

УДК 681.513.2

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

К.Г. Гриценко, В.Д. Червяков

В условиях стохастической среды, характерных для коммунального водоснабжения, задача энергоэффективного управления насосной станцией решается путем планирования режима работы насосной станции и последующей его стабилизации. Основой энергоэффективного управления процессом водоснабжения является регулируемый электропривод. В статье сформулированы возможный вариант целевой функции планирования режима работы насосной станции, позволяющей оптимизировать распределение нагрузки между регулируемыми насосными агрегатами, и область допустимых управлений насосной станцией. На этой основе разработан алгоритм управления режимами работы насосной станции, позволяющий оптимизировать ее энергетические затраты.

1. Введение.

В настоящее время в Украине актуальной является задача экономного использования энергоресурсов. Насосные станции (НС) коммунального водоснабжения характеризуются значительным перерасходом электроэнергии, вызванным избыточными давлениями воды в сети и нерациональным распределением нагрузки между насосными агрегатами (НА). Особенностью водопроводной сети является зависимость гидравлического сопротивления от водопотребления, имеющего стохастический характер. Вследствие этого рабочие режимы насосных агрегатов оказываются вне рабочих зон их характеристик. Из-за этого режим работы НС необходимо изменять, включая в работу только те НА, которые обеспечивают требуемую производительность НС при минимальных энергозатратах. Удовлетворить требования потребителей с минимальными энергозатратами, обеспечив стабилизацию давления в диктующей точке водопроводной сети на нужном уровне, в настоящее время можно только за счет применения регулируемого электропривода (РЭП) насосных агрегатов [1, 2].

Предложенный в [2] метод оперативно-диспетчерского управления режимами работы НС, использующий модель установившегося потокораспределения, требует от системы автоматизации в реальном масштабе времени идентифицировать состояние этой модели. В системах коммунального водоснабжения, характеризующихся сложной структурой трубопроводов и стохастическим характером процессов водопотребления, это представляет достаточно сложную техническую задачу. Для выбора оптимального режима работы НС в большинстве случаев нецелесообразно проводить гидравлический расчет водопроводной сети [3]. Это объясняется трудностью получения данных о фактических и требуемых значениях узловых расходов для каждого часа

предстоящих суток. Для выбора оптимального режима работы НС требуются, в первую очередь, данные о требуемом давлении в диктующей точке водопроводной сети и на выходе НС, а значение требуемой подачи НС во многих случаях можно спрогнозировать с достаточной для практики точностью, имея в наличии предысторию работы НС. Высокие показатели энергоэффективности НС могут быть достигнуты только при использовании РЭП насосных агрегатов, позволяющего оптимально распределить нагрузку между НА и за счет этого повысить к.п.д. НС. Предложенный в [2] метод оперативно-диспетчерского управления режимами работы НС может быть модифицирован с приемлемой для практики точностью за счет отказа от гидравлического расчета водопроводной сети в реальном времени, что позволит существенно расширить сферу его использования.

2. Постановка задачи.

Основной целью исследований в данной статье является разработка энергоэффективного алгоритма управления режимами работы НС для автоматизированной системы управления (АСУ) водоснабжением, функциональная структура которой предложена в [1].

3. Результаты исследования.

Как технологический объект, НС коммунального водоснабжения характеризуется территориальной близостью насосных агрегатов и подключением выходов НА к общему напорному коллектору. НА представляет собой комплекс оборудования, состоящий из насоса в совокупности с электроприводом. Регулируемый электропривод представляет собой электродвигатель с подключенным к нему управляемым преобразователем (частоты или напряжения). К энергетическим характеристикам НА относятся зависимости “потребляемая мощность-подача” ($P_{НА}-Q_{НА}$) и “к.п.д.-подача” ($\eta_{НА}-Q_{НА}$). Известно, что в диапазоне мощностей от $P_{ном}$ до $(0,4-0,5)P_{ном}$ к.п.д. электродвигателя η_{\odot} и к.п.д. преобразователя $\eta_{пр}$ практически не изменяются, а при снижении потребляемой мощности НА изменяются в значительно меньшей степени, чем к.п.д. насоса η_n , поэтому при фиксированной подаче НС различия в значениях потребляемой НС мощности $P_{НС}$ можно с приемлемой для практических расчетов точностью объяснить изменением к.п.д. регулируемых и нерегулируемых насосов [4]. В момент времени $\forall t \in [0, T]$ при управлении $U(t)$ к.п.д. НС с параллельно работающими НА вычисляется по формуле

