УДК 622.5

О.В.КАБАНОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ РАБОТОЙ РУДНИЧНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК

Предложена система управления режимами работы рудничных водоотливных установок, обеспечивающая минимальные затраты электроэнергии. Показан способ формирования алгоритма оптимального управления. Дано его математическое описание.

The offered managerial system state of working mining installation for rollout of water providing minimum expenseses to electric powers. It is shown way of the shaping the algorithm of optimum control is. Given its mathematical description.

Одноступенчатая рудничная водоотливная установка обычно включает параллелью работающие центробежные насосы, водосборник, систему трубопроводов, запорно-регулирующую аппаратуру и систему управления запуском насосов, работающую по командам от датчиков уровня рис.1.

Как объект управления насосная водоотливная установка характеризуется факторами A_1, A_2, A_3, определяющими форму характеристик насосов C_1, C_2, C_3, форму характеристики КПД, постоянной трубопровода B, суточным (годовым) притоком воды $Q_{пр}$, числом параллельно работающих насосов и трубопроводов K и L. В качестве выходных параметров можно принять фактическую подачу насосной установки Q, время откачки суточного притока.

В качестве критерия оптимизации можно выбрать минимум годовых затрат на откачку воды при условии соблюдения технологических требований.

Как объект управления насосная установка представлена в виде блок-схемы (рис.1), уравнение движения водяной массы, заполняющей трубопровод, насосы и электродвигатель запишем в виде:

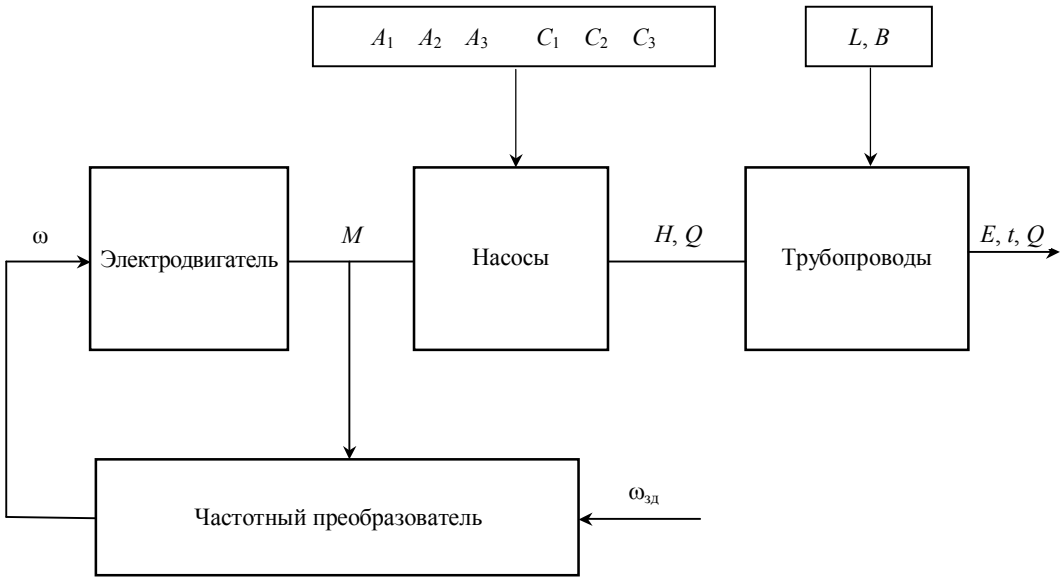


Рис.1. Блок-схема насосной установки

$$m\frac{dv(t)}{dt} = H_{2i(t)} - H_{2\text{òð}}(t);$$

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} = M(t) - \frac{\rho g H_{\text{í}}(t) Q(t)}{\omega(t)\eta}; \qquad (1)$$

$$T\frac{dM(t)}{d(t)} = M(t) - \beta(1 - \varpi(t)),$$

где m и $v(t)$ – масса и скорость воды в трубопроводе; J и $\omega(t)$ – момент инерции и угловая скорость вала насоса, $H_{2н}(t)$и $H_{2тр}(t)$ – напор на выходе из насоса и входе в трубопровод; $M(t)$ – момент на валу насоса; ρ, g, $H_н(t)$, $Q(t)$ – плотность воды, ускорение свободного падения, напор насоса, подача насоса соответственно; η – КПД насоса; Т, β – электромагнитная постоянная времени электродвигателя и жесткость характеристики.

