

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПУСКА УСТАНОВОК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

ЛЫСОВА О. А., ФРАЙШТЕТЕР В. П., СМИРНОВ А. Ю.

Известно, что ритмичная, высокопроизводительная, а следовательно, и конкурентоспособная деятельность любого нефтедобывающего предприятия в значительной мере определяется безаварийной и надежной работой погружных насосов добычи нефти, а последняя, в свою очередь, существенно зависит от качества функционирования электрооборудования. Режимы работы установок центробежных электронасосов (УЭЦН) часто отличаются от оптимальных. Технология требует применения регулируемого электропривода, работающего в тяжелых условиях. В реальных условиях на характеристики УЭЦН и величину статического момента погружного электродвигателя (ПЭД) оказывает значительное влияние процесс солеотложения на рабочих органах насоса, за счет чего происходит «подклинивание» рабочих колес насоса. Практически 70 % отказов УЭЦН связаны с отложением солей и засорением механическими примесями, которые во многих случаях тоже являются теми же самыми солями, которые не отложились на поверхностях скважинного оборудования, а выпали в качестве твердого осадка и потом попали вместе с потоком жидкости внутрь насоса. В самом насосе соль отлагается в рабочих органах, в первую очередь на первых и последних ступенях насоса – до 45 и 21 % соответственно. Указанные негативные факторы приводят к подклиниванию рабочих колес центробежного насоса (ЦН), что вызывает появление дополнительной составляющей момента статического сопротивления. Количество отложившейся соли и вынос механических примесей в рабочих органах насоса являются индивидуальными величинами для каждой скважины и достаточно сложны для прогнозирования. Однако в общем случае наблюдается тенденция увеличения момента нагрузки на валу двигателя, вплоть до полного заклинивания насоса. Расклинивание вала установки ЭЦН – достаточно сложный процесс, требующий комплексного подхода. Все попытки восстановить работоспособное состояние ЭЦН сводятся к работе установки в режиме перегрузки – так называемый «тяжелый пуск». В последние годы для электропривода погружных установок все чаще стала применяться система преобразователь частоты–асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД). Применение этой системы позволяет оптимизировать функционирование УЭЦН и использовать более совершенные способы расклинивания погружного насоса.

Ключевые слова: преобразователь частоты; затрудненный пуск УЭЦН; законы частотного регулирования; пусковой момент; пусковой ток.

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

Погружные бесштанговые центробежные насосы приводятся в действие электродвигателем, находящимся в скважине вместе с насосом. Благодаря этому устраняется длинная движущаяся механическая связь (штанги) между приводом

Лысова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики. 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Тюменский индустриальный университет. E-mail: lisova_oa@mail.ru

Фрайштетер Виталий Пинкосович – кандидат технических наук, начальник электро-технического отдела. 628000, г. Нефтеюганск, ул. Сургутская, 4а/2, ООО «ЮНИПИ». E-mail: frayshteter52@mail.ru

Смирнов Александр Юрьевич – начальник отдела геологии и разработки месторождений Ямала. 625000, г. Тюмень, ул. 50 лет ВЛКСМ, 53, ОАО «НОВАТЭК НТЦ». E-mail: smirnoffau@mail.ru

и насосом, который является основным элементом глубинонасосной установки с плунжерными насосами. Это позволяет повысить мощность погружного насоса, т. е. его напор и подачу, применить центробежный тип насоса, наиболее подходящий для высоких отборов жидкости из скважины.

