

Электротехника

УДК 621.365

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ И НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСОВ СИСТЕМ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

А.М. Абакумов¹, И.С. Мухортов¹, Ф.Ф. Биалов²

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Общество с ограниченной ответственностью «Диагностика-Энергосервис»
423450, г. Альметьевск, Агropоселок нп.

Рассмотрена методика решения комбинаторной оптимизационной задачи выбора режимов совместной работы электроприводов насосов систем поддержания пластового давления при сочетании нерегулируемых и частотно-регулируемых электроприводов, дана оценка вариантов комплектации насосов частотно-регулируемыми электроприводами и повышения их энергоэффективности.

Ключевые слова: *насосная станция, центробежный насос, расход электроэнергии, оптимизация режимов совместной работы электроприводов, частотно-регулируемый электропривод, коэффициент полезного действия.*

Одним из перспективных методов повышения энергетической эффективности насосных установок является частотное регулирование режимов работы электропривода [1]. Основным фактором, замедляющим массовое внедрение частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) на технологических установках, является высокий уровень капитальных затрат. Поэтому для насосных установок мощностью от 200 до 630 кВт, к которым относятся насосы станций систем поддержания пластового давления (ППД), представляет интерес рассмотреть варианты сочетания работы электроприводов центробежных насосов, оборудованных и не оборудованных ЧРЭП, с точки зрения инвестиционной привлекательности, то есть сопоставления экономии электрической энергии и затрат на реализацию данного энергосберегающего мероприятия.

Постановка и методика решения комбинаторной оптимизационной задачи выбора включаемых насосных агрегатов, не оборудованных ЧРЭП и работающих в условиях переменной подачи, по критерию минимума расхода электроэнергии с учетом технологических ограничений по требуемому расходу и напору рассмотрена в работе [2].

В настоящей работе принимается условие, что хотя бы один насос, задейство-

Александр Михайлович Абакумов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Иван Сергеевич Мухортов, аспирант.

Фирзар Фаридович Биалов, инженер службы развития производства и энергоаудита.

ванный для достижения i -го режима, оборудован ЧРЭП: $\sum_{k=1}^m h_{vk} \geq 1$, где v – порядко-

вый номер насоса с ЧРЭП, $h_v = \begin{cases} 0 & \text{если насос задействован} \\ 1 & \text{в ином случае} \end{cases}$ – показатель состояния

насоса с ЧРЭП, m – число насосов на станции [3].

Суммарная мощность, потребляемая насосными агрегатами, в i -м режиме для j -го альтернативного варианта включения может быть записана в следующем виде:

$$P_{ij} = P_{S1ij} + P_{S2ij} \text{ кВт}, \quad (1)$$

где $P_{S1j} = \sum_{c=1}^m h_c P_{cj}$ – суммарная мощность, потребляемая насосными агрегатами без

ЧРЭП, для j -го альтернативного варианта включения, кВт;

c – порядковый номер насоса без ЧРЭП;

$h_c = \begin{cases} 0 & \text{если насос задействован} \\ 1 & \text{в ином случае} \end{cases}$ – показатель состояния насоса без ЧРЭП;

P_c – мощность, потребляемая насосом № c ;

$P_{S2j} = \sum_{v=1}^m h_v P_{vj}$ – суммарная мощность, потребляемая насосными агрегатами с

ЧРЭП, для j -го альтернативного варианта включения, кВт;

P_v – мощность, потребляемая насосом № v .

При этом один и тот же насос не может быть задействован как с ЧРЭП, так и без ЧРЭП: $c \neq v$.

Мощность, потребляемая насосом без ЧРЭП:

$$P_c = \frac{\rho g H_c Q_c}{\eta_{edc} \eta_c} \text{ кВт}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

H_c – напор, развиваемый насосом № c , м причем $H_c = H_z$; H_z – минимально необходимый напор, установленный технологическими требованиями для каждого режима;

Q_c – подача жидкости насоса № c , соответствующая напору H_c , м³/ч; η_{edc} – КПД электродвигателя насоса № c ;

$\eta_c = 2 \cdot \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}} Q_c - \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}^2} Q_c^2$ – КПД насоса № c при работе в i -м режиме [4].

Максимальные КПД насоса $\eta_{\max}$ и подача $Q_{\max}$ определяются при решении системы уравнений

$$\begin{cases} \eta_{c1} = 2 \cdot \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}} Q_{c1} - \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}^2} Q_{c1}^2; \\ \eta_{c2} = 2 \cdot \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}} Q_{c2} - \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}^2} Q_{c2}^2. \end{cases}$$

Индексы 1 и 2 обозначают параметры насоса № c в двух различных режимах, η_{c1} и η_{c2} вычисляются на основании экспериментальных данных в соответствии с (2).

