

Д.А. Стерликов, А.А. Ступников

Тюменский государственный университет, г. Тюмень

УДК 004.41

СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО СЕРВИСА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ НАСТРОЙКИ РЕЖИМА РАБОТЫ УЭЦН

Аннотация. В статье представлен способ определения параметров, влияющих на КПД установки электроцентробежного насоса и способ их прогнозирования.

Ключевые слова: электроцентробежный насос, временные ряды, модель авторегрессии.

Введение

Компании, занимающиеся добычей нефти, зачастую используют системы, позволяющие осуществлять анализ и контроль режимов работы оборудования, используемого на месторождении. На сегодняшний день IT компании предлагают решения по мониторингу параметров работы оборудования, при этом отсутствуют решения позволяющие прогнозировать и автоматизировать настройку режимов работы оборудования в виде модулей, которые можно интегрировать в уже используемые системы.

В данных условиях актуальным является создание информационного сервиса способного спрогнозировать значения параметров, оказывающих наибольшее влияние на КПД установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), а также подобрать на основании прогноза значение частоты подаваемого тока для оптимизации работы.

Расчет напорной характеристики

Для определения параметров влияющих на КПД УЭЦН, собраны актуальные характеристики используемого оборудования. Наиболее важной и распространенной является напорная (рабочая, основная) характеристика - зависимость напора от дебита. В паспортах насосов, как правило, приводятся напорные характеристики, соответствующие базовой частоте вращения вала насоса (табл. 1).

Таблица 1. Пример данных напорно-расчетной характеристики.

Среднее значения НРХ			
Производитель		АЛНАС	
Название насоса		ЭЦНАКИ 5-80И-1300Э	
Частота		50 Гц	
Мин. дебит жидкости		2 м3/сут.	
Макс. дебит жидкости		149 м3/сут.	
№	Дебит м3/сут.	Напор м.	Мощность кВт
1	2	821	8,72
2	22	816	9,23
3	40	812	9,74
4	60	796	10,82
5	70	768	11,26
6	80	724	11,84
7	89	641	12,94
8	100	531	13,99
9	113	382	15,47
10	132	204	16,60
11	149	17	18,00

Для получения значений напора и потребляемой мощности, не указанных в таблице, были интерполированы имеющиеся данные. Интерполяция – способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений. В разрабатываемом модуле интерполяция решается построением полинома Лагранжа:

$$P(x) = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$$

Нахождение коэффициентов полинома осуществляется с помощью решения системы линейных уравнений. Имея коэффициенты полинома

можно получить значения напора при любом показателе дебита нефти, но только при базовой частоте. Для расчета значений напора и мощности в частотах отличных от базовой определяется форма их зависимости от частоты. Напорную характеристику центробежного насоса при фиксированной частоте вращения можно аппроксимировать полиномом степени L [1].

$$H = \sum_{i=0}^L a_i Q^i, \quad (1)$$

где a_i – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики при базовой частоте вращения, Q – дебит жидкости.

Используя закон подобия насосов, можно построить кривые характеристик насосов для разных частот [2].

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}; \quad \frac{H(Q)}{H_0(Q_0)} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^2; \quad \eta(Q) = \eta_0(Q_0).$$

Применяя законы подобия к выражению (1), получим напорную характеристику насоса при любой частоте вращения n , отличной от базовой частоты. В результате можно рассчитать значения напора при значениях частоты отличных от базовой.

$$H = \sum_{i=0}^L a_i Q^i x^{2-i}, \quad (2)$$

где $x = n / n_0$ – относительная частота вращения.

Для интерполяции мощности необходимо определить ее зависимость от дебита и частоты. Гумеров О. А. утверждает, что потребляемая насосом ЭЦН мощность изменяется в кубической зависимости относительно изменения частоты [3].

$$N = \sum_{i=0}^L a_i Q^i x^{3-i} \quad (3)$$

Благодаря данным расчетам можно построить график напорной характеристики для любой частоты, а также рассчитать КПД, с которым работает насос на данный момент. Формула для расчета КПД [4]:

$$\eta = \frac{\rho g H(Q) Q + \Delta P Q}{N(Q)},$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, H – напор, Q – дебит жидкости, ΔP – буферное давление, N – мощность.

На рисунке 1 представлен график с результатами расчета КПД насоса для разных частот.