Технологическими особенностями работы УЭЦН являются следующие [1, 2]:

- несовершенство методики выбора типоразмера установки и методики ее выбора, особенно для пластов с нестабильным дебитом, то есть для получения требуемой подачи в процессе эксплуатации необходимо корректировать скорость электродвигателя по сравнению с расчетной;

- снижение в процессе работы коэффициента продуктивности пласта в результате изменения фильтрационных свойств пород и коллектора, что ведет к необходимости изменения скорости погружного электродвигателя (ПЭД) в процессе эксплуатации;

- снижение диаметра насосно-компрессорных труб (НКТ) из-за отложений солей и парафина, то есть для получения постоянной подачи в процессе эксплуатации необходимо повышение скорости ПЭД;

- в результате износа рабочих органов насоса происходит образование локальных потоков (часть жидкости вращается вокруг ПЭД, не попадая в НКТ), что ведет к перегреву ПЭД. Для снижения этого эффекта необходимо уменьшение скорости электродвигателя;

- в процессе эксплуатации происходит «подклинивание» рабочих колес насоса, заключающееся в том, что рабочие колеса фиксируются, садятся на опорный подшипник и к валу ПЭД прикладывается повышенная нагрузка, то есть возрастает статический момент. Причем в процессе работы происходит стохастическое как заклинивание, так и расклинивание неопределенного количества рабочих колес насоса, что ведет к постоянному колебанию статического момента M_c ;

- повышенная чувствительность к колебаниям питающего напряжения. Особенно сказывается снижение напряжения на пусковом моменте двигателя, которое на зажимах статора из-за значительных потерь на сопротивление токопроводящего кабеля всегда намного ниже номинального. При насосной эксплуатации наклонных скважин вследствие прогиба труб и вала насосов пусковой момент часто оказывается недостаточным для преодоления начального момента сопротивления. Это приводит к необходимости многократного включения ПЭД при запуске и, как следствие к частичной или полной потере изоляции токопроводящих узлов. При этом происходит изменение скорости электродвигателя, сопровождаемое изменением подачи насоса, что ведет к значительным гидравлическим ударам;

- наиболее тяжелым для ПЭД является период освоения скважины или пуска ее в эксплуатацию после завершения бурения либо «заглушения» (например, после ремонта). В начале эксплуатации уровень находится значительно выше уровня, где расположен ПЭД. Причем сначала в насос подается не жидкость из пласта, а суспензия – буровой раствор или тяжелая технологическая жидкость для глушения скважин. Прежде чем начинать откачивать пластовую жидкость, необходимо откачать эту суспензию, имеющую значительно большую плотность, чем пластовая жидкость, то есть ПЭД работает с повышенными токами, что ведет к его перегреву [3]. Поэтому через некоторый промежуток времени электродвигатель отключают, дают ему остыть, а затем включают снова и так до тех пор, пока не будет достигнут установившийся динамический уровень $H_{дин}$ пластовой жидкости в скважине.

После длительных простоев погружного оборудования, возникающих из-за аварийных остановок, срабатывания защит УЭЦН, отключения линии электропитания и т. д. появляются залипания рабочих органов. Кристаллы солей связы-

вают между собой рабочее колесо и направляющий аппарат, образуются очень плотные соединения. Разрушить такие соединения достаточно сложно – приходится разрушать структуру солевых отложений, то есть межмолекулярную связь. Таким образом, на этапе пуска наблюдается дополнительное повышение момента сопротивления насоса. Залипание 20 % рабочих колес приводит к увеличению нагрузки на дополнительные 100 Н · м при пуске.

Если электропривод УЭЦН является нерегулируемым, т. е. осуществляется прямой пуск ПЭД, то статический момент может оказаться больше пускового.

В последнее время для привода погружного насоса широко применяется система преобразователь частоты–асинхронный электродвигатель (ПЧ–АД). Целью данной работы является выбор способа пуска погружного электродвигателя в системе ПЧ–АД в осложненных условиях.

Для осуществления возможности расклинивания насоса необходим реверс скорости и энергии. В настоящее время в рамках использования автономных инверторов напряжения (АИН) реверс скорости может осуществляться путем изменения чередования фаз напряжения питания ПЭД за счет изменения порядка отпираания транзисторов инвертора. Однако при этом реверс энергии отсутствует, но при переходе с высших скоростей на низшие в индуктивностях повышающего трансформатора и обмотки статора накапливается энергия, что приводит к их дополнительному нагреву. Для избегания этого ее необходимо погасить путем рекуперации в сеть, т. е. применить реверсивный с точки зрения энергии преобразователь.

