

состава товарной руды, уточнить с учетом экономических требований величину порога разделения.

Перед практическим использованием комплексной технологии обогащения руд участка Пласт 330 необходимо проведение дополнительных исследований на кусковом, а не на керновом материале, а также на пробах с разных участков рудного тела с различной долей неизвлекаемого никеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кряжев, С.Г. Глубинное строение и процесс формирования континентальной коры северо-восточной части Балтийского щита / С.Г. Кряжев и др. // Геохимия. — 2011. — № 1. — С. 101–107.
2. Методические рекомендации № 102 «Отбор технологических проб при геологоразведочных работах на рудные полезные ископаемые» — М.: НСОМТИ ВИМС, 2014.
3. Методические рекомендации № 103 «Оценка обогатимости руд черных и легирующих металлов методами крупнокусковой сепарации». — М.: НСОМТИ ВИМС, 2014.
4. Мокроусов, В.А. Теоретические основы радиометрического обогащения радиоактивных руд / В.А. Мокроусов, Г.Р. Гольбек, О.А. Архипов. — М.: Недра, 1968. — 172 с.
5. Мокроусов, В.А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд / В.А. Мокроусов, В.А. Лилеев. — М.: Недра, 1979. — С. 31 — 50.
6. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под редакцией О.С. Богданова, В.А. Олевского. 2-е изд. — М.: Недра, 1982. — 105 с.
7. Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых. — М.: ГКЗ РФ, 1993. — 26 с.
8. Якубович, А.Л. Ядерно-физические методы анализа и контроля качества минерального сырья / А.Л. Якубович, В.К. Рябкин. — М.: Недра, 2007. — 206 с.

© Коллектив авторов, 2018

Карпенко Игорь Алексеевич // soteo@yandex.ru
Цымбалист Сергей Игоревич // ooox1@yandex.com
Рябкин Виктор Константинович // rmo-vims@mail.ru
Литвинцев Эдуард Георгиевич // rmo-vims@mail.ru
Куликов Данила Алексеевич // soteo@yandex.ru
Хашковская Татьяна Николаевна // tnhas@nikel.spb.ru
Ратнер Вадим Борисович // rmo-vims@mail.ru

УДК (696.6+628.9 622.143) (075.8)

Башкуров А.Ю. (МГРИ-РГГРУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЖНЫМ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ

В работе предложена структура управления режимом работы скважинного насосного агрегата, обеспечивающая экономию электроэнергии и ресурсосбережение, исключая абразивное воздействие песка на лопатки насоса за счет плавного регулирования скорости электродвигателя. Целью работы является создание модели системы управления погружным насосным агрегатом. **Ключевые слова:** насосный агрегат, частотно-регулируемый привод.

Bashkurov A.Yu. (MGRI-RGGRU)

SIMULATION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE SUBMERSIBLE PUMP UNIT

Proposed management structure and mode of operation of the downhole pump unit, ensuring energy saving and resource saving, eliminating the abrasive effect of sand on the blades of

the pump due to variable regulation of the speed of the motor. The aim of this work is to create a model of the control system of the submersible pump unit. Keywords: pumping unit, variable frequency drive.

Функционирование скважин характеризуется переменным притоком, сопровождающимся изменением статического напора H_c . Переменный уровень жидкости в скважине связан с потерями электроэнергии. Таким образом, возникает необходимость стабилизации уровня жидкости на высоких отметках.

В современных отечественных и зарубежных системах регулирование режимов работы насосных установок осуществляется посредством автоматизированного регулируемого электропривода [1]. В таких системах регулируемым параметром является уровень жидкости в скважине, значение которого выбирается исходя из следующих соображений. С энергетической точки зрения уровень следует поддерживать на самой высокой отметке, т.к. это уменьшает статическую высоту подъема жидкости. Однако при этом следует учитывать величину притока в скважину, т.к. высоко заявленный уровень может не соответствовать притоку жидкости. Это может привести к сбою системы автоматической стабилизации уровня жидкости. Схема стабилизации уровня жидкости в скважине рассмотрена на примере системы, изображенной на рис. 1, а процесс стабилизации — на рис. 2.

