



МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Ишназаров Ойбек Хайрилаевич

доктор технических наук, профессор, Института проблем энергетики
Академии наук Республики Узбекистан.

Рахматова Мактуба Улуғбековна

базовый докторант Института проблем энергетики Академии наук
Республики Узбекистан.

Автор, отвечающий за переписку: oybek.ishnazarov@gmail.com

Аннотация:

В работе рассматривается математическое моделирование гидравлической системы насосной станции с целью оптимизации энергопотребления при групповом управлении электроприводами. Представлены основные уравнения, описывающие работу трубопроводной сети и насосных агрегатов, а также методы их совместного моделирования. Проведен анализ влияния различных режимов работы на энергетическую эффективность системы.

Ключевые слова: насосная станция, групповое управление, математическое моделирование, гидравлическая система, алгоритмы управления.

Введение

Современные насосные станции представляют собой сложные гидравлические системы, работающие в условиях переменной нагрузки. Для повышения их энергоэффективности необходимо точное математическое описание процессов, происходящих в трубопроводах и насосных агрегатах. Моделирование позволяет прогнозировать поведение системы при различных алгоритмах управления, что особенно важно при использовании группового регулирования частотно-регулируемыми приводами (ЧРП).

Основные уравнения гидравлической системы

Гидравлическая система насосной станции может быть описана следующими уравнениями:

Уравнение неразрывности потока:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}} + \frac{dV}{dt},$$

где $Q_{\text{вх}}$ и $Q_{\text{вых}}$ – расходы на входе и выходе системы, V – объем жидкости в системе.

Уравнение Бернулли (для стационарного потока):

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{пот}},$$

где P – давление, v – скорость потока, z – геодезическая высота, $h_{\text{пот}}$ – потери напора.

Потери напора в трубопроводах (формула Дарси-Вейсбаха):

$$h_{\text{пот}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g},$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, L – длина трубопровода, D – диаметр.

Моделирование насосных агрегатов

Характеристики центробежных насосов описываются кривыми $H-Q$ (напор-расход) и $\eta-Q$ (КПД-расход), которые могут быть аппроксимированы полиномами:

$$H(Q) = H_0 - k_1 Q - k_2 Q^2$$

где H_0 – напор при нулевом расходе, k_1, k_2 – коэффициенты.

При использовании ЧРП характеристики насоса масштабируются в зависимости от частоты вращения:

$$Q_1 = \frac{n_1}{n_2}, \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2,$$



где n – частота вращения вала насоса.

Совместное моделирование системы

Для анализа работы насосной станции применяется метод эквивалентной характеристики, позволяющий объединить несколько параллельно работающих насосов в одну общую кривую.

Параллельное соединение насосов:

$$Q_{\text{сум}} = \sum Q_i, H_{\text{сум}} = H_i \text{ (для одинаковых насосов).}$$

Влияние КПД на энергопотребление:

$$P_{\text{потр}} = \frac{\rho g Q H}{\eta},$$

где η – КПД насосного агрегата.

Алгоритмы группового управления в математической модели

Для повышения энергоэффективности насосной станции необходимо учитывать динамическое распределение нагрузки между насосами. В модель добавляются следующие ключевые аспекты:

Принцип ротации насосов

Чтобы равномерно изнашивать оборудование и избегать работы одних и тех же насосов на низком КПД, вводится алгоритм ротации (чередования). В модели это описывается:

Критерий выбора активных насосов:

- приоритет насосов с наименьшим количеством рабочих часов;
- исключение частых пусков/остановов для снижения механических нагрузок.

Математическое условие переключения:

$$N_{\text{раб}} = \begin{cases} N_{\text{min}} & \text{при } Q < Q_{\text{порог}} \\ N_{\text{min}} + k & \text{при } Q \geq Q_{\text{порог}} \end{cases},$$

где $N_{\text{раб}}$ – число работающих насосов, $Q_{\text{порог}}$ – пороговое значение расхода, k – шаг увеличения количества насосов.

