

Электротехника

УДК 621.365

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСОВ СИСТЕМ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

А.М. Абакумов, И.С. Мухортов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрена методика решения оптимизационной задачи выбора режимов работы электроприводов насосов систем поддержания пластового давления при дискретном регулировании, дана оценка повышения энергоэффективности при использовании частотно-регулируемого электропривода.

Ключевые слова: *насосная станция, центробежный насос, расход электроэнергии, оптимизация режимов работы электроприводов, дискретное регулирование, частотно-регулируемый электропривод.*

Основными потребителями электроэнергии систем поддержания пластового давления (ППД), предназначенных для повышения нефтеотдачи посредством закачки воды в пласт, являются асинхронные и синхронные двигатели насосных агрегатов.

По технологическим требованиям система ППД должна обеспечивать поддержание текущих значений расхода $Q(t)$ и напора $H(t)$ на заданном уровне $Q_z(t)$ и напора $H_z(t)$ с допустимой погрешностью ξ :

$$Q(t) = Q_z(t) \pm \xi_q; \quad H(t) = H_z(t) \pm \xi_h. \quad (1)$$

На большинстве существующих установок управление режимами осуществляется включением необходимого числа k агрегатов из общего числа n . Поскольку добиться выполнения условий (1) при дискретном регулировании удастся лишь в частных случаях, в качестве допустимых альтернативных вариантов решения технологической задачи рассматриваются варианты, соответствующие выполнению условий

$$Q(t) \geq Q_z(t) \pm \xi_q; \quad H(t) \geq H_z(t) \pm \xi_h. \quad (2)$$

При этом для выполнения требований технологии используется дополнительное регулирование дросселированием, что приводит к непроизводительному расходу энергии. Каждому из допустимых в соответствии с (2) альтернативных вариантов включения насосных агрегатов на временном интервале $(0, T)$ соответствуют без учета переходных процессов потери мощности ΔP_j и электроэнергии

Александр Михайлович Абакумов (д.т.н., профессор), заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное оборудование».
Иван Сергеевич Мухортов, аспирант.

$$\Delta W_j = \int_0^T \Delta P_j(t) dt, \quad j \in \{1, 2, \dots, m_1\}, \quad (3)$$

где m_1 – число допустимых альтернативных вариантов, удовлетворяющих условию (2), из множества вариантов, определяемого суммой числа сочетаний включенных агрегатов

$$m = \sum_{k=1}^n C_n^k; \quad k \in \{1, 2, \dots, n\}.$$

Задача оптимизации режимов работы электроприводов насосных агрегатов заключается в выборе из множества допустимых альтернатив варианта, обеспечивающего минимум функционала (3) при выполнении требований технологического задания (1).

Остановимся на методике решения поставленной задачи.

Как показывает практика, насосные станции систем ППД работают достаточно длительное время в одном режиме подачи жидкости и реальный суточный график требуемого расхода $Q_z(t)$ может быть с достаточной точностью заменен ступенчатым, состоящим из l интервалов длительностью T_i с постоянными значениями Q_{zi} , $i \in \{1, 2, \dots, l\}$ (рис. 1). При этом i -му интервалу для j -го альтернативного варианта включения насосных агрегатов соответствуют потери мощности ΔP_{ij} и потери электроэнергии $\Delta W_{ij} = \Delta P_{ij} T_i$, а потери электроэнергии за сутки определяются суммированием потерь на отдельных интервалах.

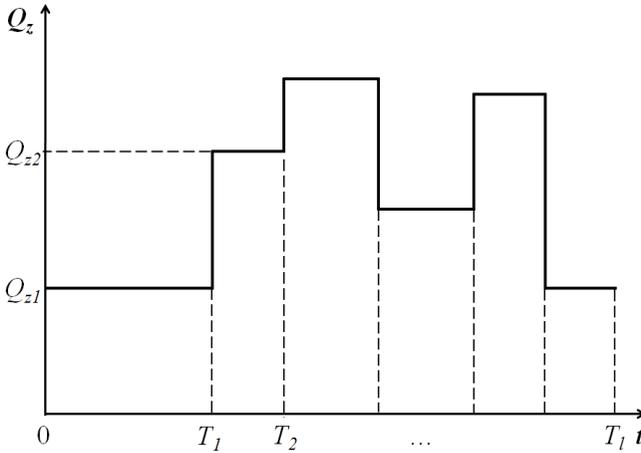


Рис. 1. Суточный график требуемого расхода

В результате задача оптимизации [1] сводится к выбору из множества допустимых альтернатив для каждого i -го временного интервала варианта включения насосных агрегатов, обеспечивающего минимум потерь мощности:

$$\Delta P_{ij} \rightarrow \min.$$

Для определения параметров режимов и потерь мощности используются рабочие характеристики $Q-H$ центробежных насосов и характеристика трубопровода (рис. 3). Характеристики $Q-H$ центробежных насосов в пределах рекомендуемых подач описываются уравнением квадратичной параболы [2]

$$H_p = H_f - S_f Q^2, \quad (4)$$

где H_f – фиктивный напор при нулевой подаче, м; S_f – гидравлическое фиктивное сопротивление насоса, м·(с/л)².

Фиктивные параметры определяются [2] по каталожным данным насоса или по экспериментальным данным. Для этого находятся координаты двух точек рабочей части напорной характеристики насоса, которым соответствуют значения напоров H_1 и H_2 , м, и подачи Q_1 и Q_2 , л/с, и далее вычисляются:

$$S_f = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2};$$

$$H_f = H_1 + S_f Q_1^2$$

или

$$H_f = H_2 + S_f Q_2^2.$$

Характеристика трубопровода описывается уравнением [2]

$$H_c = H_{st} - S Q^2,$$

где H_c – напор в начале трубопровода; S – гидравлическое сопротивление трубопровода; H_{st} – статический напор, обусловленный разностью геодезических отметок подачи и приема жидкости. Гидравлическое сопротивление трубопровода и статический напор определяются аналогично фиктивным параметрам насоса на основе экспериментальных данных или по проектным данным трубопровода.

Параметры рабочего режима системы «насос – трубопровод» определяются точкой пересечения Q - H характеристик насоса и трубопровода. В случае включения одного насоса по выражению (4) вычисляется напор, достигаемый данным насосом при необходимой подаче. При параллельной работе насосов для определения параметров рабочего режима решается система уравнений для их Q - H характеристик при одинаковом напоре и рассчитывается эквивалентная характеристика насосов. В случае последовательного включения насосов система уравнений рассматривается для одинаковой подачи.

Вычисленный для каждого альтернативного варианта включения насосов напор сравнивается с минимально необходимым для данного режима водоподдачи в соответствии с характеристикой трубопровода: необходимый режим считается достигнутым, если выполняется условие (2).

При работе насосной установки с подачей меньше расчетной (введение дросселя в напорную линию) возникает несоответствие между напором, развиваемым насосом, и напором, требуемым для подачи того или иного количества жидкости, – превышение напора насоса ΔH . Сравнение характеристики центробежных насосов и трубопроводов показывает, что при уменьшении подачи требуемый напор также уменьшается, а развиваемый насосом напор увеличивается.

Выражение для потерь мощности из-за превышения напора на i -м интервале для j -го альтернативного варианта может быть записано в виде

$$\Delta P_{ij} = \frac{\rho g}{1000 \eta} Q_{ij} \Delta H_{ij}, \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g=9,81$ м/с²; η – КПД насоса.

КПД насоса вычисляется на основании экспериментальных данных:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{1000 P \eta_{ed}},$$

где P – мощность, кВт, потребляемая насосным агрегатом; η_{ed} – КПД электродвигателя.

Для варианта включения группы насосов потери мощности из-за превышения напора для каждого насоса с учетом его КПД и подачи вычисляются отдельно по (5), затем суммируются с учетом снижающего коэффициента φ (для 2 работающих насосов $\varphi = 0,75$, для 3 – $\varphi = 0,66$ и т. д.).

Поставленная задача статической оптимизации при большом числе альтернативных вариантов может быть решена с использованием аппарата целочисленного программирования [1].

Рассмотрим применение данной методики оценки повышения энергетической эффективности электропривода центробежных насосов на примере типовой насосной станции II водоподъема (рис. 2).