Процесс стабилизации уровня жидкости в скважине рассмотрен на напорных характеристиках трубопровода и насоса. Допустим, что в некоторый момент времени насос работает с угловой скоростью ω_1 и обеспечивает подачу Q_1 и напор H_1 . Этому режиму соответствует уровень жидкости в резервуаре или скважине $h_{зад}$ и приток q_1 . Предположим, что в следующий момент времени приток изменится в сторону уменьшения и станет равным q_2 . Тогда из-за несоответствия притока и откачки $q_2 < Q_1$ уровень воды в скважине снизится на некоторое значение Δh .

Таким образом, увеличится статическая составляющая напора, а характеристика трубопровода займет положение D. При этом подача насоса уменьшится до

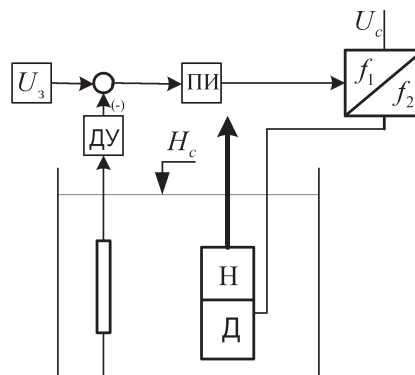


Рис. 1. Схема стабилизации уровня жидкости в скважине: U_3 — сигнал задания по уровню жидкости; ПИ — пропорционально-интегральный регулятор; ДУ — преобразователь датчика уровня; Н — насосная часть агрегата; Д — двигательная часть агрегата

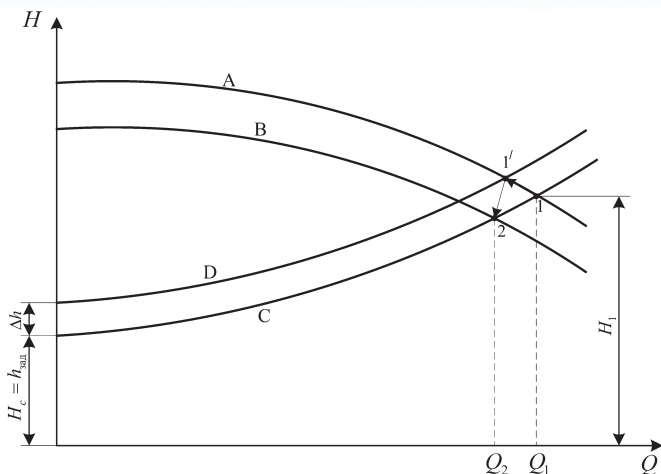


Рис. 2. Процесс стабилизации уровня жидкости в резервуаре или скважине: А — напорная характеристика насоса при ω_1 ; В — то же при ω_2 ; С — характеристика трубопровода при заданном уровне; D — характеристика трубопровода при пониженном уровне

точки 1', но это не компенсирует уменьшение притока. За счет того, что характеристики насоса и трубопровода криволинейны подача насоса снизится в гораздо меньшей степени, чем уменьшится приток. При этом произойдет рассогласование сигнала, поступающего от датчика уровня и задающего сигнала системы регулирования. Далее регулятор выдает обработанный по ПИ-закону сигнал в систему управления частотно-регулируемого электропривода, снижающий угловую скорость насосного агрегата. При снижении угловой скорости характеристика насоса сместится в положение В, соответствующей угловой скорости ω_2 , новому значению притока q_2 и заданному уровню жидкости в скважине, рабочая точка насоса переместится в точку 2. В этой рабочей точке обеспечивается $q_2 = Q_2$.

При увеличении притока система регулирования действует аналогично, но в противоположном направлении. В результате система регулирования поддерживает заданный уровень жидкости в скважине, обеспечивая равенство подачи насоса и притока $Q = q$ и стабильность заданного уровня. Таким образом, обеспечивается работа насосного агрегата в экономичном режиме без превышения статических напоров.

Для исследования процессов влияния основных параметров технологических скважин на режим работы электропривода устанавливаются зависимости подачи напора и статического момента от угловой скорости насосного агрегата.