Выразим величины, входящие в систему (1), через подачу и площадь сечения трубы:

$$m = \rho SL;$$

$$H_{2\text{í}}(t) = H_1 + A_1\varpi^2(t) + A_2\frac{Q(t)}{k}\varpi(t) + A_3\left(\frac{Q(t)}{k}\right)^2; \qquad (2)$$

$$H_{2\text{òð}}(t) = H_3 + B\left(\frac{Q(t)}{L}\right)^2;$$

$$\eta = C_1\frac{Q(t)}{k} + C_2\left(\frac{Q(t)}{k}\right)^2 + C_3\left(\frac{Q(t)}{k}\right)^3,$$

где B – постоянная трубопровода; k и L – число параллельно включенных насосов и трубопроводов; ϖ – относительная угловая скорость вала насоса $\varpi = \omega/\omega_0$; ω, ω_0 – текущая и паспортная угловые скорости вала насоса.

Система уравнений (1) совместно с (2) описывает переходные процессы в насосной установке без системы автоматического регулирования. Входными воздействиями здесь могут быть постоянная трубопровода B, заданная скорость вращения $\omega_з$, число параллельно включенных насосов и трубопроводов k и L.

Графики переходного процесса при изменении сопротивления трубопровода (рис.2) показывают, что по каналам момент, подача, угловая скорость наблюдается апериодический переходной процесс без динамических забросов давления и скорости. Следовательно,

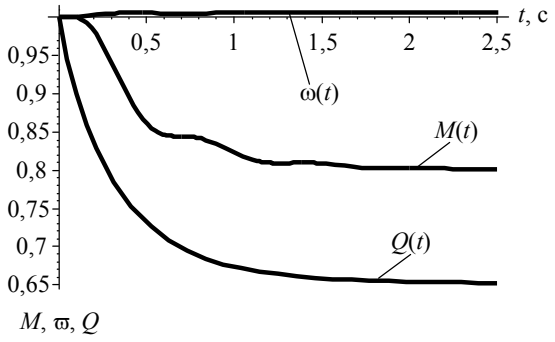


Рис.2. Графики переходных процессов в насосной установке

при поиске оптимального режима работы со стороны динамики ограничений не ожидается.

Приравнивая в системе (1) производные нулю, с учетом (2) получим зависимости для определения рабочих режимов работы насосной установки. Графики этих зависимостей показаны на рис.3.

Рабочий режим установки без автоматической системы оптимизации режима работы определяется точкой O_1, которой соответствует подача Q_1, КПД и рабочий напор. При этом КПД установки будет отличаться от оптимального на величину $\Delta\eta$, что вызовет дополнительные энергозатраты (рис.3, кривая 4).

Максимальному КПД соответствует точка O_2. Определить этот режим можно путем изменения сопротивления трубопровода (кривая 6)и измерения КПД на режимах, определяемых пересечением характеристик насосов и трубопроводов. Кроме того, при работе на режиме, определяемом точкой O_2, подача уменьшается на величину ΔQ, а напор увеличивается на ΔH. Относительное изменение суточных (или годовых) затрат электроэнергии определим по формуле

$$\left(\frac{H}{\eta}\right)_{O_2} \Big/ \left(\frac{H}{\eta}\right)_{O_1}. \qquad (3)$$

Если выражение (3) больше единицы, то в точке O_2 установка будет работать с максимальным КПД, но годовые (суточные) затраты электроэнергии не только не уменьшатся, но и возрастут.

