

А. М. Макаров, М. Д. Редько, А. Д. Редько

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ НАСОСОВ
НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: amm34@mail.ru, mihailredko130@gmail.com, alexandrredko01@gmail.com

В статье рассматривается оптимизация работы параллельных насосов в системе водоснабжения с переменными нагрузками с целью повышения энергоэффективности системы. Предложена модель управления на основе генетического алгоритма. Приведены результаты моделирования, подтверждающие эффективность данного алгоритма и сходимость его результатов с теоретическим решением.

Ключевые слова: генетический алгоритм, насосные системы, оптимизация, энергоэффективность

A. M. Makarov, M. D. Redko, A. D. Redko

**DEVELOPMENT OF A SCHEME FOR AN EDUCATIONAL-TESTING STAND,
SIMULATING THE OPERATION OF A PUMP STATION**

Volgograd State Technical University

The article discusses the optimization of parallel pumps in a water supply system with variable loads in order to increase the energy efficiency of the system. A control model based on a genetic algorithm is proposed. The simulation results are presented, confirming the effectiveness of this algorithm and the convergence of its results with the theoretical solution.

Keywords: genetic algorithm, pumpsystems, optimization, energy efficiency

Водопроводные системы обеспечивают подачу воды потребителям, при этом основные затраты электроэнергии приходятся на насосы. В связи с ростом требований к повышенной энергоэффективности оптимизация работы насосных систем становится крайне актуальной задачей. Для ее решения могут применяться различные алгоритмы оптимизации.

В последнее время возрос интерес к генетическим алгоритмам (ГА) для систем водоснабжения. Оптимизация с помощью ГА хорошо подходит для работы систем распределения воды, благодаря способности работать с дискретными переменными и находить глобальные оптимумы в сложных системах. Оптимизация ре-

жимов работы насосов позволяет не только снизить энергопотребление, но и увеличить срок службы оборудования за счет обеспечения работы вблизи оптимальных условий [1, 2].

Настоящая статья посвящена разработке оптимизационной модели, основанной на генетическом алгоритме, для повышения энергоэффективности параллельной работы насосов в системе водоснабжения с переменными нагрузками.

Система водоснабжения (рис. 1) включает два насоса и пропорциональный клапан. Напор насосной установки определяется разностью давлений на выходе (P2) и входе (P1) установки, а требуемый напор системы – разностью давлений на выходе системы (P3) и входе (P1).

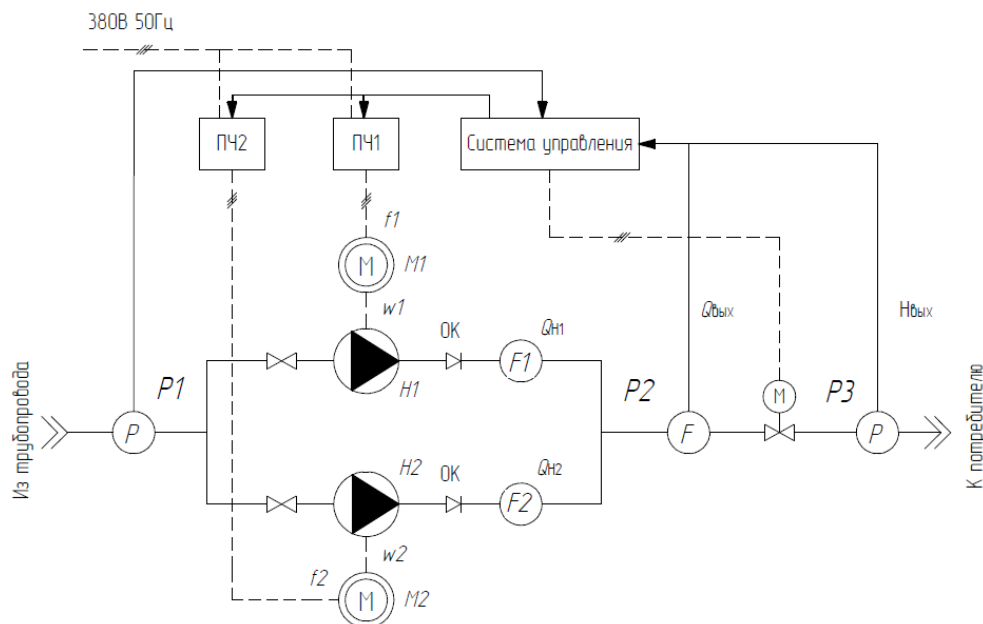


Рис. 1. Схема системы распределения воды

Целью оптимизации является обеспечение требуемых параметров системы (расхода и напора) с минимальными затратами и увеличением срока службы оборудования, что достигается регулированием частоты вращения насосов. Для упрощения, в данной работе основное внимание уделяется оптимизации со стороны насосов, без учета КПД преобразователя частоты (ПЧ) и двигателя, хотя обычно включает все три компонента.