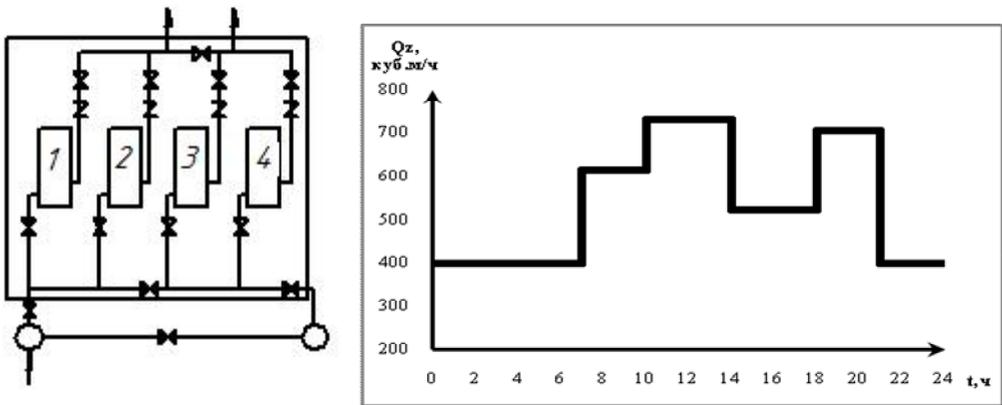


Рис. 2. Технологическая схема насосной станции, суточный график нагрузки

Рабочие характеристики насосов и трубопровода (рис. 3) построены по (1) и (4) на основании экспериментальных данных: энергопотребление насосными агрегатами, расход жидкости и напор в двух рабочих режимах.

Результаты решения задачи оптимизации в соответствии с предложенной методикой для рассматриваемого примера представлены в таблице.

Как следует из приведенных результатов, за счет оптимизации включения насосного оборудования непроизводительный расход электрической энергии на рассмотренном объекте возможно снизить до уровня 301,3 тыс. кВтч в год, что при тарифе 1,89 руб. за 1 кВтч составляет $\Delta E_{\text{sum}} = 570$ тыс. руб. в год.

В случае использования частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) превышение напора, которое имеет место при дискретном регулировании, ликвидируется и энергопотребление насосов уменьшается до необходимого минимума, а снижение энергопотребления по абсолютному значению равно потерям, обусловленным превышением напоров [2, 3].

В ходе разработки и эксплуатации системы частотного регулирования режима работы насосной установки требуется определить частоту вращения насосных агрегатов, обеспечивающую нужный режим работы установки. Напорная характеристика центробежного насоса, работающего с переменной частотой вращения, описывается согласно [2] уравнением

$$H = H_f \left(\frac{n}{n_{nom}} \right)^2 - S_f Q^2, \quad (6)$$

где n и n_{nom} – текущее и номинальные значения частоты вращения насоса соответственно.

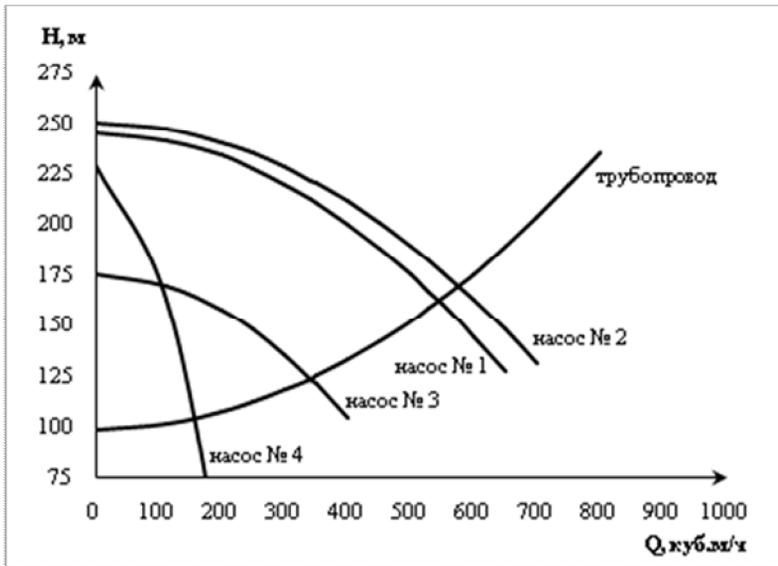


Рис. 3. Рабочие характеристики насосов и трубопровода

Оптимальные варианты достижения требуемой производительности

Режим	Требуемый расход жидкости Q , м ³ /ч	Минимально необходимый напор H , м	Оптимальный вариант	Превышение напора ΔH , м	Годовые потери электроэнергии из-за превышения напора ΔW , тыс. кВт·ч
№1	396	132	Совместная работа насосов №3 и №4	11,9	117,2
№2	611	179	Совместная работа насосов №2 и №4	6,2	60
№3	725	211	Совместная работа насосов №1 и №2	2,5	12,8
№4	520	157	Работа насоса №1	12,5	52,8
№5	700	204	Совместная работа насосов №1 и №2	11,8	58,5
Итого					301,3

Совместным решением уравнения напорной характеристики (6) и характеристики трубопровода (4) относительно частоты вращения получено выражение

$$n = n_{nom} \sqrt{\frac{H_{st}}{H_f} + \left(1 - \frac{H_{st}}{H_f} \right) \left(\frac{Q}{Q_{max}} \right)^2},$$

где Q_{max} – наибольшая для данной системы подача насоса.