$$\eta_{НС}(t) = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{НС}(Q_{НС}(t), U(t)) \cdot Q_{НС}(t)}{\sum_{i \in M_{НА}^{рег}} A_i(t) \cdot P_{НАi}(Q_{НАi}(t), \omega_i(t)) + \sum_{j \in M_{НА}^{нерег}} A_j(t) \cdot P_{НАj}(Q_j(t))} =$$

$$\begin{aligned}
& \rho \cdot g \cdot H_{HC}(Q_{HC}(t), U(t)) \cdot \left(\sum_{i \in M_{HA}^{pez}} A_i(t) \cdot Q_{HAi}(t) + \sum_{j \in M_{HA}^{nerez}} A_j(t) \cdot Q_{HAj}(t) \right) \\
= & \frac{\rho \cdot g \cdot H_{HC}(Q_{HC}(t), U(t)) \cdot \left(\sum_{i \in M_{HA}^{pez}} A_i(t) \cdot \frac{Q_{HAi}(t)}{\eta_{HAi}(Q_{HAi}(t), \omega_i(t))} + \sum_{j \in M_{HA}^{nerez}} A_j(t) \cdot \frac{Q_{HAj}(t)}{\eta_{HAj}(Q_{HAj}(t))} \right)}{\sum_{i \in M_{HA}^{pez}} A_i(t) \cdot Q_{HAi}(t) + \sum_{j \in M_{HA}^{nerez}} A_j(t) \cdot Q_{HAj}(t)}, \quad (1) \\
& \sum_{i \in M_{HA}^{pez}} A_i(t) \cdot \frac{Q_{HAi}(t)}{\eta_{HAi}(Q_{HAi}(t), \omega_i(t))} + \sum_{j \in M_{HA}^{nerez}} A_j(t) \cdot \frac{Q_{HAj}(t)}{\eta_{HAj}(Q_{HAj}(t))}
\end{aligned}$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения; $P_{HC}(Q_{HC}(t), U(t))$ — мощность, потребляемая НС; $Q_{HC}(t) = \sum_{i \in M_{HA}} Q_{HAi}(t)$ —

подача НС; $H_{HC}(Q_{HC}(t), U(t))$ — давление в напорном коллекторе НС; M_{HA}^{pez} , M_{HA}^{nerez} — соответственно множество регулируемых и нерегулируемых НА; $Q_{HAi}(t)$, $P_{HAi}(Q_{HAi}(t), \omega_i(t))$, $\eta_{HAi}(Q_{HAi}(t), \omega_i(t))$ и $Q_{HAj}(t)$, $P_{HAj}(Q_{HAj}(t))$, $\eta_{HAj}(t)$ — подача, потребляемая мощность и к.п.д., соответственно i -го регулируемого и j -го нерегулируемого НА; $U(t)$ — вектор управления, который содержит следующие переменные: булевы переменные $A_i(t) \in [0; 1]$, описывающие состояние (включен/выключен) i -го НА, $i \in M_{HA}$, где M_{HA} — множество НА; $\omega_i(t)$, $i \in M_{HA}^{pez}$, — скорость вращения i -го регулируемого НА; булевы переменные $E_{P3j}(k) \in [0; 1]$, описывающие состояние j -ой регулирующей задвижки (открыта/закрыта), $j \in M_{P3}$, где M_{P3} — множество регулирующих задвижек; булевы переменные $E_{O3j}(k) \in [0; 1]$, описывающие состояние j -ой отсекающей задвижки (открыта/закрыта), $j \in M_{P3}$, где M_{P3} — множество отсекающих задвижек.

В [2] показано, что для повышения эффективности управления режимами работы НС необходимо рассматривать НС как объект, функционирующий в стохастической среде. В общей постановке задача энергоэффективного управления режимами работы НС на интервале времени $[0, T]$ состоит в минимизации математического ожидания функционала вида

$$F(T) = p \cdot M \left\{ \int_0^T c(t) \cdot P_{HC}(Q_{HC}(t), U(t)) \cdot dt \right\} \rightarrow \min_{U(T) \in D} \quad (2)$$

характеризующего стоимостные затраты на процесс управления водоснабжением. Здесь p — действующий тариф на потребление электроэнергии; $c(t)$ — тарифный коэффициент, учитывающий изменение стоимости электроэнергии, потребляемой НС в течение интервала $[0, T]$; D — область допустимых управлений НС.