Для вычисления подачи напора и статического момента насоса при регулируемом электроприводе используем уравнение напорной характеристики центробежного насоса и уравнение характеристики трубопровода [2]:

$$H = H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - S_\phi Q^2;$$

$$H_{мп} = H_c + SQ^2,$$

где: H_ϕ — фиктивный напор насоса; H_c — статический напор насоса, определяется как разность геодезических отметок наивысшей точки подачи жидкости до поверхности жидкости в скважине; ω — текущее значение угловой скорости насоса; $\omega_{ном}$ — номинальная угловая скорость насоса; S_ϕ — фиктивное сопротивление насоса; Q — подача насоса; $H_{мп}$ — напор в начале трубопровода; S — гидравлическое сопротивление трубопровода.

Получаем подачу насоса при регулируемом электроприводе:

$$Q = Q_{ном} \sqrt{\frac{H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - H_c}{H_\phi - H_c}}. \quad (1)$$

Упрощая зависимость, получаем зависимость напора насоса от угловой скорости при регулируемом электроприводе:

$$H = H_c + (H_{ном} - H_c) \cdot \frac{H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - H_c}{H_\phi - H_c}. \quad (2)$$

Зависимость КПД от угловой скорости насоса определяется с помощью формулы Мууди, преобразованной для насосов [2]:

$$\eta_{нас} = 1 - \frac{1 - \eta_{ном}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{0,36}}, \quad (3)$$

где $\eta_{ном}$ — номинальный (паспортный) КПД насоса.

— мощности потребляемой насосом

$$N = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{102 \cdot \eta_n}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где ρ — плотность перекачиваемой жидкости кг/м³ (для чистой воды $\rho = 1000$ кг/м³); Q — секундная подача насоса м³/с; H — напор насоса м (метров водного столба); η_n — КПД насоса отн. ед.;

— момента статического сопротивления от угловой скорости насоса

$$M_{ст} = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot 10^3}{102 \cdot \omega \cdot \eta_n}, \text{ Нм}. \quad (5)$$

При этом стабилизируемым параметром является статический напор H_c , являющийся составной частью этих зависимостей.

Вычисление статического напора H_c (стабилизируемая величина) в соответствии с характеристикой трубопровода производится по формуле:

$$H_c = \frac{H - H_{ном} \cdot \left(\frac{Q_{пр}}{Q_{ном}} \right)^2}{1 - \left(\frac{Q_{пр}}{Q_{ном}} \right)^2}, \quad (6)$$

где $Q_{пр}$ — приток жидкости в резервуар или скважину.

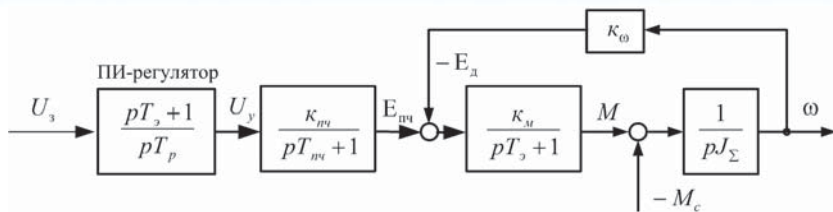


Рис. 3. Структурная схема частотно-регулируемого электропривода

Вычисление уровня жидкости в резервуаре или скважине производится по формуле:

$$H_{yp} = H_{nod} - H_c, \quad (7)$$

где H_{nod} — высота подъема жидкости.

Высота подъема жидкости определяется разностью геодезических отметок между наивысшей точкой подъема жидкости и местом установки насоса, а статический напор определяется разностью геодезических отметок между наивысшей точкой подъема жидкости и уровнем жидкости в резервуаре или скважине.

Формула (7) используется для выбора датчика уровня. При этом учитывается степень агрессивности среды. Учитывая, что на горном производстве наиболее часто транспортируемой жидкостью являются кислотные и щелочные растворы, можно рекомендовать погружной зонд для измерения уровня жидкости типа «Метран-55-ЛМК 858».

Структурная схема частотно-регулируемого электропривода представлена на рис. 3. Она состоит из последовательно соединенных без инерционных, инерционных и интегрирующих звеньев с внутренней обратной связью по угловой скорости. Для обеспечения необходимой точности регулирования координат используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) [3].

