

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

К.Г. Гриценко, В.Д. Червяков

В статье представлен метод дискретно-непрерывного управления режимами работы насосных станций, позволяющий оптимизировать их энергетические затраты. Сформулирована целевая функция дискретного управления режимом работы насосной станции. Получены условия оптимального распределения нагрузки между насосными станциями. Сформулирована область допустимых управлений насосной станцией. Даны практические рекомендации по настройке параметров ПИ-регулятора давления в диктующей точке водопроводной сети.

1. Введение.

В настоящее время в Украине повышенную актуальность имеет проблема эффективного управления технологическими объектами с высокой энергоемкостью [1], среди которых особое место занимают насосные станции (НС) городского водоснабжения. Они характеризуются значительным перерасходом электроэнергии, вызванным избыточными давлениями воды в трубопроводной сети и нерациональным распределением нагрузки между НС.

В большинстве случаев на НС городского водоснабжения несколько насосных агрегатов (НА) работают параллельно на общую сеть, характерной особенностью которой является зависимость гидравлического сопротивления от водопотребления. Последнее характеризуется суточными, недельными и сезонными колебаниями, вследствие чего 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. Известные способы дискретного регулирования производительности НА воздействием на трубопроводную сеть (дресселирование), на насос (поворот лопаток рабочего колеса) и ступенчатое регулирование подачи НС (изменением числа работающих одновременно НА) относятся к простым, но энергетически неэффективным методам, поскольку они направлены лишь на решение технологических задач и не затрагивают энергетических аспектов водоснабжения. Поэтому основой энергоэффективного управления процессом водоснабжения в настоящее время является регулируемый электропривод (РЭП), так как возможности других способов исчерпаны. Только используя РЭП можно с минимальными энергозатратами удовлетворить требования потребителей, обеспечив стабилизацию давления в диктующей точке водопроводной сети на нужном уровне.

Реализация предложенной в [2-4] стратегии оперативно-диспетчерского управления водоснабжением, использующей модель установившегося потокораспределения, требует от системы автоматизации в реальном масштабе времени идентифицировать состояние этой модели. В городских системах водоснабжения (СВ), характеризующихся сложной структурой трубопроводов и существенными колебаниями водопотребления, это представляет достаточно сложную техническую задачу. Для выбора оптимального режима работы НС в большинстве случаев нецелесообразно производить гидравлический расчет водопроводной сети [5]. 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 требуемых давлениях на выходах НС и в диктующей точке сети.

Проведенный в [6] системный анализ проблемы энергосберегающего управления водоснабжением показал, что для ее эффективного решения можно использовать более простую в реализации автоматизированную систему управления (АСУ) водоснабжением. Она включает в себя компьютеризованные подсистемы формирования технологического задания для НС, дискретного управления режимом работы технологического оборудования НС и непрерывной координации режимов работы регулируемых НА с целью оптимизации к.п.д. НС.

2. Постановка задачи.

Основной целью исследований в данной статье является разработка для предложенной в [6] АСУ водоснабжением метода дискретно-непрерывного управления режимами работы НС, обеспечивающего оптимальное с точки зрения энергоэффективности распределение нагрузки между НС, и практических рекомендаций по его технической реализации.

3. Результаты исследования.

Энергоэффективность системы водоснабжения с несколькими НС второго подъема и подкачки, работающими на общую водопроводную сеть, в первую очередь зависит от распределения нагрузки между НС. С точки зрения энергоэффективности оптимальным является распределение нагрузки, соответствующее минимуму суммарных энергозатрат на подачу воды. На рис.1 показаны работающие на общую водопроводную сеть насосные станции НС1 и НС2. Здесь приняты следующие обозначения: h_1, h_2 – давление на входе насосных станций; $H_{НС1}, H_{НС2}$ – давление на выходе насосных станций; H_{z1}, H_{z2} – геодезическая высота подъема насосных станций; Z_1, Z_2 – геодезические отметки осей насосов насосных станций.