При решении задачи повышения энергоэффективности насосных станций за счет использования ЧРП помимо снижения энергопотребления за счет ликвидации превышения напоров необходимо учитывать потери в устройствах, регулирующих частоту вращения насоса. Потери, обусловленные снижением КПД электродвигателя из-за несинусоидальности преобразованного тока, а также потери в частотных преобразователях равны [4, 5]

$$W_{los} = P_{max} T(1 + \zeta - \eta_{fc}),$$

где P_{max} – мощность, потребляемая насосом при максимальной подаче;

$$P_{max} = \frac{\rho g Q_{max} H}{1000 \eta} \text{ кВт};$$

T – время работы;

ζ – коэффициент, учитывающий потери за счет несинусоидальности преобразованного тока, $\zeta = 0,03 \div 0,05$;

η_{fc} – КПД частотного преобразователя, $\eta_{fc} = 0,9 \div 0,95$.

Применение ЧРП позволит избежать рассчитанных выше затрат, и для оценки целесообразности его внедрения необходимо рассчитать затраты на приобретение оборудования и строительно-монтажные и наладочные работы.

Уровень капитальных затрат на внедрение ЧРЭП достаточно высок, поэтому для установки необходимо выбрать минимум насосов. Согласно таблице три режима из пяти достигаются отдельным и совместным включением насосов №1 и №2, остальные два режима также могут быть обеспечены включением насоса №1 на пониженную скорость. Таким образом, целесообразно внедрять ЧРЭП именно для этих агрегатов.

Суммарные затраты на оборудование, строительно-монтажные и наладочные работы составят

$$C_{sum} = C_{fc1} + C_{fc2} + 4 \cdot C_{tr} + C_w = 593,7 + 520 + 4 \cdot 120 + 480 = 2080 \text{ тыс. руб.},$$

где C_{fc1} , C_{fc2} – стоимость преобразователей частоты для двигателей насосных агрегатов №1 и №2 соответственно;

C_{tr} – стоимость согласующего трансформатора ТМ-400/6/0,4;

C_w – стоимость строительно-монтажных и наладочных работ.

Срок окупаемости затрат на внедрение ЧРЭП составит

$$T = \frac{C_{sum}}{\Delta E_{sum}} = \frac{2080}{570} = 3 \text{ года } 7 \text{ мес.}$$

Таким образом, рассмотренный метод решения оптимизационной задачи выбора режимов работы электроприводов насосов систем поддержания пластового давления при дискретном регулировании позволяет для каждого временного интервала определить вариант включения насосных агрегатов, обеспечивающий минимум потерь мощности, что, в свою очередь, позволяет оценить повышение энергоэффективности при использовании частотно-регулируемого электропривода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Черноруцкий И.Г.* Методы принятия решений. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 416 с.
2. *Лезнов Б.С.* Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
3. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. В 2 т. – М.: МИЭ, 2006. – Т. 2. – 532 с.

4. Алексеев Ю.В., Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Снижение потерь электроэнергии в сети при замене нерегулируемого привода центробежных насосов на частотно-регулируемый // Нефтегазовое дело. – 2010.
5. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. – М.: Академия, 2008. – 208 с.
6. World pumps: ind. journal: *JukkaTolvanen*: Saving energy with variable speed drives. – 2008, June. – Elsevier Ltd., 2008.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2012 г.

OPERATING CONDITIONS OPTIMIZATION OF ELECTRIC DRIVES OF RESERVOIR PRESSURE MAINTENANCE SYSTEMS PUMPS

A.M. Abakumov, I.S. Mukhortov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

A method of optimum selection of operation conditions for electric drives for reservoir pressure maintenance system pumps under discrete control is discussed, the estimation of energy efficiency increasing by using a variable speed drive being given.

Keywords: *pumping station, centrifugal pumping equipment, power consumption, operation modes of electric drives optimization, discrete adjustment, variable speed drive.*