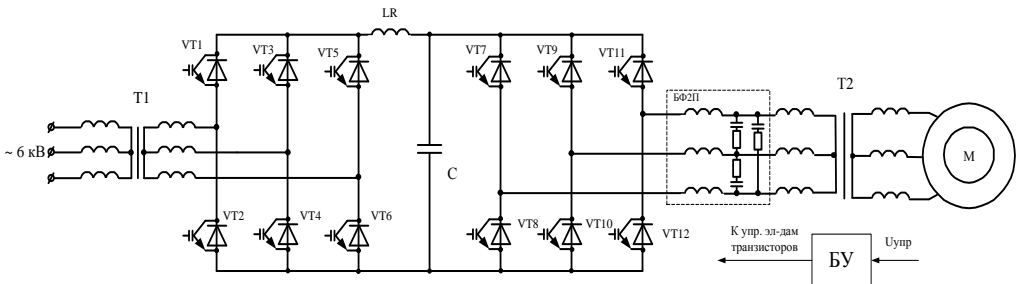


Рис. 1. Принципиальная схема разомкнутой системы электропривода УЭЦН: БФ2П – выходной фильтр ПЧ; БУ – блок управления ПЧ

Таким преобразователем является преобразователь с автономным инвертором тока (АИТ). Однако АИТ обладают целым рядом недостатков, препятствующих их применению в электроприводе УЭЦН.

Поэтому здесь предлагается применить реверсивный преобразователь, работающий в 4-х квадрантах $M-\omega$ координат (где M – момент АД; ω – угловая скорость АД), построенный на базе автономных инверторов напряжения, выпускаемый отечественными фирмами [4].

В этом случае принципиальная схема разомкнутой системы электропривода погружного насоса имеет вид, приведенный на рис. 1.

Силовые модули мостов сетевого выпрямителя и автономного инвертора идентичны. В качестве сетевого выпрямителя используется трехфазный диодно-транзисторный мост. Диодный мост является сетевым выпрямителем в двигательном режиме электропривода, обратный транзисторный мост – сетевым инвертором в тормозном режиме.

Такая схема, являясь реверсивной как с точки зрения скорости, так и с точки зрения энергии, лишена недостатков, присущих преобразователям с АИТ.

Для уменьшения крутизны фронта импульсов выходного напряжения и ограничения волновых перенапряжений на зажимах АД на выходе АИТ устанавливается фильтр БФ2П, представляющий трехфазную Г-образную R-L-C цепочку.

В данном случае рассматривается УЭЦН с насосом УЭЦН-500-450 с номинальной подачей $Q = 500 \text{ м}^3/\text{сут}$ и номинальным напором $H = 450 \text{ м}$.

Выбранному насосу соответствует двигатель ПЭД-46-123:

Номинальная мощность	$P = 46 \text{ кВт}$
Напряжение фазное	$U = 2000 \text{ В}$
Номинальный ток	$I_n = 24 \text{ А}$
Номинальный момент двигателя	$M_n = 146,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Номинальная скорость	$\omega_n = 314 \text{ рад/с}$
Активное сопротивление статорной цепи	$R_1 = 0,537 \text{ Ом}$
Индуктивное сопротивление статорной цепи	$X_1 = 0,156 \text{ Ом}$
Приведенное активное сопротивление роторной цепи	$R_2 = 0,147 \text{ Ом}$
Приведенное индуктивное сопротивление роторной цепи	$X_2 = 0,265 \text{ Ом}$
Индуктивное сопротивление контура намагничивания	$X_n = 12,044 \text{ Ом}$
КПД	$\eta = 77 \%$
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,84$
Перегрузочная способность	$M_n/M_{\text{ном}} = 2$
Момент инерции системы	$J = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Температура окружающей среды	$Q_{\text{о.с}} = 70^\circ \text{С}$

Для питания электродвигателя применяется реверсивный преобразователь частоты АТ05-055-1290 с автономным инвертором напряжения производства корпорации Триол. Его характеристики: $P = 55 \text{ кВт}$; $U = 380 \text{ В}$; $f = 0-100 \text{ Гц}$; КПД = 0,95; $\cos \varphi = 0,95$; вес – 87 кг.