Если известна вся предыстория работы НС, т.е. известны значения подачи НС $Q_{HC}(k)$, $k=0, -1, -2, \dots$, где k — шаг управления, то для $k=1, 2, \dots, T$ с

использованием моделей авторегрессии или проинтегрированного скользящего среднего, можно получить прогнозы подачи НС $Q_{НС0}(k)$ и вектора управления НС $U_0(k)$ (траекторию поведения НС), которые рассчитываются в начальный момент времени с упреждением $k=1, 2, \dots, T$. Пусть $U_0(k)$ – допустимое управление НС, тогда раскладывая $P(Q_{НС}(k), U(k))$ в ряд Тейлора относительно номинальной траектории $(Q_{НС0}(k), U_0(k))$, $k=1, 2, \dots, T$, и используя члены ряда до второго порядка включительно получаем

$$F_1(T) = p \cdot \left(\sum_{k=1}^T c(k) \cdot P(Q_{НС0}(k), U_0(k)) + M \left\{ \sum_{k=1}^T c(k) \cdot \left[\frac{\partial P(Q_{НС}(k), U(k))}{\partial Q_{НС}(k)} \cdot \delta Q_{НС}(k) + \frac{\partial P(Q_{НС}(k), U(k))}{\partial U(k)} \cdot \delta U(k) \right] \right\} + \frac{1}{2} M \left\{ \sum_{k=1}^T c(k) \cdot \frac{\partial^2 P(Q_{НС}(k), U(k))}{\partial^2 U(k)} (\delta U(k))^2 + \frac{\partial P(Q_{НС}(k), U(k))}{\partial Q_{НС}(k)} \cdot \delta Q_{НС}(k) \cdot \delta U(k) + \frac{\partial^2 P(Q_{НС}(k), U(k))}{\partial^2 U(k)} (\delta U(k))^2 \right\} \right), \quad (3)$$

где $\delta Q_{НС}(k) = Q_{НС}(k) - Q_{НС0}(k)$ – отклонение фактической подачи НС $Q_{НС}(k)$ от прогнозируемого значения $Q_{НС0}(k)$, а $\delta U(k) = U(k) - U_0(k)$ – отклонение фактического управления $U(k)$ от прогнозируемого значения $U_0(k)$. Математическое ожидание отклонения поведения НС от номинальной траектории равняется нулю, поэтому вторая составляющая выражения (3) равняется нулю. В связи с этим, решение задачи энергоэффективного управления (2) можем разбить на два этапа. На первом этапе (первая составляющая выражения (3)) решается детерминированная задача планирования режимов работы НС. В результате получаем детерминированную составляющую $U_0^*(k)$ вектора управления НС. Случайная составляющая $\delta U(k)$ вектора управления НС получается в результате решения задачи второго этапа (третья составляющая выражения (3)) – стабилизации режима работы НС.

Целевая функция планирования режима работы НС может быть представлена в виде

$$F_1(T) = p \cdot \sum_{k=1}^T c(k) \cdot P_{НС}(Q_{НС}(k), U(k)) \rightarrow \min_{U(T) \in D} \quad (4)$$

где $P_{НС}(Q_{НС}(k), U(k)) = \rho \cdot g \cdot Q_{НС}(k) \cdot H_{НС}(Q_{НС}(k), U(k)) \cdot \frac{1}{\eta_{НС}(Q_{НС}(k), U(k))}$.

С учетом формулы (1) целевая функция (4) записывается в виде

$$F_1(T) = p \cdot \rho \cdot g \cdot \sum_{k=1}^T c(k) \cdot Q_{НС}(k) \cdot H_{НС}(Q_{НС}(k), U(k)) \cdot$$

$$\frac{\sum_{i \in M_{HA}^{pez}} A_i(k) \cdot \frac{Q_{HAi}(k)}{\eta_{HAi}(Q_{HAi}(k), \omega_i(k))} + \sum_{j \in M_{HA}^{неpez}} A_j(k) \cdot \frac{Q_{HAj}(k)}{\eta_{HAj}(Q_{HAj}(k))}}{\sum_{i \in M_{HA}^{pez}} A_i(k) \cdot Q_{HAi}(k) + \sum_{j \in M_{HA}^{неpez}} A_j(k) \cdot Q_{HAj}(k)} = \min_{U(T) \in D} \quad (5)$$

при соблюдении следующих технологических условий [5]:

– для диктующей точки водопроводной сети

$$h_{\text{дм}}(k, U) = h_{\text{дм}}^{TP}(k); \quad (6)$$

– для выходов насосных станций, работающих на водопроводную сеть

$$\left(H_{HC_i}(Q_{HC_i}(k), U_i(k)) - \frac{h_i(k)}{3} \right) - \left(H_{HC_{i+1}}(Q_{HC_{i+1}}(k), U_{i+1}(k)) - \frac{h_{i+1}(k)}{3} \right) = \frac{2}{3}(Z_{i+1} - Z_i) \\ i = 1, 2, \dots, N_{HC} - 1, \quad (7)$$

где $h_{\text{дм}}^{TP}(k)$ – давление, которое необходимо обеспечить в диктующей точке водопроводной сети; N_{HC} – количество насосных станций, работающих на водопроводную сеть; $h_i(k)$ – давление на входе i -ой НС; $H_{HC_i}(Q_{HC_i}(k), U_i(k))$ – давление в напорном коллекторе i -ой НС; Z_i, Z_{i+1} – геодезические отметки осей насосов насосных станций; D – область допустимых управлений НС, включающая следующие ограничения, сформулированные в [2]:

– для каждого входного резервуара НС

$$\left| \sum_{k=1}^T Q_{\text{вх}j}(k) - \sum_{k=1}^T \sum_{i \in M_{HA}} A_i(k) \cdot Q_{HAi}(k) \right| \leq \left| \int_{h_{Pj}(0)}^{h_{Pj}(T,U)} S_j(h_{Pj}) \cdot dh_{Pj} \right|, \quad j \in I_1; \quad (8)$$

– для каждого выходного резервуара НС

$$\left| \sum_{k=1}^T \sum_{i \in M_{HA}} A_i(k) \cdot Q_{HAi}(k) - \sum_{k=1}^T Q_{\text{вых}j}(k) \right| \leq \left| \int_{h_{Pj}(0)}^{h_{Pj}(T,U)} S_j(h_{Pj}) \cdot dh_{Pj} \right|, \quad j \in O_1; \quad (9)$$

– для каждого резервуара НС ограничение на уровень жидкости в резервуаре имеет вид

$$h_{P_i}^{\min} < h_{P_i}(k, U) < h_{P_i}^{\max}, \quad i \in I_1 \cup O_1. \quad (10)$$

– для каждого регулируемого НА ограничение на скорость вращения имеет вид

$$\omega_i^{\min} \leq \omega_i(k) \leq \omega_i^{\max}, \quad i \in M_{HA}^{pez}, \quad k = 1, 2, \dots, T; \quad (11)$$

– ограничения на количество включений/выключений НА:

$$N_{\text{вкл}/\text{выкл}i}(T, U) \leq N_{\text{вкл}/\text{выкл}i}^{\max}, \quad i \in M_{HA}; \quad (12)$$

– ограничение на давление в напорном коллекторе НС:

$$H_{HC}^{\min} \leq H_{HC}(Q_{HC}(k), U(k)) \leq H_{HC}^{\max}, \quad k = 1, 2, \dots, T; \quad (13)$$

– ограничение на подачу НА:

$$Q_{HAi}^{\min} \leq Q_{HAi}(k) \leq Q_{HAi}^{\max}, \quad i \in M_{HA}, \quad k = 1, 2, \dots, T; \quad (14)$$

– ограничение на потребляемую мощность НА:

$$P_{HA_i}^{\min} \leq P_{HA_i}(Q_{HA_i}(k), U(k)) \leq P_{HA_i}^{\max}, \quad i \in M_{HA}, \quad k = 1, 2, \dots, T. \quad (15)$$

В постановке (5)–(15) I_1, O_1 – множество входов и выходов НС, оборудованных резервуарами. Зависимости (8)–(9) представляют собой уравнения баланса масс резервуаров в интегральном виде. Их соблюдение позволяет не допустить значительного отклонения между уровнями в резервуарах в начале и в конце управления, т.е. отклонений между $h_{P_j}(0)$ и $h_{P_j}(T, U)$. $S_j(h_{P_j})$ – функция площади зеркала j -го резервуара в зависимости от уровня h_{P_j} . $Q_{exj}(k)$ – поступление воды в j -ый резервуар. $Q_{выхj}(k)$ – расход воды из j -го резервуара.