Другой путь получения алгоритма оптимального управления заключается в следующем:

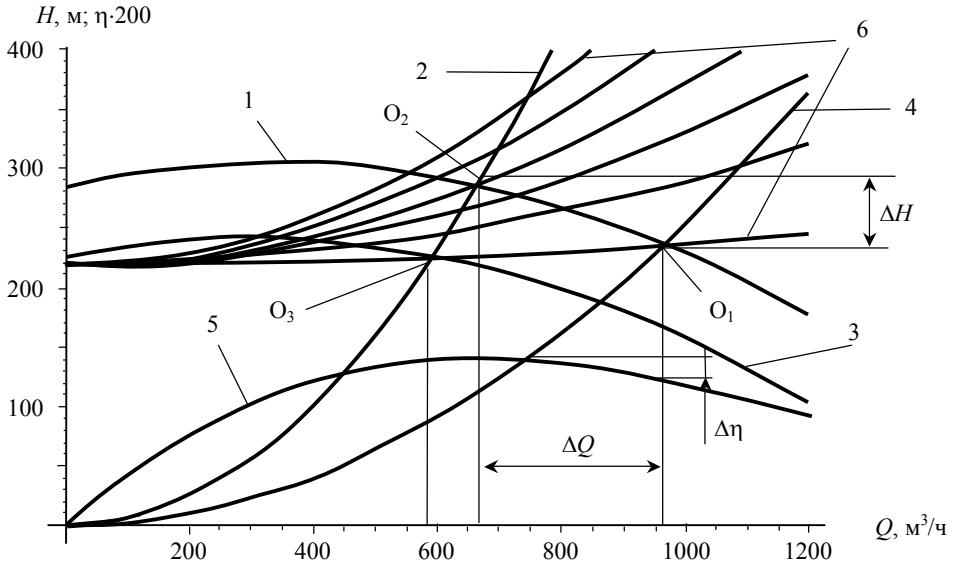


Рис.3. Определение режимных параметров работы управляемой насосной установкой

1 – естественная характеристика насосной установки; 2 – линия рабочих режимов при максимальном КПД; 3 – регулировочная характеристика насосной установки ($\varpi \neq 1$); 4 – линия равных КПД; 5 – график КПД; 6 – характеристики трубопроводов с разным сопротивлением

