

Описание расчётного модуля

8 июля 2019 г.

1. Введение

Правильное проектирование насосной станции позволяет сэкономить большое количество электроэнергии при эксплуатации. Для этого подбирают насосы таким образом, чтобы среднее значение рабочих точек нагрузочной характеристики насосной станции находилось в области максимального КПД насосов.

Однако, для оптимального проекта недостаточно учитывать только КПД насоса, весь насосный агрегат (насос, двигатель, система управления) должен рассматриваться как единое целое. Также мы должны учитывать характеристику нагрузки станции (переменные поток и напор).

В документе содержится информация об инструменте для оптимизации конструкции и работы насосной станции, в том числе и для случаев, когда необходимо использовать насосы разных размеров.

2. Методика

Насосная станция представлена в виде набора насосных агрегатов с произвольными характеристиками. Никаких ограничений на "одинаковость" насосов не накладывается, насосные агрегаты включены параллельно.

2.1. Основы

Каждый насосный агрегат представляет собой набор из непосредственно насоса, двигателя и частотного преобразователя. Каждый механизм имеет свои характеристики, алгоритм расчёта которых описан ниже.

2.1.1. Насос

Каждый насос описывается характеристической кривой (зависимость напора от расхода) и кривой КПД (зависимость от расхода).

Кривая характеристики насоса задается в табличном формате парами значений (Q, H) , которые потом аппроксимируются следующей кривой:

$$H(Q) = \omega^2 \cdot H_{\max} - \omega^{2-\sigma} \cdot \tau Q^{\sigma},$$

где $\omega = (f_2/f_1) = (n_2/n_1)$ - относительная скорость вращения, а σ и τ - степень и коэффициент расхода, которые получаются при аппроксимации исходных табличных данных.

Отдельно задаются специфичные параметры Q_{\min} и Q_{\max} , которые определяют минимально и максимально допустимые расходы при номинальной частоте вращения. Расход, напор и мощность на разных скоростях вращения рассчитываются через законы подобия.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} = \omega, \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = \omega^2, \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 = \omega^3.$$

Кривая КПД насоса аппроксимируется параболой. Если известно только значение максимального КПД (Q_{BER}, η_{BER}), кривая задается формулой

$$\eta(Q) = a \cdot Q^2 + b \cdot Q,$$

коэффициенты которой находятся из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot Q_{BER}^2 + b \cdot Q_{BER} - \eta_{BER} = 0 \\ 2a \cdot Q_{BER} + b = 0 \end{cases}$$

Если известно две точки (Q_{BER}, η_{BER}) и (Q_2, η_2), $Q_2 > Q_{BER}$, то кривая задается следующей системой

$$\eta(Q) = \begin{cases} a \cdot Q^2 + b \cdot Q, & \text{если } Q < Q_{BER} \\ a_2 \cdot Q^2 + b_2 \cdot Q + c_2, & \text{если } Q \geq Q_{BER} \end{cases}$$

где коэффициенты a и b находятся из системы уравнений выше, а остальные из следующей

$$\begin{cases} a_2 \cdot Q_{BER}^2 + b_2 \cdot Q_{BER} + c_2 - \eta_{BER} = 0 \\ 2a_2 \cdot Q_{BER} + b_2 = 0 \\ a_2 \cdot Q_2^2 + b_2 \cdot Q_2 + c_2 - \eta_2 = 0 \end{cases}$$

Зависимость гидравлического КПД насоса от скорости вращения рассчитывается, используя

$$\eta_P = \eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1} = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{1}{\omega}\right)^{0,1}.$$

Гидравлическая мощность:

$$P_H = \rho g Q H,$$

и мощность на валу:

$$P_S = \frac{P_H}{\eta_P}.$$

Эта мощность на валу насоса является активной мощностью на выходе двигателя.