Как указывалось ранее, пуск УЭЦН является достаточно сложным процессом как при освоении скважины из-за необходимости откачивания из пласта не жидкости, а находящейся в ней суспензии, так и при пуске после остановок в результате залипания и заиливания рабочих колес насоса. Из этого следует, что при пуске ПЭД должен развивать достаточно большой пусковой момент. При этом момент электродвигателя не должен превышать некоторой допустимой величины, так как в противном случае может произойти срыв шпонки или скручивание вала. Однако известно, что у АД регламентируется не только электромагнитный момент, но и ток цепи обмотки статора. Поэтому в процессе затрудненного пуска насоса необходимо учитывать и величину тока. Причем, исходя из условий нагрева, желателен получение в процессе пуска максимально возможного момента при минимальном токе статорной цепи.

Известно, что при частотном регулировании скорости необходимо изменение и величины напряжения. В зависимости от формы механической характеристики механизма возможны следующие законы совместного управления частотой и величиной напряжения питания:

$$U^* = \alpha^2; \quad (1)$$

$$U^* = \alpha; \quad (2)$$

$$U^* = \sqrt{\alpha}, \quad (3)$$

где $U^* = U/U_n$; $\alpha = f/f_n$ – относительные значения величины и частоты напряжения питания соответственно; U_n, f_n – номинальные значения величины и частоты напряжения питания соответственно.

Если ПЭД питается от ПЧ, т. е. для УЭЦН используется регулируемый электропривод, то следует иметь в виду, что погружной центробежный насос имеет вентиляторную механическую характеристику и совместное регулирование частоты и величины напряжения должно производиться согласно (1). Как правило, на практике и используется этот закон регулирования (*Инструкция по выводу на режим скважин при помощи станций управления с частотным регулированием. Радужный Владимирской обл. 2014 г.*).

На цифровой модели [5] построено семейство механических характеристик рассматриваемого электродвигателя и насоса при заданном соотношении величины и частоты напряжения питания (рис. 2, а).

Так как затрудненный пуск производится фактически от точки короткого замыкания, то пусковыми моментами и токами являются моменты и токи в этой точке соответственно. Причем ток в этой точке имеет максимальное значение.

Кривые зависимости относительных момента и тока короткого замыкания от относительной частоты при $U^* = \alpha^2$ приведены на рис. 2, б.

