).

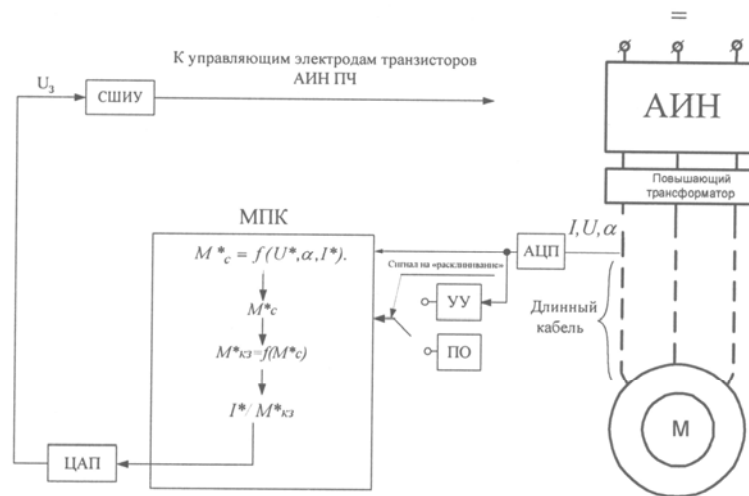


Рис. 8. Функциональная схема формирования задающего сигнала на расклинивание рабочих колес насоса

Таким образом, сигнал на осуществление «расклинивания» может быть задан автоматически блоком устройство управления (УУ), в котором происходит анализ тока статора, величины и частоты напряжения питания, либо с пульта оператора (ПО).

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

- в настоящее время «расклинивание» рабочих колес насоса УЭЦН производится путем скачкообразного увеличения напряжения питания ПЭД при его постоянной частоте. При этом не прогнозируется значение тока статорной цепи, который может достигать недопустимо больших величин, в результате «расклинивания» не происходит, срабатывает токовая защита и процесс «расклинивания» прекращается;
- проведенные исследования показали, что более целесообразно осуществлять «расклинивание» рабочих колес путем скачкообразного снижения частоты напряжения питания при его постоянной величине;
- в работе предложена методика задания соотношения момента и тока ПЭД в процессе «расклинивания»;
- предложено использование микропроцессорного контроллера для задания основных параметров процесса «расклинивания» рабочих колес насоса УЭЦН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ведерников В.А., Кучерюк В.И., Лопатин Р.Р. Исследование момента сопротивления погружного ЭЦН // Сборник трудов XV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «СТТ-2009». Томск: ТПУ, 2009. Т. 1. С. 438–440.
2. Ведерников В.А., Гапанович В.С., Козлов В.В. Особенности применения погружных электроцентробежных насосов на нефтяных месторождениях Среднего Приобья // Вестн. кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2008. № 7. С. 27–32.
3. Станция управления ЭЛЕКТОН-05. Руководство по эксплуатации ЦТКД-065-РЭ. Радужный, 2005. 64 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

5. Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1974. 632 с.

6. Ведерников В.А., Лысова О.А. Описание и анализ стендовых исследований насосной электроцентробежной установки (УЭЦН) // Изв. вузов. Горный журн. 2003. № 5. С. 89–92.

V.A. Vedernikov, O.A. Lysova, R.R. Lopatin

*INVESTIGATION AND ANALYSIS OF «DISJOINING» PROCESS REGARDING
SUBMERSIBLE PUMPS IN OIL PRODUCTION UNITS*

Subject to investigation and analysis being parameters of submersible electric motors under «disjoining» of centrifugal pumps in electric centrifugal pumping units supplied with frequency converters. The paper gives recommendations for accomplishing more efficient «disjoining».

Oil production, centrifugal pump, disjoining, parameters.