Структурная схема частотно-регулируемого насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в скважине представлена на рис. 4. Блоки структурной схемы насоса на рис. 4 представляют собой функциональные зависимости подачи $Q = \varphi(\omega)$ (4.1), напора $H = \varphi(\omega)$ (2), мощности $N = \varphi(Q, H)$ (4) и момента статического сопротивления $M_c = \varphi(N, \omega)$ (5) от угловой скорости насоса. Выделение статического напора для реализации обратной связи по уровню жидкости в скважине осуществляется с помощью блока $H_c = \varphi(Q, H)$.

На основании структурной схемы рис. 4 составляется функциональная схема модели насосного агрегата с использованием программного продукта MatLab в среде Simulink.

Для вычисления подачи, напора, КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой элек-

троэнергии насосным агрегатом используются зависимости, представленные для структуры управления со стабилизацией уровня жидкости в скважине. При этом модель строится таким образом, чтобы обеспечить задание различных исходных данных для возможности моделирования разных насосов с различной плотностью перекачиваемой жидкости и разной высотой подъема

жидкости. Для восприятия модели удобно вычислять каждый из параметров с помощью подсистем (блоки Subsystem).

Функциональная схема модели насосного агрегата с численными значениями для насоса «Oddesse» приведена на рис. 5. Модель может быть использована для любого насосного агрегата при соответствующих исходных данных, вносимых в модель.

Модель насосного агрегата состоит из модели частотно-регулируемого электропривода и модели насоса. Модель электропривода содержит:

- входное устройство задания по уровню жидкости (Constant1);

- сумматор сигналов задания по уровню жидкости и отрицательной обратной связи по уровню жидкости;
- пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор (PID Controller), у которого используются пропорциональная и интегральная части для реализации пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора;

- модель преобразователя частоты, реализованный на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn);
- сумматор ЭДС преобразователя частоты и отрицательной внутренней обратной связи по ЭДС двигателя;
- передаточная функция звена момента, реализованная на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn1);

- сумматор электромагнитного момента двигателя и отрицательного момента статического сопротивления, создаваемого насосом;

- звено скорости двигателя, реализованное с помощью интегратора (Integrator) и усилителя (Gain1);

- внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя реализована с использованием усилителя (Gain).

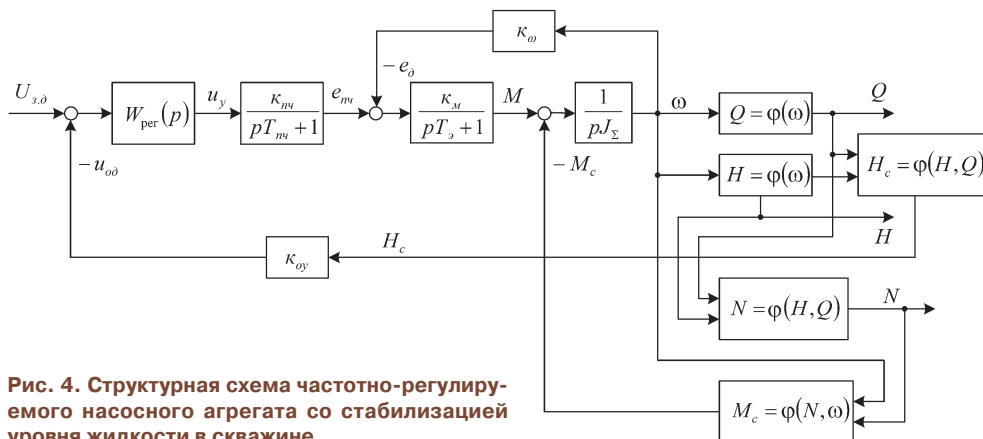


Рис. 4. Структурная схема частотно-регулируемого насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в скважине