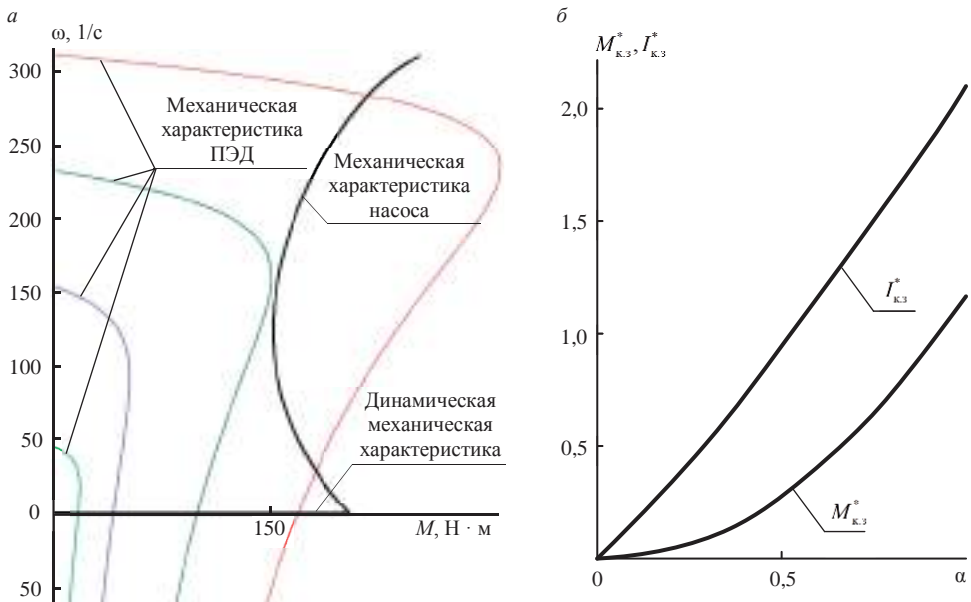


Рис. 2. Семейство механических характеристик ПЭД и насоса – а и кривые зависимости относительных момента и тока короткого замыкания от относительной частоты при $U^* = \alpha^2$ – б

При этом необходимо иметь в виду следующее: согласно рис. 2, а, при $U^* = \alpha$ точки короткого замыкания ПЭД расположены на нелинейных участках механических характеристик. Известно, что при работе асинхронной машины на линейных участках характеристик ток обмотки статора пропорционален моменту электродвигателя и электромагнитной постоянной времени можно пренебречь. Если же рабочая точка электродвигателя перемещается по нелинейным участкам механических характеристик, то ток короткого замыкания достаточно велик, и значительную роль при этом играют электромагнитные переходные процессы. Причем, как указывалось ранее, исходя из условий нагрева желательнее получение в процессе пуска максимально возможного момента при минимальном токе статорной цепи.

Ток обмотки статора 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.

$$P_c = 3UI \cos \varphi = \Delta P, \quad (4)$$

где I – ток цепи статора; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

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

Переменные потери определяются как

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

где ω_0 – скорость идеального холостого хода ПЭД; M – момент ПЭД; S – скольжение; R_1, R_2 – активные сопротивления цепей статора и приведенное ротора соответственно.

Постоянные потери складываются из механических потерь K_M , потерь $K_{с.с}$ – в стали статора, потерь $K_{с.р}$ – в стали ротора и потерь $K_{т.м}$ 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 изложенного (4) можно записать:

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

где $M_{к.з}$ – момент короткого замыкания.

Отсюда ток I статорной цепи определяется следующим образом:

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

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

$$I_{к.з}^* = \frac{M_H \omega_{0H} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)}{3U_H I_H \cos \varphi} \cdot \frac{M_{к.з}^* \alpha}{U^*},$$

где I_H, M_H – номинальные ток и момент ПЭД соответственно; ω_{0H} – скорость идеального холостого хода ПЭД при номинальной частоте напряжения питания; $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания.

Введем обозначение коэффициента

$$C = \frac{M_n \omega_{0н} (1 + (R_1/R_2))}{3U_n I_n \cos \varphi}. \tag{7}$$

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, а при частотном регулировании скорости – от его частоты.