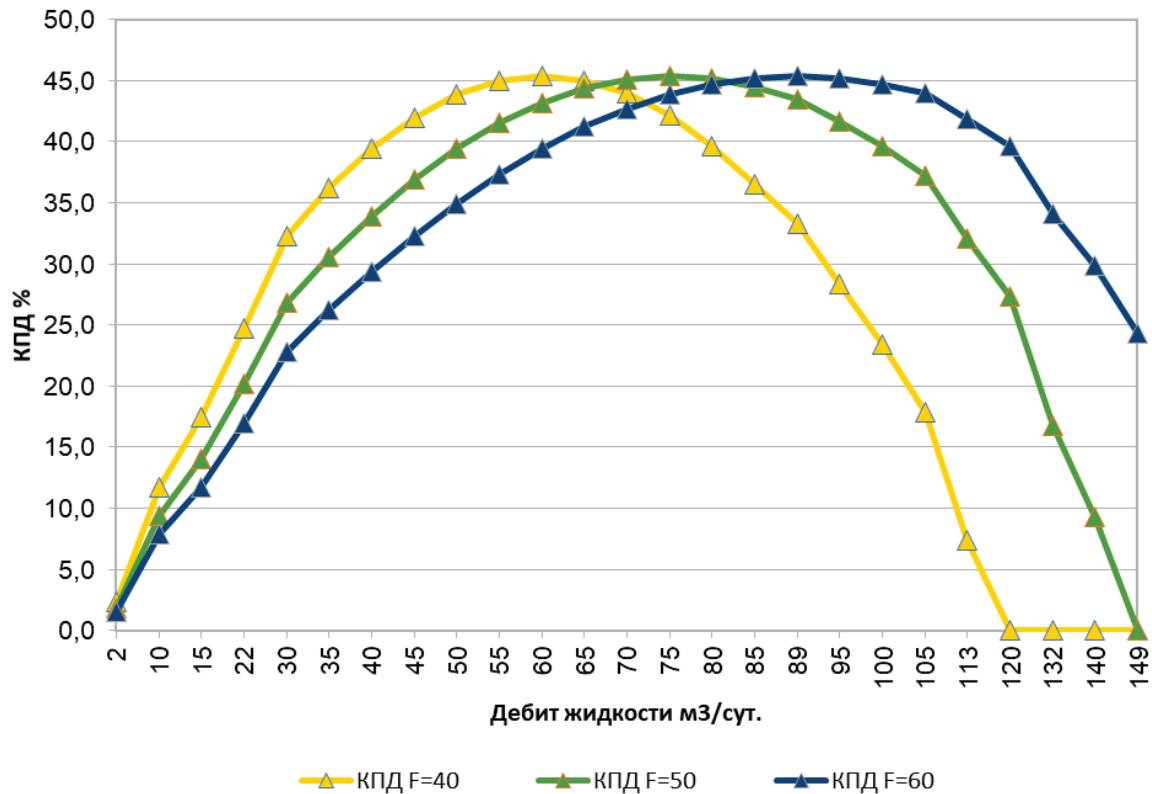


Рис. 2. График зависимости КПД от дебита жидкости.

Информационный сервис, на основании расчетов, позволяет визуализировать напорные характеристики для разных частот в виде графика (рис. 2).

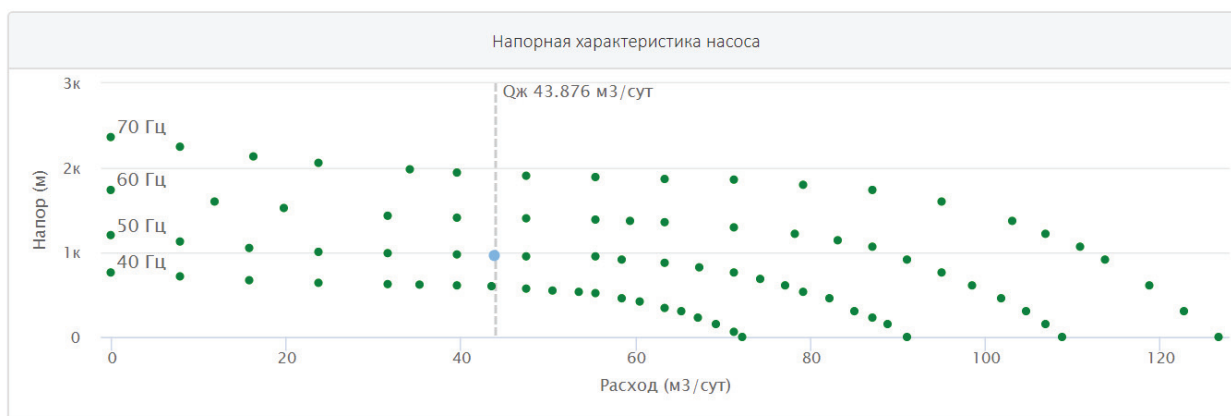


Рис. 3. График напорных характеристик.