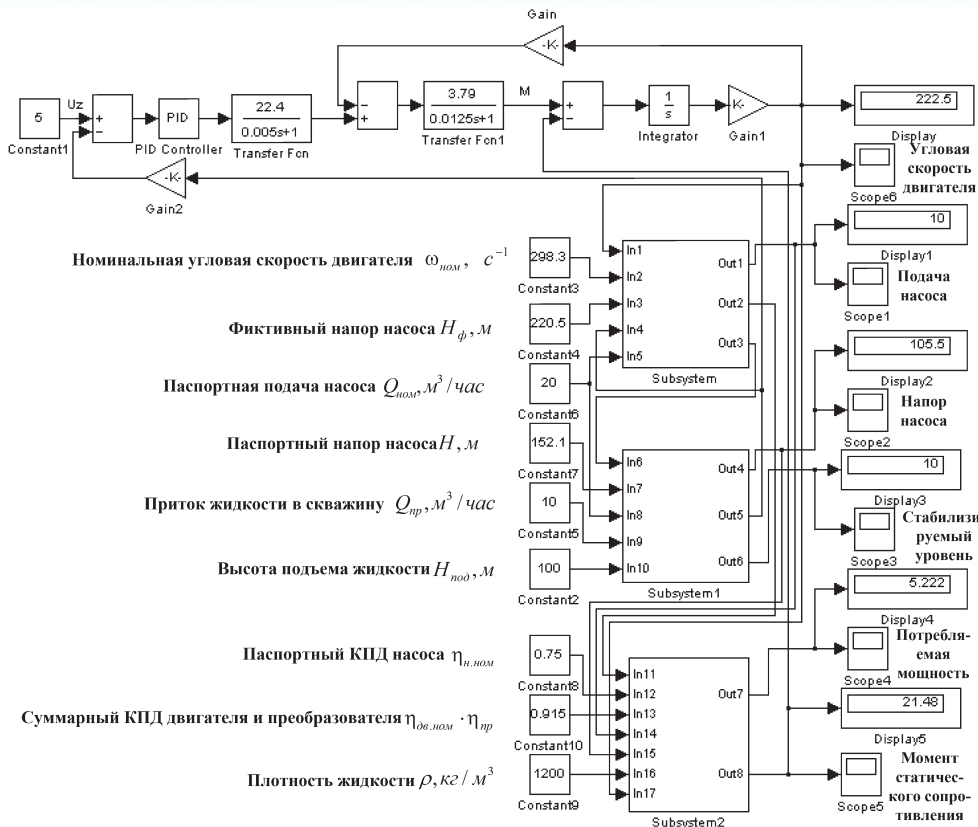


Рис. 5. Функциональная схема модели насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в скважине

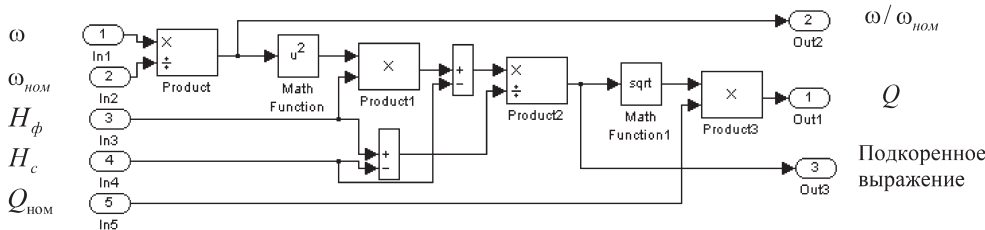


Рис. 6. Функциональная схема модели по выражению (1)

Выходная координата модели частотно-регулируемого электропривода — угловая скорость, регистрируется с помощью дисплея (Display) и осциллографа (Scope6).

Модель насоса представлена тремя подсистемами (Subsystem, Subsystem1 и Subsystem2). Входные (исходные) параметры насоса реализованы на девяти источниках постоянного воздействия (Constant). Отображение численных значений величин, вычисленных в модели, осуществляется с помощью блоков Display, а динамику изменения координат с помощью осциллографов Scope:

подача насоса, м³/час — Display1 и Scope1;

напор насоса, м — Display2 и Scope2;

стабилизируемый уровень, м — Display3 и Scope3; потребляемая мощность насоса, кВт — Display4 и Scope4;

момент статического сопротивления насоса, Нм — Display5 и Scope5.