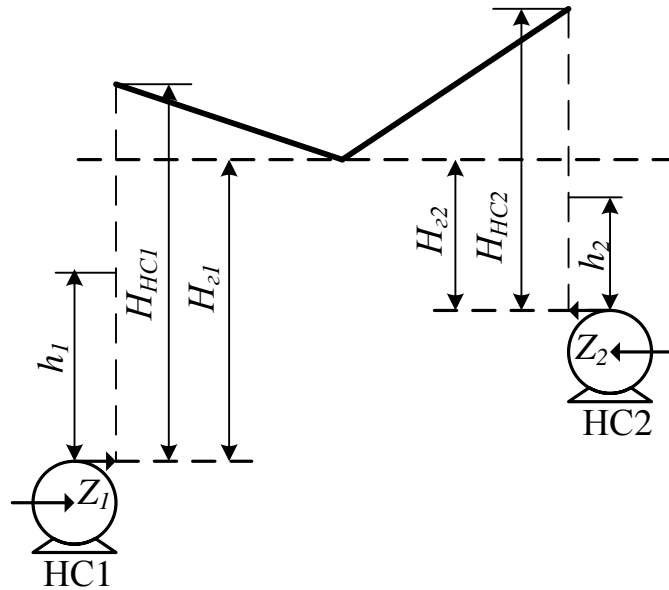


Рис.1. Расчетная схема работы насосных станций на общую сеть

Потребляемую каждой из насосных станций HC1 и HC2 мгновенную мощность выразим следующим образом:

$$P_{HC1} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{HC1} \cdot Q_{HC1}}{\eta_{HC1}} = \frac{\rho \cdot g \cdot (H_{cm1} + R_1 \cdot Q_{HC1}^2) \cdot Q_{HC1}}{\eta_{HC1}} =$$

$$= \frac{\rho \cdot g \cdot ((H_{з1} - h_1) \cdot Q_{HC1} + R_1 \cdot Q_{HC1}^3)}{\eta_{HC1}};$$

$$P_{HC2} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{HC2} \cdot Q_{HC2}}{\eta_{HC2}} = \frac{\rho \cdot g \cdot (H_{cm2} + R_2 \cdot Q_{HC2}^2) \cdot Q_{HC2}}{\eta_{HC2}} =$$

$$= \frac{\rho \cdot g \cdot ((H_{з2} - h_2) \cdot Q_{HC2} + R_2 \cdot Q_{HC2}^3)}{\eta_{HC2}},$$

где R_1, R_2 – эквивалентные гидравлические сопротивления участков водопроводной сети, питаемых насосными станциями HC1 и HC2 соответственно; H_{cm1}, H_{cm2} – статические напоры, развиваемые насосными станциями HC1 и HC2 соответственно; Q_{HC1}, Q_{HC2} – подачи насосных станций; η_{HC1}, η_{HC2} – к.п.д. насосных станций.

Взяв производные $\frac{dP_{HC1}}{dQ_{HC1}}$, $\frac{dP_{HC2}}{dQ_{HC2}}$ и приравняв каждую из них нулю,

получим условие минимума энергозатрат на подачу воды каждой насосной станцией:

$$H_{з1} - h_1 + 3R_1 \cdot Q_{HC1}^2 = 0;$$

$$H_{з2} - h_2 + 3R_2 \cdot Q_{HC2}^2 = 0.$$

Отсюда получаем

$$(H_{з1} - h_1) - (H_{з2} - h_2) = 3R_2 \cdot Q_{HC2}^2 - 3R_1 \cdot Q_{HC1}^2.$$

Из этого выражения, с учетом того, что $H_{з1} - H_{з2} = Z_2 - Z_1$, получаем

$$\frac{Z_2 - Z_1 - h_1 + h_2}{3} = R_2 \cdot Q_{HC2}^2 - R_1 \cdot Q_{HC1}^2. \quad (1)$$

С учетом равенств $H_{HC1} = H_{z1} + R_1 \cdot Q_{HC1}^2$ и $H_{HC2} = H_{z2} + R_2 \cdot Q_{HC2}^2$ получаем

$$H_{HC1} - h_1 - H_{HC2} + h_2 = 2R_2 \cdot Q_{HC2}^2 - 2R_1 \cdot Q_{HC1}^2,$$

или

$$\frac{H_{HC1} - h_1 - H_{HC2} + h_2}{2} = R_2 \cdot Q_{HC2}^2 - R_1 \cdot Q_{HC1}^2. \quad (2)$$

Приравняв левые части (1) и (2), получаем

$$\left(H_{HC1} - \frac{h_1}{3} \right) - \left(H_{HC2} - \frac{h_2}{3} \right) = \frac{2}{3}(Z_2 - Z_1). \quad (3)$$