Определение параметров

Для определения параметров, влияющих на КПД работы УЭЦН использовались данные, полученные со скважин Антиповско-Балыклейского месторождения. В список собранных параметров вошли не только параметры работы УЭЦН, но и скважины с метрологической системой.

В результате корреляционного анализа были отобраны параметры, которые коррелируют с параметрами используемыми при расчете КПД насосов.

Список отобранных параметров:

- Объёмный расход жидкости
- Плотность жидкости
- Потребляемая мощность насоса
- Обводненность жидкости
- Напор
- Коэффициент загрузки ПЭД

Следующим шагом является проверка зависимости выбранных параметров и КПД насоса. Для тестов были выбраны модели линейной регрессии и случайного леса. Построив модели, появилась возможность оценить по значению ошибки, правильность выбранных параметров.

Оценка произведена с помощью коэффициента детерминации (R-квадрат) [5]. Данный коэффициент определяется следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{V(y|x)}{V(y)} = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2},$$

где $V(y | x) = \sigma^2$ — условная дисперсия зависимой величины y по фактору x .

Для оценки ошибок моделей выборка разделена на обучающую и тестируемую. Учитывая, что временной ряд имеет временную структуру, и случайно перемешивать значения всего ряда без сохранения этой структуры нельзя, иначе в процессе потеряются все взаимосвязи наблюдений друг с другом. Для решения данной проблемы применен метод кросс-валидации на скользящем окне. Обучение модели начинается на небольшом отрезке временного ряда, от начала до некоторого t , делаем прогноз на $t+n$ шагов вперед и считаем ошибку. Обучающая выборка расширяется до $t+n$ значения и прогнозируется с $t+n$ до $t+2n$, так продолжается движение тестового отрезка ряда до тех пор, пока не будет достигнуто последнее доступное наблюдение.

Поделив данные на отрезки и обучая модель с последовательным расширением выборки, получаем следующие результаты:

Таблица 2. Результаты построения моделей.

Модель	Отрезок 1	Отрезок 2	Отрезок 3
Линейная регрессия	0,66	0,7	0,77
Случайный лес	0,8	0,87	0,86

Значения коэффициента детерминации в таблице 2 можно интерпретировать как долю дисперсии зависимой переменной (КПД насоса) от объясняющих переменных (добыча, обводненность, напор и т.д.). В большинстве результатов значение превышает 0,8 из чего можно сделать вывод, что выбранные параметры влияют на КПД УЭЦН.

Построение модели прогнозирования

Учитывая, что параметры прогнозируются по отдельности, каждый временной проверен на стационарность. Для проверки использован обобщенный тест Дики-Фуллера на наличие единичных корней [6].

Для прогнозирования стационарных рядов самыми популярными моделями являются модели авторегрессии и скользящего среднего. Золотарев И. В. утверждает, что для достижения большей гибкости в подгонке модели часто целесообразно объединить в одной модели авторегрессию и скользящее среднее [4]. Общая модель обозначается ARMA соединяет в себе фильтр в виде скользящего среднего и авторегрессию фильтрованных значений процесса.

Формула прогнозного значения имеет вид:

$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q b_i \varepsilon_{y-i}$$

В таблице 3 приведены результаты прогнозирования для 9 часов, только два значения отклоняются от реальных данных более чем на 2, рассчитанная среднеквадратическая ошибка равен 1,5. Исходя из полученных результатов данная модель является приемлемой для прогнозирования показателей режима работы УЭЦН.

Таблица 3. Результаты прогнозирования.

Дата, время	Реальные данные	Спрогнозированные значения	Ошибка
20.05.2020 10:00:00	72.52	71.91	0.61
20.05.2020 11:00:00	65.64	67.87	-2.23
20.05.2020 12:00:00	68.43	69.55	-1.12
20.05.2020 13:00:00	70.34	70.14	0.2
20.05.2020 14:00:00	66.56	67.76	-1.2
20.05.2020 15:00:00	71.36	70.66	0.7
20.05.2020 16:00:00	66.32	66.92	-0.6
20.05.2020 17:00:00	70.01	69.14	0.87
20.05.2020 18:00:00	72.06	70.09	1.97
среднеквадратическая ошибка			1.5