Законы подобия описывают зависимости характеристик насоса от частоты вращения и выражаются следующими соотношениями:

$$\frac{Q}{Q_0} = S, \quad \frac{H}{H_0} = S^2, \quad \frac{P}{P_0} = S^3,$$

где $S = n/n_0$ – коэффициент частоты вращения; и Q_0 , H_0 и P_0 – характеристики при номинальной частоте вращения.

Мощность на валу насоса аппроксимируется следующим образом:

$$P = d_0 S^3 + d_1 Q S^2 + d_2 Q^2 S + d_3 Q^3$$

Фактор состояния W определяется как рабочий статус центробежного насоса (1 – работает; 0 – остановлен), поэтому целевая функция задачи оптимизации может быть определена как:

$$\max \eta = \frac{P g Q H}{\sum_{i=1}^n W_i (d_{0,i} S_i^3 + d_{1,i} Q_i S_i^2 + d_{2,i} Q_i^2 S_i + d_{3,i} Q_i^3)}$$

где Q – требуемый расход системы; H – требуемый напор системы; и Q_i – расход каждого насоса.

Ограничения в работе насосной системы определяются несколькими факторами. Коэффициент частоты вращения обычно не превышает 1 и ограничен снизу значением 0,75 для достижения эффективности и надежности. Общий расход системы равен сумме расходов отдельных насосов. Расход каждого насоса (Q_i) ограничен диапазоном $[Q_{imin}, Q_{imax}]$. Этот диапазон соответствует высокоэффективной зоне работы насоса. Q_{imax} представляет собой максимальный расход насоса при номинальной частоте вращения, а Q_{imin} – минимальный расход при минимально допустимой частоте вращения,

обеспечивающий высокую эффективность. Границы этого диапазона определяются характеристиками насоса. Напор каждого насоса (H_i) должен быть не меньше требуемого напора системы (H) для обеспечения необходимых параметров.

Теоретическое решение задачи оптимизации для системы, состоящей из нескольких идентичных насосов без регулирующих клапанов, предполагает, что наилучшим является режим работы, где расход (или частота вращения вала двигателя) одинаков для каждого насоса. Однако данный подход не учитывает максимально возможную надежность. Если насосы имеют разные характеристики или клапаны на отводящем трубопроводе, модель оптимизации

становится очень сложной, и ее теоретическое решение становится чрезвычайно трудным. Поэтому необходимо использовать более общий метод оптимизации [3].

Для применения ГА необходимо определить функцию пригодности, которую необходимо будет максимизировать. В данном случае, функция пригодности η представляет собой КПД насосной системы. Для учета ограничений вводятся штрафные функции, которые уменьшают значение функции пригодности при нарушении ограничений. Штраф за ограничение по напору рассчитывается следующим образом:

$$W_H = \sum_{i=1}^n W_{H_i}$$

$$W_{H_i} = \begin{cases} [H_i - (H + \xi_i Q_i^2)]^2 & (H_i \neq H + \xi_i Q_i^2) \\ 0 & (H_i = H + \xi_i Q_i^2) \end{cases}$$

где ξ_i – коэффициент сопротивления трубопроводов ответвления.

Штраф за ограничение по расходу каждого насоса определяется как:

$$W_Q = \sum_{i=1}^n W_{Q_i}$$

$$W_{Q_i} = \begin{cases} (Q_{imin} - Q_i)^2, & Q_i < Q_{imin} \\ 0, & Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{imax} \\ (Q_i - Q_{imax})^2, & Q_i > Q_{imax} \end{cases}$$

Итоговая функция пригодности, включающая штрафы, имеет вид:

$$\max \eta = \begin{cases} \eta - \sigma_1 W_Q - \sigma_2 W_H & W_Q > 0 \text{ или } W_H > 0 \\ \eta & W_Q = 0 \text{ и } W_H = 0 \end{cases}$$

где σ_1 и σ_2 – весовые коэффициенты для штрафов по расходу и напору, соответственно.

Несмотря на свои преимущества, стандартный генетический алгоритм может столкнуться с проблемой преждевременной сходимости. Для решения этой проблемы при оптимизации работы насосной системы будут применяться следующие методы: код Грея (усиливает локальный поиск, изменяя декодированное значение на смежное при изменении одного бита), элитная стратегия (лучшая особь копируется в следующее поколение напрямую), адаптивный оператор мутации (вероятность мутации выше для особей с низкой пригодностью) и изменение порядка операций (мутация перед кроссовером для упрощения реализации адаптивной мутации) [3].

В качестве модельных насосов выбраны два LeoAMS70/0.37. Из паспорта насоса видно, что наилучшая эффективность составляет 43 %, номинальный расход Q равен 3,6 м³/ч; напор H равен 14,6 м. Рабочая область установлена на $Q_i \in (2,5; 4,5)$ м³/ч.