Мощность, потребляемая насосом, оборудованным ЧРЭП:

$$P_v = \frac{\rho g H_v (Q_v - \Delta Q_v)}{\eta_{edv} \eta_{fc} \eta_v} \text{ кВт}, \quad (3)$$

где H_v – напор, развиваемый насосом № v , м, причем $H_v = H_z$;
 $(Q_v - \Delta Q_v)$ – подача жидкости насоса № v , соответствующая напору H_v , м³/ч;
 Q_v – подача насоса при номинальной частоте вращения, м³/ч;
 $\eta_{fc} = 0,9 \div 0,95$ – КПД преобразователя частоты [5].

КПД электродвигателя насоса № v при работе в i -м режиме определяется [4]

$$\eta_{edv} = \frac{n_v}{1,01 \cdot n_v + \frac{1}{\eta_{edc}} - 1,01}.$$

Относительная частота вращения ротора двигателя, требуемая для достижения технологических условий:

$$n_v = \sqrt{\frac{H_z + S_f \cdot (Q_v - \Delta Q_v)}{H_f}},$$

где S_f – гидравлическое фиктивное сопротивление насоса;

H_f – фиктивный напор при нулевой подаче, м, определяется по экспериментальным данным [2].

КПД насоса № v при работе в i -м режиме [4]:

$$\eta_v = 2 \cdot \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}} (Q_{\max} - \Delta Q_v) - \frac{\eta_{\max}}{Q_{\max}^2} (Q_{\max} - \Delta Q_v)^2.$$

Таким образом, комбинаторная оптимизационная задача выбора включаемых насосных агрегатов, оборудованных и не оборудованных ЧРЭП и работающих в условиях переменной подачи, сводится к минимизации функционала (1): $P_{ij}(\Delta Q_{vij}) \rightarrow \min$ при условии соблюдения технологических требований по поддержанию текущих значений расхода $Q(t)$ и напора $H(t)$ на заданном уровне $Q_z(t)$ и напора $H_z(t)$ с допустимой погрешностью ξ :

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

При этом для каждого i -го режима $\sum_{c=1}^{c=m} Q_c \cdot h_c + \sum_{v=1}^{v=m} (Q_v - \Delta Q_v) \cdot h_v = Q_z = \text{const}$.

Остановимся на методике решения поставленной задачи.

На основании выражения (3) можно построить графики зависимости потребляемой мощности от подачи $P(Q)$ отдельно взятых насосов при условиях:

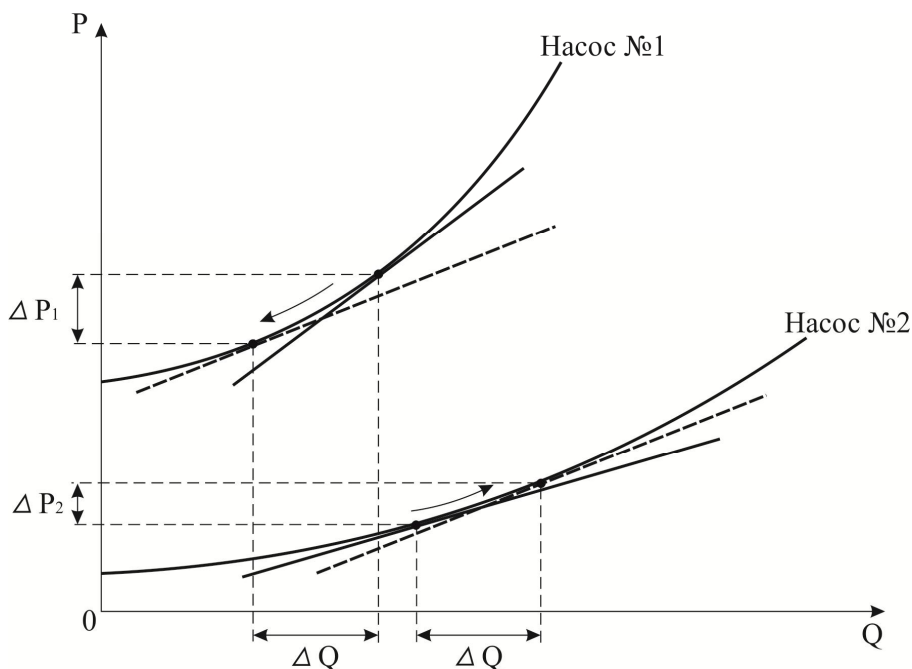
$$\sum_{v=1}^{v=m} (Q_v - \Delta Q_v) \cdot h_v = \text{const},$$

т. е. изменение подачи одного насоса компенсируется изменением подачи другого насоса;

$$H_z = \text{const}.$$

В общем виде данные зависимости для двух насосов приведены на рисунке. Из графиков видно, что большая экономия (ΔP_1) достигается при регулировании подачи насоса с более крутой характеристикой $P(Q)$; при этом для компенсации снижения подачи (ΔQ) увеличение мощности, потребляемой насосом № 2, $\Delta P_2 < \Delta P_1$. Если к

графикам функций $P(Q)$ провести касательные в рабочих точках, то можно сделать вывод, что минимум электропотребления устанавливается при одинаковых углах наклона касательных.