Настройка режима работы

Последней частью разрабатываемого модуля является реализация функционала для подбора оптимальной частоты переменного тока, подаваемого на обмотки двигателя насоса, для достижения максимального КПД. Поскольку при расчете КПД участвуют показатели напора, дебита и потребляемой мощности, необходимо учитывать данные факторы при подборе частоты. Так как напор и мощность зависят от дебита добываемой жидкости, необходимо определить, как изменяется дебит при изменении частоты. Производительность насоса (подача) изменяется линейно [3], ее можно выразить следующим образом:

$$Q = \frac{Q(n_0) * F}{n_0},$$

где Q – расчетная подача, $Q(n_0)$ – подача при базовой частоте, F – расчетная частота, n_0 – базовая частота.

При подстановке нового значения частоты в формулу, расчетную подачу можно использовать для перерасчета КПД. При данных: дебит 22 м³/сут. и частота 50 Гц значение параметра КПД составляет 20%. Осуществляя перерасчет для возможных частот в диапазоне от 40 до 60 Гц, оптимальным явилось значение 40 Гц, при котором значение КПД равно 21,5%.

При сухих расчетах данное изменение кажется несущественным, но учитывая, что значения плотности жидкости и буферного давления приняты как константы, которые в реальных данных постоянно изменяются, результирующее значение будет существенным. Также при регулировании частоты основными ограничениями являются напор и мощность. При значительном увеличении дебита, величина напора может быть недостаточной для добычи нефти из скважины. Вторым ограничением является потребляемая мощность. При изменении частоты, потребляемая мощность изменяется в кубической зависимости, что создает риск нехватки мощности наземного электрооборудования.

Заключение

В результате был создан модуль способный рассчитать напорные характеристики для используемого оборудования и спрогнозировать значения параметров, влияющих на КПД. На рисунке 3 представлен интерфейс, в котором пользователь может установить рекомендуемую частоту.

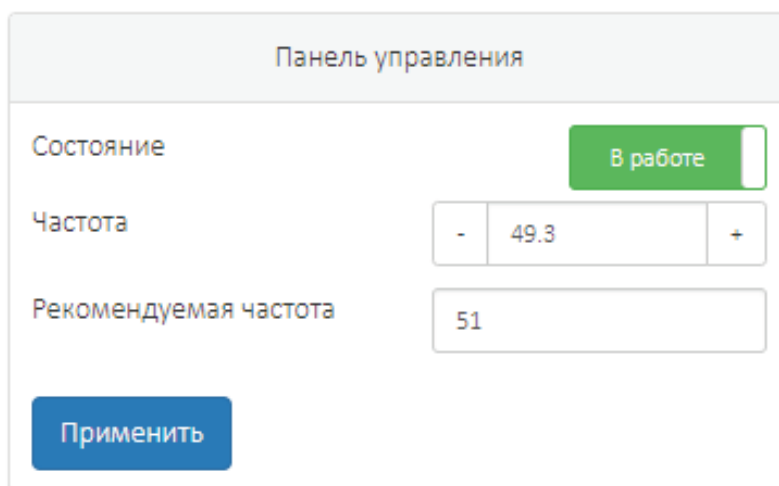


Рис. 3. Интерфейс пользователя для настройки частоты

Спрогнозированные значения используются для расчета оптимального значения частоты, при котором достигается максимальное значение КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сташинов Ю.П., Боченков Д.А. К пересчету напорной характеристики центробежного насоса при изменении частоты вращения рабочих колес // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 12. С. 18 - 20.
2. Вязунов Е. В., Путин С. В. Аналитическое представление характеристик центробежных насосов при переменной частоте

- вращения //Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – №. 4. – С. 67-69.
3. Гумеров О. А., Гумеров К. О. Опыт применения частотно-регулируемого привода для повышения эффективности эксплуатации установки электроцентробежного насоса на Арланском месторождении //Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12. – №. 4. – С. 24-34.
 4. Золотарев И. В., Пещеренко С. Н., Пошвин Е. В. Прогнозирование энергоэффективности УЭЦН //Бурение и нефть. – 2013. – №. 9. – С. 62-65.
 5. Базилевский М. П. Аналитические зависимости между коэффициентами детерминации и соотношением дисперсий ошибок исследуемых признаков в модели регрессии Деминга //Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – №. 2 (10).
 6. Skrobotov A., Turuntseva M. Тестирование Сезонных Единичных Корней: Простейшие Тесты и Тест HEGY (Testing for Seasonal Unit Roots: A Simple Test and HEGY Tests) //Available at SSRN 2444238. – 2014.