Для насосных станций второго подъема, осуществляющих забор воды из источников, уровень воды в которых меняется по сравнению с давлением на выходе насосов незначительно, можно принять $h_1=0$ и $h_2=0$. Тогда условие (3) принимает следующий частный вид:

$$H_{HC1} - H_{HC2} = \frac{2}{3}(Z_2 - Z_1). \quad (4)$$

Полученные условия (3) и (4) позволяют оптимально распределить нагрузку между произвольным количеством насосных станций. Для этого необходимо использовать принцип управления “ведущий-ведомый”, рассмотренный в [7]. Кроме того, необходимо обеспечить в водопроводной сети давления, не превышающие требуемые, что достигается стабилизацией давления в диктующей точке водопроводной сети. Превышение давления в диктующей точке ведет к перерасходу электроэнергии на подачу воды, повышенному расходу воды и авариям в сети, а снижение — к потерям системы водоснабжения вследствие неполной обеспеченности водой потребителей. Таким образом, система энергоэффективного управления водоснабжением должна обеспечивать два условия: оптимальное распределение нагрузки между насосными станциями по формулам (3) и (4) и стабилизацию давления в диктующей точке водопроводной сети

$$h_{\text{ом}}(t, U) = h_{\text{ом}}^{\text{TP}}(t), \quad (5)$$

где $t \in [0, T]$ — интервал времени, на котором осуществляется управление системой водоснабжения; $U(t)$ — вектор управления; $h_{\text{ом}}^{\text{TP}}(t)$ — давление, которое необходимо обеспечить в диктующей точке водопроводной сети.

На практике, чтобы обеспечить выполнение условий (3)-(5), необходимо использовать РЭП. Его стандартное программное обеспечение позволяет реализовать закон ПИ-регулирования давления в диктующей точке водопроводной сети. Необходимо лишь определить параметры ПИ-регулятора давления. Решим эту задачу.

Исходя из математического описания гидросети [8], основанного на волновых уравнениях, определим передаточную функцию гидросети $W_c(p)$,

связывающую величины давлений на выходе регулируемого НА (h_{HA}^{pez}) и в диктующей точке гидросети ($h_{\partial m}$). Для этого воспользуемся представлением $W_z(p)$, соответствующим LRC-фильтру с передаточной функцией

$$W_z(p) = \frac{\Delta h_{\partial m}}{\Delta h_{HA}^{pez}} = \frac{R_2}{p^2 \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot C_2 + p \cdot (L_2 + C_2 \cdot R_1 \cdot R_2) + R_1 + R_2}, \quad (6)$$

где R_i , $i=1,2$ – эквивалентное гидравлическое сопротивление трубопроводов от регулируемого НА до места расположения датчика давления ($i=1$) и на остальном участке ($i=2$); C_2 и L_2 – соответственно, гидравлические емкость и индуктивность водопроводной сети. Формулы для расчета указанных параметров приведены в [8].

Наилучшим образом аппроксимирует экспериментальные данные работы НА с разными скоростями вращения следующая зависимость давления НА от скорости вращения ω и расхода Q_{HA} , полученная на основе принципа максимального правдоподобия [2]:

$$h_{HA}^{pez} = a0_1 + a0_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) + a0_3 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left[a1_1 + a1_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) + a1_3 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \right] \cdot Q_{HA} + \\ + \left[a2_1 + a2_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) + a2_3 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \right] \cdot Q_{HA}^2,$$

где ω_0 – номинальная скорость вращения НА.

С точки зрения теории управления центробежный насос представляет собой преобразователь входной величины ω в выходную h_{HA}^{pez} . При этом расход Q_{HA} относится к возмущению со стороны нагрузки – водопроводной сети. Особенностью центробежного насоса как элемента системы управления является то, что его коэффициент передачи $K_{цн}$ зависит от скорости вращения ω и расхода Q_{HA} :

$$K_{цн} = \frac{\partial h_{HA}^{pez}}{\partial \omega} = \frac{a0_2}{\omega_0} + 2 \cdot a0_3 \frac{\omega}{\omega_0} + \left[\frac{a1_2}{\omega_0} + 2 \cdot a1_3 \frac{\omega}{\omega_0} \right] \cdot Q_{HA} + \left[\frac{a2_2}{\omega_0} + 2 \cdot a2_3 \frac{\omega}{\omega_0} \right] \cdot Q_{HA}^2.$$

Известно, что инерционность водопроводной сети намного превышает длительность переходных процессов РЭП. Поэтому РЭП допустимо описать следующей передаточной функцией, связывающей скорость вращения РЭП ω с заданием ω_3 по этой переменной:

$$W_{ЭП}(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta \omega_3(p)} = \frac{1}{T_{ЭП} \cdot p + 1},$$

где $T_{ЭП}$ – постоянная времени РЭП.