Графики зависимости $P(Q)$ отдельно взятых насосов

Для нахождения оптимальных значений ΔQ_{vij} , при которых для каждого насоса в i -ом временном интервале для j -го альтернативного варианта совместной работы $P_{ij}(\Delta Q_{vij}) \rightarrow \min$, необходимо решить систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_z = \sum_{c=1}^{c=m} Q_c \cdot h_c + \sum_{v=1}^{v=m} (Q_v - \Delta Q_v) \cdot h_v \\ tg \alpha_{v1} = A_1 \Delta Q_{v1} \\ \dots \\ tg \alpha_{vx} = A_x \Delta Q_{x1} \\ tg \alpha_{v1} = tg \alpha_{v2} = \dots = tg \alpha_{vx} \end{array} \right. ,$$

где $tg \alpha_v = P'_v(\Delta Q_v)$ – производная от функции (3);

$x = \sum_{k=1}^m h_{vk}$ – количество насосов, оборудованных ЧРЭП.

Подставляя полученные значения ΔQ_{vij} в выражение (3), в соответствии с (1) формируем массив данных, содержащий сведения о потребляемой мощности для j -го альтернативного варианта совместной работы насосов в i -ом временном интервале:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1i} \\ P_{12} & \dots & \dots & P_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{j1} & P_{j1} & \dots & P_{ij} \end{bmatrix}.$$

Далее для каждого i -го временного интервала выбирается минимальное значение потребляемой мощности.

Рассмотрим применение данной методики решения комбинаторной оптимизационной задачи выбора включаемых насосных агрегатов, оборудованных и не оборудованных ЧРЭП, на примере типовой насосной станции II водоподъема с 4 насосами: $P_1 = 630$ кВт, $P_2 = 400$ кВт, $P_3 = 400$ кВт и $P_4 = 200$ кВт.

Результаты решения задачи для случая включения насосов без ЧРЭП в соответствии с работой [2] представлены в табл. 1. Результаты решения комбинаторной оптимизационной задачи в соответствии с предложенной методикой для рассматриваемого примера представлены в табл. 2; годовая экономия электрической энергии при средних тарифах на электроэнергию 2013 г. СН2 – 3 руб/кВт приведена в сравнении с годовым потреблением в оптимальном режиме в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Оптимальные варианты достижения требуемой производительности

№ режима	Требуемая подача жидкости Q, м ³ /ч	Минимально необходимый напор Н, м	Годовое потребление электроэнергии W, тыс. кВт*ч	Оптимальный вариант включения насосов
1	396	132	1 268	Совместная работа насосов № 3, 4
2	520	156	549	Работа насоса № 2
3	610	178	573	Работа насоса № 1
4	700	204	674	Совместная работа насосов № 1 и 4
5	725	211	1 009	Совместная работа насосов № 2, 3, 4
Итого:			4 073	

Таблица 2

Оптимальные варианты достижения требуемой производительности при комплектации насосов ЧРЭП

Варианты комплектации насосов ЧРЭП, обеспечивающие минимум электропотребления	Годовая экономия, тыс. кВт*ч	Средние затраты на ЧРЭП, тыс. руб.	Срок окупаемости, год
Насос № 1	633	9 009	4,7
Насосы № 1, 2	638	14 729	7,7
Насосы № 1, 2, 3	640	20 449	10,6
Насосы № 1, 2, 3, 4	640	23 309	12,1

Таким образом, полученные результаты позволяют оценить варианты ком-

плектации насосов станций ППД ЧРЭП для принятия технически обоснованного решения, а также выбрать оптимальный режим работы электропривода насосных агрегатов (сочетание насосов и скорость вращения электродвигателей насосов, оборудованных ЧРЭП) по критерию минимума энергозатрат в соответствии с технологическими требованиями по подаче жидкости и напору.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лезнов Б.С.* Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
2. *Абакумов А.М., Мухортов И.С.* Оптимизация режимов работы электроприводов насосов систем поддержания пластового давления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 163-169.
3. *Вагнер Г.* Основы исследования операций. Т. 2. – М.: Мир, 1973. – 488 с.
4. *Гришин А.П., Гришин В.А.* Коэффициент полезного действия частотно-регулируемого электронасоса // ВИЭСХ. Научные труды. Т. 89. – М.: ВИЭСХ, 2004. – С. 118-127.
5. *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.

Статья поступила в редакцию 14 октября 2013 г.

COMBINED OPERATING CONDITIONS OPTIMIZATION OF VARIABLE-FREQUENCY AND FIXED ELECTRIC DRIVES FOR RESERVOIR-PRESSURE MAINTENANCE SYSTEM PUMPS

A.M. Abakumov¹, I.S. Mukhortov¹, F.F. Bilalov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² Limited Liability Company «Diagnostics-Energoservis»
Agroposelok, Almet'yevsk, 423450

A method of solving the combinatorial optimization problem of selecting combined operation modes of electric drives for reservoir-pressure maintenance system pumps combining variable-frequency and fixed electric drives is discussed, the estimation of some options to equip the pumps with variable-frequency drives, and of their energy efficiency being given.

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

*Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ivan S. Mukhortov, Postgraduate student.
Firzar F. Bilalov, Engineer.*