С помощью подсистемы Subsystem реализована зависимость подачи насоса от угловой скорости насоса по формуле (1)

Подсистема представлена на рис. 6. На схеме набора блоков подсистемы Subsystem:

вход 1 (In 1) — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода; вход 2 (In 2) — задается номинальная угловая скорость $\omega_{ном}$ электродвигателя;

вход 3 (In 3) — задается фиктивный напор H_{ϕ} ;

вход 4 (In 4) — задается вычисленный статический напор H_c с Out 5;

вход 5 (In 5) — задается паспортная (номинальная) величина подачи насоса $Q_{ном}$;

выход 1 (Out 1) — вычисленная величина подачи насоса Q ;

выход 2 (Out 2) — относительное значение угловой скорости двигателя $\omega/\omega_{ном}$, используется в дальнейших расчетах модели;

выход 3 (Out 3) — вычисленное подкоренное выражение (1), используется в дальнейших расчетах модели.

С помощью подсистемы Subsystem1 реализованы зависимости напора насоса от угловой скорости на-

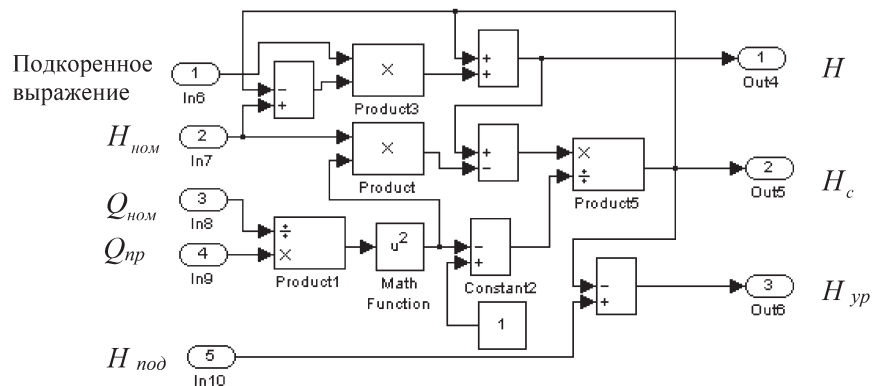


Рис. 7. Функциональная схема модели по выражениям (2), (6) и (7)

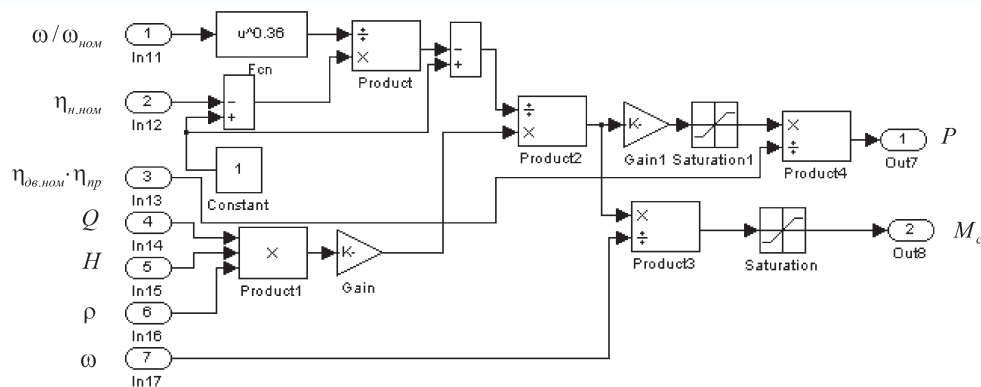


Рис. 8. Функциональная схема модели по формулам (3), (4), (5) и потребляемой мощности

соса и статического напора от расхода жидкости. Вычисление напора насоса в зависимости от угловой скорости насоса производится по формуле (2), а статического напора H_c , в соответствии с характеристикой трубопровода и расхода жидкости по формуле (6). При этом стабилизируемым параметром является статический напор H_c . Вычисление уровня жидкости в скважине производится по формуле (7).