Если в состав водопроводной сети входят накопительные резервуары, то импеданс ее приобретает ярко выраженный емкостной характер и можно принять гидравлическую индуктивность $L_2=0$. При этом передаточная функция (6) упрощается и принимает вид

$$W_2^*(p) = \frac{k_2}{T_2 \cdot p + 1},$$

где $k_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, $T_2 = \frac{R_1 \cdot C_2}{k_2}$.

Передаточная функция неизменяемой части системы имеет вид

$$W_{н.ч.}(p) = W_{ЭП}(p) \cdot k_{цн} \cdot W_2^*(p) = \frac{1}{T_{ЭП} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{цн} \cdot k_2}{T_2 \cdot p + 1}.$$

Для водопроводной сети (объекта управления с одной большой инерционностью $T_2 \gg T_{ЭП}$) ПИ-регулятор давления можно настроить на модульный оптимум. Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W_{ПИ}(p) = \frac{\Delta \omega_3(p)}{\Delta h_{\partial m}(p)} = k_{ПИ} \frac{T_{ПИ} \cdot p + 1}{T_{ПИ} \cdot p}.$$

Здесь параметры $k_{ПИ} = \frac{T_2}{2 \cdot k_{цн} \cdot k_2 \cdot T_{ЭП}}$ и $T_{ПИ} = T_2$ выбраны из условия настройки

на модульный оптимум.

На практике из-за изменения параметров водопроводной сети k_2 и T_2 точной компенсации инерционности водопроводной сети достичь невозможно. Поэтому задача синтеза ПИ-регулятора давления в диктующей точке водопроводной сети сводится к выбору параметров регулятора $k_{ПИ}$ и $T_{ПИ}$, при которых для известного диапазона изменения параметров водопроводной сети k_2 и T_2 достигается наименьшее отклонение перерегулирования σ и времени переходного процесса $t_{н.н.}$ от их оптимальных значений $\sigma^{opt} = 4,3\%$ и $t_{н.н.}^{opt} = 4,1 \cdot T_{ЭП}$, соответствующих условию настройки системы на модульный оптимум в номинальном режиме.

Моделирование переходных процессов обработки ступенчатого задания по давлению в замкнутой системе, передаточная функция прямого канала которой имеет вид

$$W_{н.к.}(p) = W_{ПИ}(p) \cdot W_{н.ч.}(p) = k_{ПИ} \frac{T_{ПИ} \cdot p + 1}{T_{ПИ} \cdot p} \cdot \frac{1}{T_{ЭП} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{цн} \cdot k_2}{T_2 \cdot p + 1},$$

где $k_{ПИ} = \frac{T_2^{ном}}{2 \cdot k_{цн} \cdot k_2^{ном} \cdot T_{ЭП}}$ и $T_{ПИ} = T_2^{ном}$,

показало, что:

- 1) при перекомпенсации ($T_{ПИ} > T_2$) увеличение коэффициента усиления $k_{ПИ}$ ведет к повышению быстродействия системы, а при недокомпенсации ($T_{ПИ} < T_2$) с ростом $k_{ПИ}$ время переходного процесса $t_{н.н.}$ и перерегулирование σ возрастают;
- 2) при перекомпенсации ($T_{ПИ} > T_2$) и полной компенсации ($T_{ПИ} = T_2$) одинаковым $k_{ПИ}$ соответствуют близкие значения перерегулирования;

3) в случае недокомпенсации ($T_{ПИ} < T_2$) уменьшению отношения $\frac{T_2}{T_{ЭП}}$ соответствует большее перерегулирование, чем при полной компенсации ($T_{ПИ} = T_2$). При перекомпенсации ($T_{ПИ} > T_2$) имеет место обратная зависимость.

Исходя из этого сформулированы общие рекомендации по настройке параметров ПИ-регулятора давления в диктующей точке водопроводной сети: постоянная времени $T_{ПИ}$ должна равняться большему из возможных значений T_2 , а коэффициент усиления $k_{ПИ}$ лучше устанавливать заниженным, исходя не из номинального, а из среднего значения параметров гидросети k_2 и T_2 .

Для тех случаев, когда пренебрежение гидравлической индуктивностью L_2 водопроводной сети недопустимо, необходимо использовать закон ПИД-регулирования давления. Стандартное программное обеспечение РЭП позволяет успешно его реализовать.