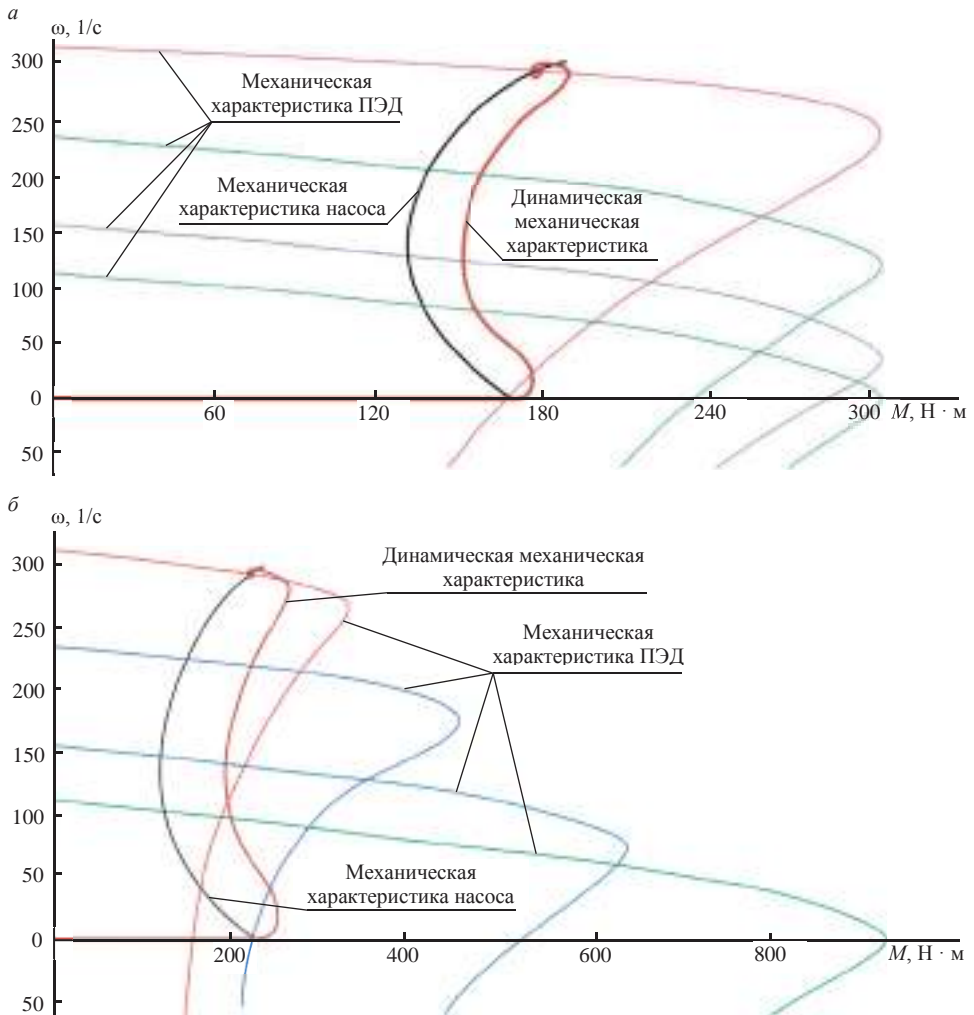


Рис. 3. Семейство механических характеристик ПЭД и насоса:

a – при $U^* = \alpha$; b – при $U^* = \sqrt{\alpha}$

Следовательно, коэффициент C является постоянным для каждого данного ПЭД, т. е. с учетом (5), (7) формулу можно представить в виде:

$$I_{к.з}^* = C \frac{M_{к.з}^* \alpha}{U^*}. \tag{8}$$

Так как в данном случае

$$U^* = \alpha^2,$$

то (8) можно представить в виде

$$I_{к.з}^* = CM_{к.з}^* \frac{1}{\alpha}. \quad (11)$$

Из анализа кривых рис. 2, *а* и рис. 2, *б* следует, что при частотном регулировании скорости согласно (1) ток короткого замыкания возрастает значительно быстрее, чем момент. При моменте, равном номинальному, ток превышает номинальный в два раза. Следовательно, во-первых, такой способ пуска не удовлетворяет условиям нагрева, во-вторых, при моменте, недостаточном для преодоления статического момента, произойдет отключение защиты, т. е. в осложненных условиях надежный частотный пуск ПЭД согласно (1) еще менее вероятен, чем прямой.