Характеристические кривые модельного насоса аппроксимируются на основе данных образца продукции следующим образом:

$$H = 20.926S^2 - 2.962QS - 0.719Q^2$$

$$P = 0.0715S^3 + 0.036QS^2 - 0.0004Q^2S + 0.0014Q^3$$

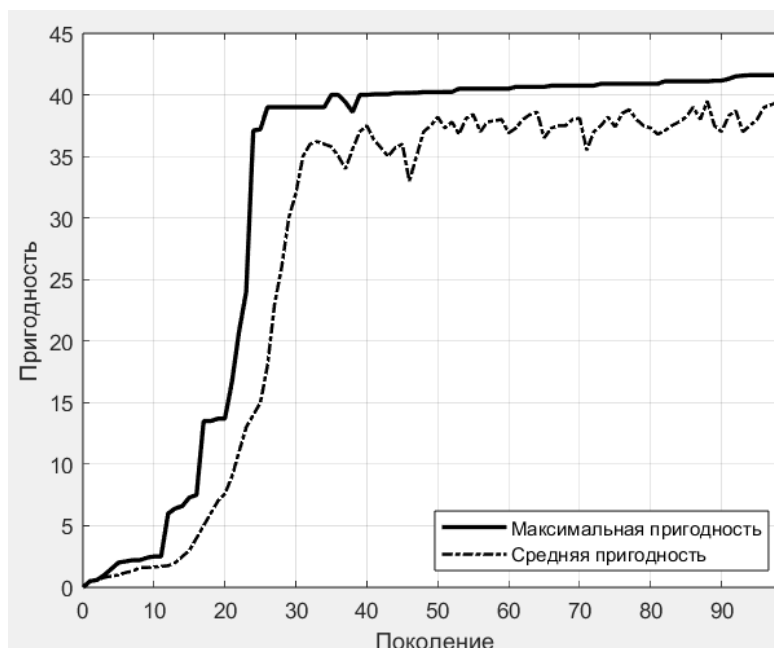


Рис. 2. Средняя и максимальная пригодность каждого поколения

Для кодирования параметров в генетическом алгоритме диапазоны возможных значений расхода и коэффициента частоты вращения делятся на 2^8 и 2^7 интервалов соответственно, каждому интервалу ставится в соответствие уникальная комбинация. Состояние включения второго насоса кодируется одним битом (включен/выключен). Таким образом, полное описание состояния двух насосов в параллельной

системе представляется 23-битным кодом Грея, например:

1:1100111:1001011:01111110

↓ ↓ ↓ ↓

$ONS_1=0.833$ $S_2=0.817$ $Q_1=2.83$

На рисунке 2 показаны средняя и максимальная пригодность, развивающиеся в каждом поколении.

Результаты оптимизации представлены в таблице.

Результаты оптимизации

Q , м ³ /ч	Q_1 , м ³ /ч	Q_2 , м ³ /ч	H_1 , м	H_2 , м	S_1	S_2	η , %	η_1 , %	η_2 , %
4	4	–	10,31	–	0,8679	–	41,81	42,08	–
5	2,52	2,48	10,11	10,10	0,7669	0,7649	42,61	43,05	43,43
6	2,94	3,06	10,20	10,20	0,8435	0,8429	41,33	42,01	42,57
7	3,53	3,47	10,38	10,37	0,8861	0,8803	40,31	41,08	41,84
8	4,03	3,96	10,45	10,45	0,9186	0,9111	39,15	40,03	40,91

Из таблицы видно, что два насоса работают вблизи точки наилучшей эффективности (ВЕР), и общая эффективность почти равна ВЕР насосов.

Для случая с идентичными насосами результаты оптимизации близки к «равным расходам», что согласуется с теоретическим решением.

Таким образом, предложенный подход позволяет снизить энергопотребление и увеличить срок службы оборудования, что делает его перспективным инструментом для оптимизации работы насосных станций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ишназаров, О. Х. Современные тенденции в управлении насосными станциями: обзор и перспективы / О. Х. Ишназаров, М. У. Рахматова // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2024. – С. 10–20.
2. Макаров, А. М. Automated System of Frequency Control for Drive of Cascade Pump Station of Random Configuration [Электронный ресурс] / А. М. Макаров, М. П. Кухтик // Proceedings 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon) (Russian Federation, Chelyabinsk, October 4–6, 2018) / South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section. – [Publisher: IEEE], 2018. – P. 265–269. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8544349>.
3. Дунаев, М. П. Параметрическая оптимизация системы управления насосной станцией с помощью генетического алгоритма / М. П. Дунаев, Н. Н. Куций, Н. Д. Лукьянов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 8. – С. 194–205.