С помощью алгебраического критерия устойчивости Ляпуна-Шипара было исследовано влияние гидравлической индуктивности L_2 водопроводной сети на устойчивость системы, передаточная функция прямого канала которой имеет вид

$$W(p) = W_{ПИ}(p) \cdot W_{ЭП}(p) \cdot k_{ун} \cdot W_2(p).$$

В эту передаточную функцию параметр L_2 водопроводной сети входит через постоянную времени $T_2^* = \frac{L_2}{R_1}$. Было выявлено, что неустойчивость в системе стабилизации давления, рассчитанной без учета инерционности движущихся масс воды, которую характеризует параметр L_2 , может возникнуть лишь при достаточно больших значениях постоянной времени T_2^* , соизмеримых с T_2 .

АСУ водоснабжением должна не только обеспечивать выполнение условий (3)-(5), но и ограничивать подачу НС при достижении максимально допустимого для водоисточника расхода и обеспечивать ряд других ограничений. Так, область D допустимых управлений НС включает следующие ограничения, сформулированные в [3]:

– для каждого входного резервуара НС

$$\left| \sum_{k=1}^T Q_{\text{вх}j}(k) - \sum_{k=1}^T \sum_{i \in M_{HA}} A_i(k) \cdot Q_{HAi}(k) \right| \leq \left| \int_{h_j(0)}^{h_j(T,U)} S_j(h) \cdot dh \right|, \quad j \in I_1; \quad (7)$$

– для каждого выходного резервуара НС

$$\left| \sum_{k=1}^T \sum_{i \in M_{HA}} A_i(k) \cdot Q_{HAi}(k) - \sum_{k=1}^T Q_{\text{вых}j}(k) \right| \leq \left| \int_{h_j(0)}^{h_j(T)} S_j(h) \cdot dh \right|, \quad j \in O_1; \quad (8)$$

– для каждого резервуара НС ограничения на уровни в резервуарах имеют вид

$$h_i^{\min} < h_i(k, U) < h_i^{\max}, \quad i \in I_1 \cup O_1; \quad (9)$$

– технологические ограничения на регулируемые параметры (параметры вектора управления U)

$$\omega_i^{\min} \leq \omega_i(k) \leq \omega_i^{\max}, \quad i \in M_{HA}, \quad E_j^{\min} \leq E_j(k) \leq E_j^{\max}, \quad j \in M_{PЗ}; \quad (10)$$

– ограничения на количество включений/выключений НА и перемещений запорных дисков регулируемых задвижек:

$$N_{\text{вкл/выкл}i}(T, U) \leq N_{\text{вкл/выкл}i}^{\max}, \quad i \in M_{HA}, \quad N_{PЗj}(T, U) \leq N_{PЗj}^{\max}, \quad j \in M_{PЗ}. \quad (11)$$

В постановке (7)–(11) $k=1, 2, \dots, T$ – шаг управления. I_l, O_l – множество входов и выходов НС, оборудованных резервуарами. Зависимости (7)–(8) 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 $h_j(0)$ и $h_j(T, U)$. $S_j^{(h)}$ – функция площади зеркала j -го резервуара в зависимости от уровня h_j . $Q_{\text{вх}j}$ – подача воды в j -ый резервуар. $Q_{\text{вых}j}$ – расход воды из j -го резервуара. $U(k)$ – вектор управления, который содержит следующие переменные: скорость вращения регулируемого НА $\omega_i(k)$, $i \in M_{HA}$, где M_{HA} – множество НА; угол поворота регулируемой задвижки $E_j(k)$, $j \in M_{PЗ}$, где $M_{PЗ}$ – множество регулируемых задвижек; булевы переменные $A_i(k)$, описывающие состояние i -го НА на шаге k управления ($A=1$, если НА включен, и $A=0$, если НА выключен).

Ограничения (7) – (11) 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 (7) – (11).