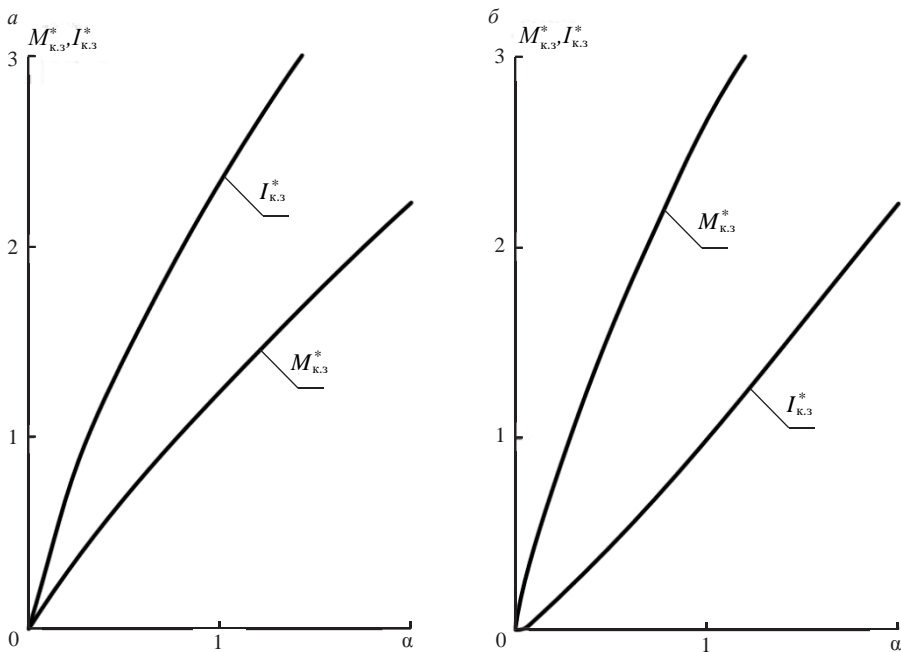


Рис. 4. Кривые зависимости относительных момента и тока короткого замыкания от относительной частоты:

а – при $U^* = \alpha$; *б* – при $U^* = \sqrt{\alpha}$

Семейства характеристик ПЭД и насоса при законах регулирования (2) и (3) приведены на рис. 3, *а* и рис. 3, *б* соответственно.

На основании семейства характеристик рис. 2, *а*, рис. 2, *б* и (8) на рис. 4, *а* и рис. 4, *б* построены кривые зависимости относительных момента и тока короткого замыкания от относительной частоты при $U^* = \alpha$ и $U^* = \sqrt{\alpha}$ соответственно.

Из анализа кривых рис. 3, *а* и рис. 3, *б* следует, что в обоих случаях разгон ПЭД происходит по линейным участкам его механических характеристик, т. е. при

плавном изменении частоты в замкнутой оптимизированной системе электропривода можно пренебречь электромагнитными переходными процессами.

Согласно рис. 4, а, при пуске в соответствии с формулой (2) при любом значении α величина относительного тока короткого замыкания превышает величину относительного момента короткого замыкания. Например, при $\alpha = 0,05$ $M_{к.з}^* = 1,22$, а $I_{к.з}^* = 2,3$, т. е. пусковой момент может оказаться меньше статического, а ток превысит допустимое значение.

Иначе складываются обстоятельства при пуске в соответствии с формулой (3). Согласно рис. 4, б, при любом значении α величина относительного тока короткого замыкания меньше величины относительного момента короткого замыкания. Например, при $\alpha = 0,05$ $M_{к.з}^* = 1,75$ ток $I_{к.з}^* = 0,5$, т. е. при осложненном пуске в рамках допустимого момента ток не превысит допустимого значения, что является оптимальным с точки зрения нагрева.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что частотный пуск ПЭД при освоении скважины и после простоя следует осуществлять при соотношении величины и частоты напряжения питания по закону $U^* = \sqrt{\alpha}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бруслова О. В. Классификация отказов скважин после капитального ремонта по статистическим данным // Нефть и газ. 1998. № 6. С. 23–27.
2. Меньшов Б. Г., Ершов М. С., Яризов А. Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. М.: Недра, 2000. 487 с.
3. Ведерников В. А., Лысова О. А. Описание и анализ стендовых исследований насосной электродвигательной установки (УЭЦН) // Известия вузов. Горный журнал. 2003. № 5. С. 89–92.
4. Каталог продукции и применений. М: Корпорация Триол, 2002. 304 с.
5. 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.
6. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 618 с.