Подсистема Subsystem1 зависимостей (2), (6) и (7) представлена на рис. 7. На схеме набора блоков подсистемы (Subsystem1):

вход 1 (In 6) — подается вычисленное подкоренное выражение (1) с выхода Out 3;

вход 2 (In 7) — задается паспортный (номинальный) напор насоса $H_{ном}$;

вход 3 (In 8) — задается паспортная (номинальная) подача насоса $Q_{ном}$;

вход 4 (In 9) — задается приток в скважину $Q_{пр}$;

вход 5 (In 10) — задается высота подъема жидкости $H_{под}$;

выход 1 (Out 4) — вычисленная величина напора насоса H ;

выход 2 (Out 5) — вычисленная величина статического напора H_c ;

выход 3 (Out 6) — вычисленная величина уровня жидкости в скважине $H_{ур}$.

С помощью подсистемы Subsystem2 реализованы зависимости КПД, активной мощности насоса, потребляемой мощности насосным агрегатом и статического момента сопротивления насоса от угловой скорости.

Для вычисления КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии насосным агрегатом в режиме стабилизации уровня жидкости используются зависимости (3), (4) и (5). Вычисление потребляемой мощности насосным агрегатом производится путем деления активной мощности насоса на произведение КПД двигателя и преобразователя.

Подсистема Subsystem2 зависимостей (3), (4), (5) и потребляемой мощности представлена на рис. 8. На схеме набора блоков подсистемы (Subsystem2):

вход 1 (In 11) — подается вычисленная относительная угловая скорость с выхода Out 2;

вход 2 (In 12) — задается паспортный (номинальный) КПД насоса $\eta_{ном}$;

вход 3 (In 13) — задается произведение номинального КПД двигателя и преобразователя $\eta = \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}$

вход 4 (In 14) — подается вычисленная подача насоса Q с выхода Out 1;

вход 5 (In 15) — подается вычисленный напор насоса H с выхода Out 5;

вход 6 (In 16) — задается плотность жидкости ρ ;

вход 7 (In 17) — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;

выход 1 (Out 7) — вычисленная величина потребляемой активной мощности P ;

выход 2 (Out 8) — вычисленная величина момента статического сопротивления насоса M_c .

С помощью модели можно решать различные задачи, связанные с режимами регулирования насосной установки, энергопотребления и т.п.

Рассмотрим вопросы режима работы насосной установки при стабилизации уровня жидкости в скважине, а именно — как изменяются параметры насосной установки при изменении притока жидкости. Параметры стабилизируемого уровня определены сигналом задания по уровню (Constant1). Изменяя приток жидкости в скважину (Constant5) фиксируются численные значения параметров на Display.

Графические зависимости угловой скорости, подачи, напора, стабилизируемого уровня жидкости и потребляемой мощности от притока жидкости в резервуар представлены на рис. 9.

При стабилизации уровня жидкости в скважине, в частности на отметке 10 м потребляемая мощность зависит только от количества притока жидкости. С увеличением притока увеличивается угловая скорость насосного агрегата, напор, развиваемый насосом и потребляемая мощность. Подача насоса строго соот-

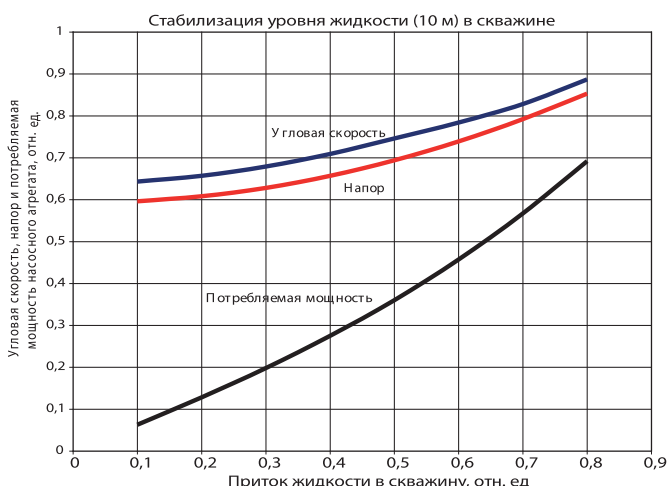


Рис. 9. Графические зависимости угловой скорости, напора и подачи насоса, стабилизируемого уровня и потребляемой мощности насосного агрегата от притока жидкости в скважину

ветствует притоку жидкости, поэтому потребляемая мощность и затраченная электроэнергия соответствуют минимально необходимым величинам. В этом факторе состоит эффект энергосбережения.