Ограничения (8) – (10) охватывают разные по структуре типы НС (“резервуар – машинный зал – гидросеть”, “гидросеть – машинный зал – резервуар”, “резервуар – машинный зал – резервуар», “гидросеть – машинный зал – гидросеть”). Переход к конкретному типу НС осуществляется путем удаления части соответствующих ограничений (8) – (10).

Задача (5)–(15) планирования режима работы НС относится к задачам вариационного исчисления на условный экстремум функционала, и укладывается в схему динамического программирования. Ниже представлен алгоритм решения этой задачи для НС структуры «резервуар – машинный зал – гидросеть».

Входными данными алгоритма являются следующие величины:

- 1) требуемое значение давления в напорном коллекторе насосной станции $H_{НС}(Q_{НС}(k), U(k))$, $k=1, 2, \dots, T$, получаемое в результате решения задачи (6)–(7) оптимального распределения нагрузки между НС [5];
- 2) требуемое значение подачи НС, получаемое либо в результате прогноза на основе предыстории работы НС либо в результате гидравлического расчета водопроводной сети;
- 3) прогнозы поступления воды $\hat{Q}_{ex}(k)$, $k=1, 2, \dots, T$, во входной резервуар;
- 3) значение уровня $h_P(0)$ жидкости в резервуаре в начальный момент времени;
- 4) параметры ограничений (10)–(15);
- 5) значение Δh_P – допустимого отклонения $h_P(T, U)$ от $h_P(0)$;
- 6) набор возможных режимов работы НС, которые определяются соединениями из работоспособных НА. Каждое такое соединение НА определяет подачу насосной станции $Q_{НС}(k)$ и затраты электроэнергии $W_{НС}(Q_{НС}(k), U(k))$, $k=1, 2, \dots, T$;
- 7) начальная конфигурация НС (включенные в работу НА и режимы их работы).

Прежде чем перейти к рассмотрению работы алгоритма, введем следующие определения. Под *возможным управлением НС* на r -ом шаге будем понимать такой набор режимов работы НС: $U(k)$, $k=1, \dots, r$, при котором только

$h(k), k=1, \dots, r-1$, удовлетворяют ограничениям (10) и выполняются неравенства $N_{вкл/выкл i}(U(r-1)) \leq N_{вкл/выкл i}^{\max}, i \in M_{НА}; \omega_i^{\min} \leq \omega_i(r-1) \leq \omega_i^{\max}, i \in M_{НА}^{рег}$.

Под *допустимым управлением* НС на начало $r+1$ -ого шага управления будем понимать такой набор режимов работы НС: $U(k), k=1, \dots, r$, при котором все $h_p(k,U), k=1, \dots, r$, удовлетворяют ограничениям (10), выполняются неравенства $N_{вкл/выкл i}(r,U) \leq N_{вкл/выкл i}^{\max}, i \in M_{НА}; \omega_i^{\min} \leq \omega_i(r) \leq \omega_i^{\max}, i \in M_{НА}^{рег}$, обеспечиваются заданные подача и давление на выходе НС.

Насосная станция на всем интервале планирования должна обеспечивать требуемую величину давления $H_{НС}(Q_{НС}(k),U(k))$ и подачу $Q_{НС}(k)$, определяемую водопотреблением. Интервал планирования разбивается на подынтервалы планирования $k=1, 2, \dots, T$, отличающиеся требуемыми значениями подачи и давления на выходе НС. На каждом подынтервале планирования из возможных конфигураций (управлений) НС выбираются допустимые и для каждой допустимой конфигурации НС рассчитывается оптимальный режим работы (состав включенных НА и скорости вращения регулируемых НА). В качестве критерия оптимальности режима работы НС используется минимум затрат электроэнергии (5).

Алгоритм состоит из T шагов плюс один заключительный.

Работа алгоритма на k -ом шаге, $k=1, \dots, T$, включает следующие процедуры:

1. По каждому из всех допустимых управлений НС, полученных на предыдущих $k-1$ шагах, формируется набор возможных управлений (режимов работы) НС на k -ом шаге. Каждое возможное управление НС на k -ом шаге характеризуется вектором управления $U(k)$, уровнем жидкости в резервуаре на конец k -го шага управления – $h_p(k,U)$, подачей $Q_{НС}(k)$, давлением в напорном коллекторе $H_{НС}(Q_{НС}(k),U(k))$, расходом электроэнергии $W_{НС}(Q_{НС}(k),U(k))$ на перевод НС из начального состояния в состояние на момент k , значениями $N_{вкл/выкл i}(k,U), i \in M_{НА}$, и $\omega_i, i \in M_{НА}^{рег}$. Требуемое значение подачи $Q_{НС}(k)$ либо прогнозируется на основе предыстории работы НС либо рассчитывается по модели установившегося потокораспределения в системе водоснабжения [2], составленной в соответствии с вектором управления $U(k)$. Входными данными для расчета потокораспределения являются $h_p(k-1,U), h_{ом}^{TP}(k), H_{НС i}(k), i \in M_{НС}$, а также требуемые значения узловых расходов и параметры идентифицированных по экспериментальным данным элементов технологической схемы НС (насосных агрегатов, участков трубопровода, регулирующих и отсекающих задвижек, обратных клапанов и т.д.). Далее из уравнения (8) баланса масс резервуара определяется значение $h_p(k,U)$. Входными данными для расчета являются $Q_{вх}(k)$ и $Q_{НС}(k)$. После этого рассчитывается значение $\eta_{НС}(Q_{НС}(k),U(k))$ с помощью энергетических

характеристик НА, приведенных, например, в [2]. Состояние (включен/выключен) каждого i -го НА сравнивается с его состоянием на предыдущем $k-1$ шаге и, если они отличаются, то значение $N_{вкл/выкл_i}(k,U)$ увеличивается на единицу.

2. Каждое из полученных возможных управлений НС проверяется на выполнение ограничений (10)-(15). При положительном результате возможное управление принимается в качестве допустимого на k -ом шаге. Далее, среди допустимых управлений выбираем то, у которого значение $\eta_{НС}(Q_{НС}(T),U(T))$ максимальное. Этот режим является оптимальным на k -ом подынтервале планирования. Общее количество допустимых режимов работы НС на всем интервале планирования определяется как произведение количеств оптимальных режимов НС на подынтервалах планирования.

После выполнения процедур T шага переходим к заключительному шагу, на котором вначале отсеиваем те допустимые управления T шага, при которых нарушаются ограничения (8), т.е. $|h(0) - h(T,U)| > \Delta h$. Далее, среди допустимых управлений выбираем то, у которого значение $\eta_{НС}(Q_{НС}(T),U(T))$ максимальное.

Полученное управление принимаем в качестве решения задачи планирования режима работы НС. Дальнейшая стабилизация режима работы НС осуществляется средствами РЭП [6].

4. Выводы.

Практический переход на энергосберегающие технологии водоснабжения основывается на использовании РЭП насосных агрегатов. В условиях стохастической среды, характерных для коммунального водоснабжения, задача (2) энергоэффективного управления НС решается путем планирования режима работы НС и последующей его стабилизации.

Сформулирована целевая функция (5) планирования режима работы НС, позволяющая осуществлять оптимальный выбор насосных агрегатов, которые способны с минимальными энергозатратами выполнить технологическое задание по давлению и подаче на выходе НС. Сформулированы технологические условия (6)-(7) решения задачи планирования режима работы НС. Область D допустимых управлений НС сформулирована в виде ограничений (8)-(15). На этой основе разработан энергоэффективный алгоритм управления режимами работы НС. Представленный алгоритм предусматривает планирование оптимального режима работы НС, позволяющее без гидравлического расчета водопроводной сети с приемлемой для практики точностью оптимизировать состав работающих НА по критерию минимизации затрат электроэнергии, и последующую стабилизацию режима работы НС средствами РЭП насосных агрегатов.

Литература

1. Гриценко К.Г., Червяков В.Д. Системный подход к решению проблемы энергосбережения при автоматизации процессов водоснабжения // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – №12. – С.10-14.
2. Тевяшев А.Д., Кобылинский К.В., Котелевцев А.В., Никитенко Г.В. Интерактивная система моделирования и оптимизации режимов работы насосных станций // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – №6/2 (18). – С.15-24.
3. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения (к СНиП 2.04.02-84).
4. Чебанов В.Б. Системы автоматического управления насосными установками // ВСТ: Водоснабжение и санитарная техника. Naustech. – 1994. – №1. – С.14-16.
5. Гриценко К.Г., Червяков В.Д. Энергоэффективный метод дискретно-непрерывного управления насосными станциями системы водоснабжения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – №6/2 (18). – С.4-8.
6. Козлов А., Чистяков М. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми приводами // Современные технологии автоматизации. – 2001. – №1. – С.76-82.