Поступила в редакцию 22 января 2018 года

CENTRIFUGAL ELECTRIC PUMPS UNITS STARTUP METHODS ANALYSIS IN ABNORMAL OPERATING CONDITIONS

Lysova O. A. – Tyumen Industrial University, Tyumen, the Russian Federation. E-mail: lisova_oa@mail.ru

Fraishteter V. P. – ООО ЮНИПИ, Нефтеюганск, the Russian Federation. E-mail: frayshteter52@mail.ru

Smirnov A. Iu. – NOVATEK Scientific and Technical Center, Tyumen, the Russian Federation. E-mail: smirnoffau@mail.ru

It is known that rhythmical, highly-efficient and, consequently, competitive works of an oil production enterprise is significantly determined by accident-free and reliable operation of submersible oil production pumps, and the latter, in its turn, significantly depends on the quality of electric equipment operation. Operation modes of the units of electric-centrifugal pumps (UECP) commonly differ from the optimum ones. Technology requires the use of controlled electric drive, which operates in the most severe conditions. In actual practice, the characteristics of UECP and the value of first moment of submersible electric drive (SED) are significantly influenced by the process of scaling at labor bodies of a pump, by means of which the "blocking up" of pump impellers appears. Almost 70% of UECP breakdowns are connected with scaling and clogging with mechanical impurities, which in most cases are the same salts, which didn't settle on the surface of the well equipment, but precipitated out in solid form, and after that, together with the fluid of liquid, got inside the pump. In the pump itself, salt precipitates in labor bodies, primarily at the first and last stages of the pump – up to 45% and 21% correspondingly. The stated negative factors lead to the centrifugal pump (CP) impellers blocking up, which causes the appearance of an additional constituent of static resistance moment. The quantity of the precipitated salt and the subtraction of mechanical impurities in labor bodies of a pump are individual values for every well and are rather difficult for forecasting. However, generally the tendency is observed of the load moment at the motor shaft increase, up to total pump wedging up. Wedging out of a UECP shaft is rather complicated process, which requires integrated approach. All attempts aimed to recover ECP reduce to the unit overload operation – so called "heavy start". In the recent years, the system frequency transducer – asynchronous motor (FT-AM) is being increasingly applied for the electric drive of submersible units. The use of this system makes it possible to optimize the functioning of UECP and use more advanced methods of submersible pump wedging out.

Key words: frequency transducer; heavy start of UECP; laws of frequency regulation; starting moment; starting current.

REFERENCES

1. Bruslova O. V. [Classification of wells breakdowns after well workover according to statistic data]. *Nefi' i gaz – Oil and Gas*, 1998, no. 6, pp. 23–27. (In Russ.)
 2. Men'shov B. G., Ershov M. S., Iarizov A. D. *Elektrotekhnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoi promyshlennosti* [Electrical engineering plants and complexes in oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 487 p.
 3. Vedernikov V. A., Lysova O. A. [Description and analysis of bench testing of UECP]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2003, no. 5, pp. 89–92. (In Russ.)
 4. Catalogue of products and applications. Moscow, Korporatsiia Triol Publ., 2002. 304 p. (In Russ.)
 5. Vedernikov V. A., Lysova O. A., Krechina G. S., Smirnov A. Iu. [Developing mathematical model of a system FT – submersible drive]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 48–51. (In Russ.)
 6. Chilikin M. G., Sandler A. S. *Obshchii kurs elektroprivoda* [General course on electrical drive]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 618 p.
-