2.1.2. Двигатель

Для двигателя указываются номинальная мощность P_{NOM} и значения КПД при нагрузках 100 % и 75 % - $\eta_{M,100}$ и $\eta_{M,75}$, соответственно. Нагрузка двигателя:

$$L = \frac{P_S}{P_{NOM}/\eta_{M,100}}.$$

Согласно стандарту IEC 60034-31 можно рассчитать КПД двигателя, при любом значении нагрузки по формуле:

$$\begin{aligned}\nu_L &= \frac{\left(\frac{1}{\eta_{M,100}} - 1\right) - 0,75 \left(\frac{1}{\eta_{M,75}} - 1\right)}{0,4375} \\ \nu_0 &= \left(\frac{1}{\eta_{M,100}} - 1\right) - \nu_L \\ \eta_M &= \frac{1}{1 + (\nu_0/L) + \nu_L \cdot L}.\end{aligned}$$

Отсюда, потребляемая мощность двигателя:

$$P_M = \frac{P_S}{\eta_M}.$$

2.1.3. Частотный преобразователь

Считаем, что КПД частотного преобразователя на всем диапазоне нагрузок постоянно. Принимаем, что $\eta_{VFD} = const$, а потребляемая мощность электрической сети:

$$P_E = \frac{P_M}{\eta_{VFD}}.$$

2.1.4. Насосный агрегат

Общий КПД насосного агрегата складывается из КПД составляющих частей - насоса, двигателя и частотного преобразователя:

$$\eta_{TOT} = \frac{P_H}{P_E} = \eta_P \cdot \eta_M \cdot \eta_{VFD}.$$

2.2. Алгоритм

Оптимизация выполняется для каждой рабочей точки, которую может создать насосная станция, используя заданное пользователем разрешение $Q_{step} \times H_{step}$. Размер шага зависит от требуемой точности и влияет на время вычислений и объём требуемой памяти.

Задача оптимизации для каждой рабочей точки (Q_i, H_j) выглядит следующим образом:

$$\min_{\vec{f}_{i,j} \in X_{i,j}} P_E(Q_i, H_j, \vec{f}_{i,j}),$$

где $\vec{f}_{i,j}$ - это вектор частот каждого насоса, а пространство поиска $X_{i,j}$ включает все возможные комбинации, которые дают итоговую рабочую точку (Q_i, H_j) . Оптимизация выполняется прямым поиском (перебором) всех возможных значений и выбора среди них минимального.

Сначала находим оптимальные режимы работы насоса в каждой рабочей точке (напомним, что рабочие точки взяты с шагом $Q_{step} \times H_{step}$):

- Минимальный и максимальный допустимые напоры H_{\min} и H_{\max} , а также максимальный допустимый расход Q_{\max} рассчитываются на основе характеристики насоса и допустимого диапазона частот (минимум частоты равен 5 Гц, максимум - 50 Гц).
- Цикл по всем возможным частотам с шагом 0.02 Гц. Для рассматриваемой рабочей точки выбирается та частота, которая дает наибольший КПД.
- Результаты расчёта хранятся в двух специальных матрицах. **F** содержит оптимальную частоту, а **H** содержит КПД насосного агрегата для всех рабочих точек. Элементы матриц, которые представляют недопустимые рабочие точки, устанавливаются в 0.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{Q_1, H_1} & f_{Q_2, H_1} & \cdots & f_{Q_m, H_1} \\ f_{Q_1, H_2} & f_{Q_2, H_2} & \cdots & f_{Q_m, H_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{Q_1, H_n} & f_{Q_2, H_n} & \cdots & f_{Q_m, H_n} \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \eta_{Q_1, H_1} & \eta_{Q_2, H_1} & \cdots & \eta_{Q_m, H_1} \\ \eta_{Q_1, H_2} & \eta_{Q_2, H_2} & \cdots & \eta_{Q_m, H_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{Q_1, H_n} & \eta_{Q_2, H_n} & \cdots & \eta_{Q_m, H_n} \end{bmatrix}.$$

Далее рассматриваются все возможные комбинации насосов. Для каждой комбинации насосов необходимо проделать следующее:

- Определяем разрешённый диапазон напора. Минимальный и максимальный напор диапазона рассчитывается следующим образом (n - количество насосов, работающих в комбинации):

$$H_{\min} = \max\{H_{\min,1}, H_{\min,2}, \cdots, H_{\min,n}\},$$

$$H_{\max} = \min\{H_{\max,1}, H_{\max,2}, \cdots, H_{\max,n}\}.$$

- Проходим по разрешённому диапазону напора $[H_{\min}, H_{\max}]$ с шагом H_{step} . Напор в каждой точке обозначим как H_j . Для напора H_j с шагом Q_{step} проходим по всему диапазону расхода $[0, Q_{\max}]$, который даёт исследуемая комбинация насосов. В каждой точке расхода Q_i вычисляем все возможные комбинации расходов для насосов, работающих в комбинации. Для одного и того же значения расхода Q_i множество значений таких расходов в зависимости от количества насосов n :

$$Q_i = \sum_{k=1}^n q_k.$$

- КПД каждого насоса определяется из массива рабочих режимов насоса **H**. Общий КПД при этом рассчитывается для общего расхода Q_i .

$$\eta_{Q_i, H_j} = \frac{\sum_{k=1}^n q_k}{\sum_{k=1}^n \frac{q_k}{\eta_k}} = \prod_{k=1}^n \eta_k \cdot \frac{\sum_{k=1}^n q_k}{\sum_{k=1}^n (q_k \cdot \prod_{p \neq k}^n \eta_p)}.$$

Здесь q_k - значение расхода для k -го насоса из комбинации при напоре H_j , а η_k - значение КПД для k -го насоса при расходе q_k и напоре H_j . Расход q_k находится в диапазоне $[0, Q_i]$, а конкретное значение выбирается по максимуму общего КПД:

$$\max \eta_{Q_i, H_j}, \text{ если } q_k \in [0, Q_i], Q_i = \sum_{k=1}^n q_k, H_j = \text{const}.$$

- Из всех вариантов КПД для рабочей точки (Q_i, H_j) наибольшее значение сохраняется в матрице результатов **R**. Количество насосов, которое даёт этот лучший результат КПД, сохранится в другой матрице **C**. Конечный результат - два массива, которые покрывают все возможные режимы работы насосной станции для выбранной комбинации работы насосов. Каждый элемент представляет область, определенную шагом $Q_{step} \times H_{step}$:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{Q_1, H_1} & c_{Q_2, H_1} & \dots & c_{Q_m, H_1} \\ c_{Q_1, H_2} & c_{Q_2, H_2} & \dots & c_{Q_m, H_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{Q_1, H_n} & c_{Q_2, H_n} & \dots & c_{Q_m, H_n} \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \eta_{Q_1, H_1} & \eta_{Q_2, H_1} & \dots & \eta_{Q_m, H_1} \\ \eta_{Q_1, H_2} & \eta_{Q_2, H_2} & \dots & \eta_{Q_m, H_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{Q_1, H_n} & \eta_{Q_2, H_n} & \dots & \eta_{Q_m, H_n} \end{bmatrix}.$$

2.3. Применение

Исходные данные напора и расхода зависят от времени и для определения требуемых пар значений (Q_i, H_j) измеренная зависимость расхода квантуется по уровню с шагом Q_{step} , а зависимость напора с шагом H_{step} . После чего определяются соответствующие индексы в матрицах результатов **C** и **R**, откуда можно легко рассчитать оптимальную электрическую потребляемую активную мощность для каждой комбинации насосных агрегатов:

$$P_E(Q_i, H_j) = \frac{P_H(Q_i, H_j)}{\eta_{Q_i, H_j}} = \frac{\rho g Q_i H_j}{\eta_{Q_i, H_j}}.$$

Значения матрицы оптимального количества насосов в каждой рабочей точке используется для определения границ переключения между насосами и гистерезиса переключения.