На модели удобно определять параметры энергоэффективности при стабилизации уровня жидкости в скважине, если известен суточный или месячный график притока жидкости в скважину.

Для случая, когда используется нерегулируемый электропривод, процессы регулирования уровня жидкости в скважине осуществляются ручным способом посредством дросселирования на трубопроводах с помощью задвижек. В этом случае можно считать, что насос работает с номинальными значениями напора и подачи. Экономия электроэнергии при использовании частотно-регулируемого электропривода в системе стабилизации уровня жидкости в скважине составляет порядка 40 % в год. Для оценки влияния частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата на повышение показателей ресурсосбережения проведено исследование динамических процессов в электроприводе.

Как показывают статистические данные, прямой пуск асинхронного двигателя насосного агрегата вызывает поднятие осадков в виде песка в скважине, которые вызывают абразивный износ лопаток насоса и сокращают срок службы погружного насосного агрегата на 10–15 %.

Для устранения такого негативного явления используется плавный пуск асинхронного двигателя от преобразователя частоты. Для этого можно использовать задатчик интенсивности, с помощью которого можно задать любое время плавного пуска асинхронного двигателя. Однако такой способ имеет отрицательные стороны, т.к. продолжительный пуск не обеспечивает мгновенное автоматическое слежение за уровнем раствора в скважине, и стабилизация уровня происходит с некоторым отставанием.

Вместе с тем ПИ (ПИД)-регулятор также не позволяет резко изменяться угловой скорости асинхронного двигателя. Динамические процессы показывают, что

угловая скорость двигателя изменяется по экспоненте (верхняя осциллограмма), в то время как электромагнитный момент изменяется достаточно резко (нижняя осциллограмма). Время переходного процесса составляет около 0,5 сек.

Если время переходного процесса недостаточно длительное и вызывает поднятие осадков со дна скважины, то следует использовать задатчик интенсивности с разумной длительностью переходных процессов. Время переходных процессов может выбираться экспериментально на реальном объекте таким образом, чтобы не поднимались осадки, и система автоматического регулирования уровня раствора в скважине успевала отслеживать уровень.

Таким образом:

разработанная модель системы управления комплексом «скважина-насос» при ее реализации обеспечивает возможность плавного управления процессом поддержания заданного уровня жидкости в скважине; модель имеет задатчик длительности переходных процессов, позволяющий устанавливать время переходного процесса таким, чтобы не засасывались осадки и песок из скважины в погружной насосный агрегат, которые приводят к повышенному износу деталей;

применение модели совместно с погружным насосным агрегатом «Oddesse-20–150» позволяет экономить годовой расход электроэнергии на 40–45 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башкуров, А.Ю. Повышение эффективности геологоразведочных работ за счет модернизации внутреннего комплексного энергообеспечения / А.Ю. Башкуров: Дисс... канд. техн. наук / ГОУ ВПО «МГРИ-РГГРУ». — М., 2013.
2. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудовных установках / Б.С. Лезнов. — М.: Энергоатомиздат, 2006. — 360 с.
3. Фащиленко, В.Н. Энергоэффективное управление электроприводом погружного насоса агрегата в технологии подземного выщелачивания полезных ископаемых / В.Н. Фащиленко, Ш.М. Худайбердиев. — М.: ГИАБ, 2010. — С. 84–86.

© Башкуров А.Ю., 2018

Башкуров Артем Юрьевич // Bashkurov_A@inbox.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 553.048 + 553

Кушнарев П.И. (ФГБУ «ВИМС»)

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ И ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Для подсчета запасов и геолого-экономической оценки месторождений твердых полезных ископаемых наиболее перспективным направлением является использование горно-геологических информационных систем (ГГИС),

базирующихся на данных блочного моделирования. Рассмотрены особенности традиционного подсчета запасов и блочного моделирования; определена необходимость сопоставления данных подсчетов альтернативными методами. Проанализирован отечественный опыт применения блочного моделирования при разработке ТЭО кондиций и проведении подсчетов запасов. Определены задачи внедрения ГГИС в практику переоценки и отработки месторождений. Акцентировано внимание на актуальности разработки отечественных программных продуктов, для развития которых требуется финансовая, организационная и методическая поддержка со стороны