На каждом шаге k управления водоснабжением необходимо осуществлять выбор НА, использование которых позволяет с наименьшими энергозатратами выполнить условия (3)–(5). Эту задачу выполняет работающая по принципу прогноза подсистема дискретного управления режимом работы технологического оборудования НС, рассмотренная в [6]. В качестве целевой функции дискретного управления предлагается принять предложенную в [9] функцию

$$F(k) = \sum_{i \in M_{HA}} A_i(k) \cdot P_{HAi}(Q_{HAi}(k), U) \rightarrow \min, \quad U \in D, \quad (12)$$

где P_{HAi} , Q_{HAi} – соответственно мощность и подача i -го НА. Причем должно выполняться условие

$$\sum_{i \in M_{HA}} A_i(k) \cdot Q_{HAi}(k) = Q_{HC}(k).$$

Если известна вся предыстория работы НС, т.е. значения подачи $Q_{HC}(k)$, $k=0, -1, -2, \dots$, то для $k=1, 2, \dots, T$ несложно получить оценки прогнозов $Q_{HC}(k)$ с использованием моделей авторегрессии или проинтегрированного скользящего среднего.

4. Выводы.

В настоящее время повышение энергоэффективности СВ возможно в первую очередь за счет совершенствования методов управления СВ, использующих средства управляющей компьютерной техники. Разработан метод дискретно-непрерывного управления режимами работы насосных станций, позволяющий оптимизировать их энергозатраты. Сформулирована целевая функция (12) дискретного управления режимом работы НС, позволяющая на каждом шаге управления водоснабжением осуществлять оптимальный выбор технологического оборудования, которое способно с минимальными энергозатратами выполнить технологическое задание по давлению и подаче на выходе НС.

Непрерывное управление режимом работы НС заключается в изменении скорости вращения регулируемых НА с целью обеспечения требуемых технологических параметров СВ. В результате проведенного исследования получены условия (3)-(5) оптимального с точки зрения энергоэффективности распределения нагрузки между НС. Сформулирована область D допустимых управлений НС в виде ограничений (7)-(11).

Для выполнения сформулированных условий (3)-(5) необходимо использовать РЭП, реализующий закон ПИ-регулирования давления в диктующей точке водопроводной сети. Выявлено, что неустойчивость в системе стабилизации давления, рассчитанной без учета инерционности движущихся масс воды, которую характеризует параметр L_2 , может возникнуть лишь при достаточно больших значениях постоянной времени $T_2^* = \frac{L_2}{R_1}$,

соизмеримых с постоянной времени гидросети T_2 . Рассмотрен порядок расчета и сформулированы общие рекомендации по настройке параметров ПИ-регулятора давления в диктующей точке водопроводной сети: постоянная времени $T_{ПИ}$ должна равняться большему из возможных значений T_2 , а коэффициент усиления $k_{ПИ}$ лучше устанавливать заниженным, исходя не из номинального, а из среднего значения параметров водопроводной сети k_2 и T_2 .

Полученные результаты позволяют осуществить энергоэффективное управление различными системами водоснабжения с использованием современных средств контроля технологических параметров системы водоснабжения и плавного регулирования технологических параметров НА.

Литература

1. Комплексна державна програма енергозбереження України, схвалена Постановою Кабінету Міністрів України від 5 лютого 1997 року №148. — 220с.
2. Тевяшев А.Д., Шулик П.В. Оценивание параметров математических моделей элементов насосных станций в реальном времени // АСУ и приборы автоматики. Х.: Изд-во ХТУРЭ, – 2002. – №1. – С.28-37.

3. Тевяшев А.Д., Шулик П.В., Никитенко Г. В. Стохастическая модель и метод оптимального управления режимом работы насосной станции // АСУ и приборы автоматики. Х.: Изд-во ХТУРЭ, – 2002. – №3. – С.48-57.
4. Тевяшев А.Д., Шулик П. В., Никитенко Г.В. Оперативное управление режимом работы насосной станции, не оснащенной насосами с регулируемым приводом // Вестник Харьковского национального политехнического университета “ХПИ”. – 2002. – №8. –С.42-48.
5. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения (к СНиП 2.04.02-84).
6. 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.
7. Гриценко К.Г., Червяков В.Д. Экстремальное управление системой водоснабжения // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. – Кременчуг: КГПИ, 1999. Вып.1. — С.65-69.
8. Бердников В.В. Прикладная теория гидравлических цепей. – М.: Машиностроение, 1977. – 192с.
9. Гриценко К.Г. Имитационная модель системы ресурсосберегающего управления водоснабжением территориальной зоны // Вестник Херсонского государственного технического университета. — 2000. — №2. — С.91-94.

Гриценко, К. Г. Энергоэффективный метод дискретно-непрерывного управления насосными станциями системы водоснабжения [Текст] / К. Г. Гриценко, В. Д. Червяков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 6/2 (18). – С. 4–8.