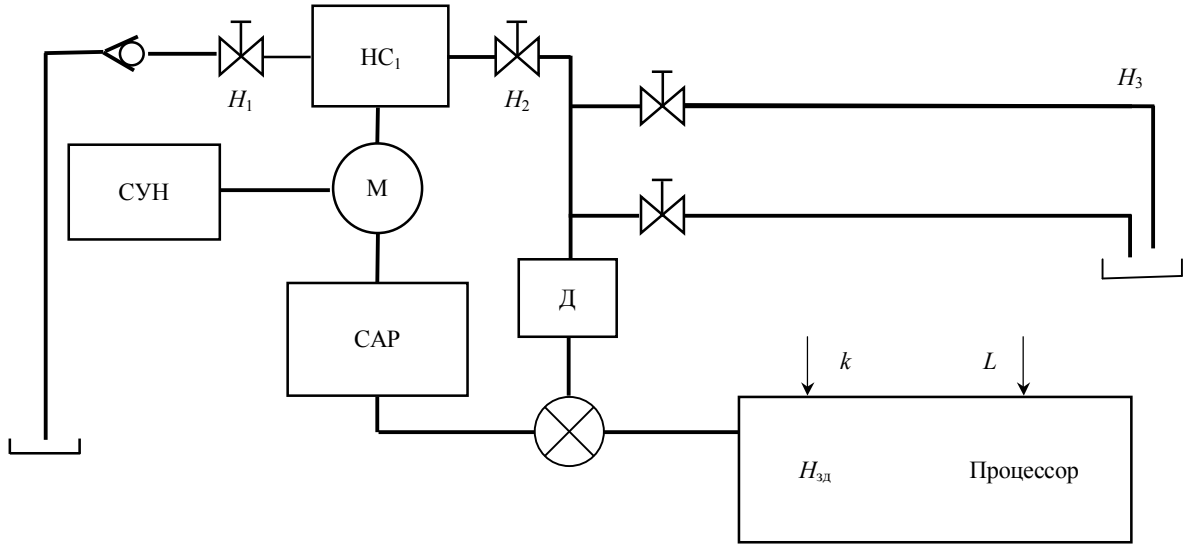


Рис.4. Система управления режимами работы насосной установки

СУН – система управления запуском насосов;
$НС_1$ – насосы: М – электродвигатель; САР – система автоматического регулирования угловой скорости;
Д – датчик давления

1) используя уравнения или форму кривых КПД и насосов (рис.3, линии 1, 5) определяем точку O_2;

2) определяем форму кривой 2, при пересечении которой с характеристикой трубопровода 6 получим рабочую точку O_3;

3) производим перемещение характеристики насосов в положение кривой 3 за счет изменения угловой скорости.

При этом выражение $\left(\frac{H}{\eta}\right)_{O_3} \Big/ \left(\frac{H}{\eta}\right)_{O_1}$ обязательно будет меньше единицы.

Блок-схема, реализующая такой алгоритм, представлена на рис.4.

Задание режима, соответствующее точке O_3 (рис.3), формируется процессором в соответствии с приведенной методикой. При этом в

процессор вводятся данные, соответствующие выбранному типу насосов и трубопроводов. В процессе работы состав насосной установки может меняться, поэтому в качестве входных воздействий можно принять число параллельно включаемых насосов или трубопроводов.

Для любого сочетания насосов и трубопроводов процессор определяет новые координаты точки O_3 и формирует новое значение задания оптимального режима.

Рабочий режим в рассматриваемом случае определяется тремя величинами: угловой скоростью ϖ, подачей Q и напором (H_2–H_1). Поскольку все величины взаимосвязаны, контроль режима можно осуществлять по одной из них, например, по напору или давлению в коллекторе насосной установки.

Сигналы задания и параметра режима поступают на элемент сравнения и далее в систему автоматического регулирования угловой скорости. При этом применяемые в настоящее время системы автоматизации насосных установок (ВАВ, УАВ и др.) могут быть значительно упрощены, так как возможность управления скоростью обеспечивает наилучшие условия для запуска электродвигателей.

Затраты электроэнергии (суточные или годовые) определяются откачиваемым притоком воды ($Q_{\text{пр}}$) напором насоса (H_2–H_1) и КПД (η):

$$E = \frac{\rho g (H_2 - H_1) Q t}{\eta} = \frac{\rho g (H_2 - H_1) Q_{\text{ïð}}\, 24}{\eta},$$

где E – суточные затраты электроэнергии; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; Q – подача насосной установки; t – время откачки суточного притока.

Расчеты показывают, что для насосной установки (рис.3) время откачки суточного притока увеличилось с 9,95 до 16,24 часа, а затраты электроэнергии уменьшились на 16,5 %. При этом значения параметров, определяющих оптимальный режим, составило: (H_2–H_1) = 226 м, Q = 592 м^3/ч, ϖ = 0,89.

При включении двух насосов на один трубопровод получили следующие значения: для оптимального режима (H_2–H_1) = 248 м; Q = 1240 м^3/ч; ϖ = 0,932; для обычного – (H_2–H_1) = 268 м, Q = 1803 м^3/ч; ϖ = 1. Уменьшение затрат электроэнергии составило 19 %.

Таким образом, применение предложенной системы управления насосной установкой обеспечивает минимум суточных (или годовых) затрат на водоотлив.