Оптимизация КПД группы насосов

International Conference on Educational Discoveries and Humanities

Hosted online from Moscow, Russia

Website: econfseries.com

16th June, 2025

Для групповой работы важно, чтобы каждый насос функционировал в зоне максимального КПД (обычно 70–90% от номинального расхода). Модель включает:

Алгоритм поиска оптимальной комбинации:

Для заданного расхода Q_{total} система перебирает варианты распределения Q_i между насосами, минимизируя:

$$P_{общ} = \sum_{i=1}^N \frac{\rho g Q_i H_i}{\eta_i(Q_i)}.$$

Учитываются ограничения: $Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max}$.

Учет инерционности системы

Гидравлическая система обладает инерцией, поэтому резкие изменения в работе насосов (пуск/останов, скачки частоты ЧРП) приводят к гидравлическим ударам и колебаниям давления.

В модель добавляются:

Дифференциальные уравнения переходных процессов:

$$\tau \frac{dQ}{dt} + Q = Q_{зад},$$

где τ – постоянная времени системы, $Q_{зад}$ – заданный расход.

Плавное изменение частоты ЧРП:

Ограничение скорости нарастания частоты ($df/dt \leq 2$ Гц/с) для снижения нагрузок.

Сравнение стратегий управления

Модель позволяет тестировать разные алгоритмы:

"Один основной + резервный": Основной насос работает на ЧРП, резервный подключается при превышении $Q_{порог}$.

"Равномерное распределение": Все активные насосы работают на одинаковой частоте.

"Оптимальное распределение": Автоматический подбор Q_i для минимизации $P_{общ}$

Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Стратегия	Энергопотребление (кВт·ч)	КПД системы (%)
Один основной	1050	68
Равномерное	980	72
Оптимальное	890	81

Таким образом, для проверки модели использована среда MATLAB/Simulink, где были смоделированы: различные комбинации включения насосов, переходные процессы при изменении нагрузки, сравнение энергопотребления при традиционном и групповом управлении.

Заключение

Разработанная математическая модель гидравлической системы насосной станции с алгоритмами группового управления позволяет оптимизировать энергопотребление на 15-25% за счет динамического распределения нагрузки между насосами, ротации оборудования для равномерного износа и поддержания работы в зонах максимального КПД, при этом интеграция с системами ЧРП и учет инерционности системы обеспечивают устойчивость и надежность работы насосной станции в различных режимах нагрузки.

Список использованной литературы:

1. Вязунов Е. В., Бархатов А. Ф. Оптимизация потребляемой НПС мощности при регулировании давления с помощью чрп // Территория Нефтегаз. 2013. №8.
2. Zayed, S. M., Attiya, G., El-Sayed, A., Sayed, A., & Hemdan, E. E. D. (2023). An Efficient Fault Diagnosis Framework for Digital Twins Using Optimized Machine Learning Models in Smart Industrial Control Systems. International



International Conference on Educational Discoveries and Humanities

Hosted online from Moscow, Russia

Website: econfseries.com

16th June, 2025

-
- Journal of Computational Intelligence Systems, 16(1).
<https://doi.org/10.1007/s44196-023-00241-6>.
3. Jia, W., Wei, Z., Tang, X., Zhang, Y., & Shen, A. (2023). Intelligent Control Technology and System of on-Demand Irrigation Based on Multiobjective Optimization. *Agronomy*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy13071907>
 4. Briceño-León, C. X., Sanchez-Ferrer, D. S., Iglesias-Rey, P. L., Martinez-Solano, F. J., & Mora-Melia, D. (2021). Methodology for pumping station design based on analytic hierarchy process (Ahp). *Water (Switzerland)*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/w13202886>
 5. Zeng, X., & Wang, D. (2023). Optimal tracking control of the coal mining face fluid supply system via adaptive dynamic programming. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47346-8>