

НОВЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ ЗОНЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ КРУПНОГО ГОРОДА

И.К. Левин, П.В. Крижевский (ООО "Индасофт")

Рассматривается задача управления насосной станцией зоны водоснабжения крупного города. Насосная станция данной зоны оснащена частотными регуляторами оборотов насосов, а также в данной зоне установлено большое число (44 ед.) контрольных точек, в которых измеряются расход и давление. Это дает возможность с целью экономии электроэнергии и воды перейти от управления насосами по нормативным суточным графикам к управлению по реальной ситуации, оцениваемой в РВ. Экономия достигается за счет снижения напора воды на выходе станции. В работе представлен алгоритм управления станцией, в который входят адаптивный алгоритм настройки линейной модели зоны водоснабжения, метод определения критической точки (по которой надо вести управление) и алгоритм управления давлением воды на выходе станции. Алгоритм заложен в систему управления повысительной насосной станции (ПНС). В настоящее время он проходит опытно-промышленную эксплуатацию, результаты которой показывают значительную экономию электроэнергии и воды.

Ключевые слова: насосная станция, алгоритм, критические точки, нормативные суточные графики, РВ.

Введение

В настоящее время управление насосными станциями зон водоснабжения крупных городов ведется по нормативным суточным графикам, задающим давление воды либо на выходе насосных станций [1], либо в малом числе (одной или двух) диктующих точек в зоне водоснабжения [2]. В таком управлении обычно не используется информация о распределении давлений внутри зоны водоснабжения. Уровни давления на выходе насосной станции или в диктующих точках задаются так, чтобы обеспечить (с некоторым запасом) необходимое давление на вводе всех домов зоны. Задаваемый уровень давления обычно зависит от времени суток и сезона.

Однако задание давления воды сверх необходимого приводит к излишним потерям как электроэнергии, так и самой воды (вследствие неизбежных утечек). Для обеспечения меньшего запаса по давлению нужно иметь более подробную информацию о распределении давления воды по зоне водоснабжения. В идеале надо знать давление воды на вводе в каждый дом, но пока еще техническое решение, обеспечивающее дистанционный контроль давления на каждом вводе, представляется слишком дорогим.

ООО "Индасофт" разработало АСУ комплексом подачи питьевой воды в одном из российских мега-

полисов в зоне водоснабжения, обеспечивающей водой примерно 700 жилых домов. При создании этой системы управления на 44 вводах в дома (водомерных узлах) были установлены контрольные точки, которые с помощью контроллеров Motorola измеряют давления и расходы и отправляют эти данные на сервер системы управления. Эти точки распределены равномерно по данной зоне водоснабжения.

До введения в строй данной системы (в марте 2009 г.) управление насосами станции осуществлялось по нормативному суточному графику и иногда корректировалось диспетчерами по давлениям в трех диктующих точках зоны.

С созданием системы автоматизации зоны водоснабжения и накоплением статистики появилась возможность использовать информацию о распределении давлений внутри зоны для более точного управления давлением на насосной станции. Этому способствует также тот факт, что насосы данной станции оснащены частотными регуляторами скорости вращения, что позволяет плавно регулировать давление на выходе станции [3].

Схема системы управления насосной станции

Контур регулирования насосной станции включает датчик давления (на выходе станции) и частотный регулятор, который поддерживает давление в соответствии с задаваемой ему уставкой (рис. 1). Последняя вырабатывается управляющим сервером, который получает информацию от контрольных точек, установленных в подвалах жилых домов. Повторим, что контрольными точками оснащены не все дома зоны, а только 44 примерно из 700 зданий, но при этом контрольные точки размещены примерно равномерно по зоне. Отметим, что некоторые контрольные точки размещены за так называемыми "номерными" подкачивающими насосными станциями, которые устанавливаются обычно на вводе в высотные дома. Такие контрольные точки не участвуют в выработке уставки давления на насосной станции, поскольку давление в них обеспечивается насосами соответствующих подкачивающих станций (ПНС) и слабо зависит от давления

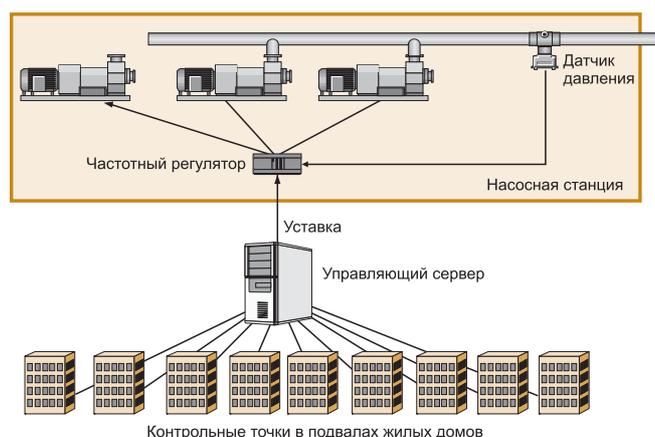


Рис. 1

на станции. Всего в данной зоне водоснабжения 14 таких номерных точек. Таким образом, управление насосной станцией ведется по 30 контрольным точкам.

Постановка задачи

Требуется поддерживать уставку давления на насосной станции на как можно более низком уровне при соблюдении следующих условий:

- давление в каждой контрольной точке не должно опускаться ниже определенного для данной точки предела (об определении нижних пределов для точек — см. далее);
- уставка давления не должна реагировать на резкие изменения показаний датчиков давления, которые достаточно часто вызываются сбоями самих датчиков или сбоями в сети передачи данных.
- система должна своевременно, в диапазоне 10...15 мин реагировать на утренние/вечерние изменения водопотребления, а также на изменения водопотребления, вызванными внешними событиями (спортивными матчами, концертами, праздниками и т.д.).
- для экономии ресурса насосных агрегатов число переключений режима (изменений значения уставки) в сутки должно быть по возможности небольшим.

Краткое описание работы алгоритма

Программа, реализующая алгоритм, работает в периодическом режиме. Период рабочего цикла — 1 мин. Работа алгоритма в пределах одного рабочего цикла состоит в следующем:

1. Опрашиваются все контрольные точки, находящиеся вне пределов "номерных" ПНС, и среди них определяется "критическая" точка. Алгоритм определения критической контрольной точки описан ниже.

Замечание: контрольные точки, находящиеся за номерными ПНС, не опрашиваются, поскольку давление в этих точках обеспечивается подкачивающими насосами и слабо зависит от давления на центральной станции зоны водоснабжения;

2. По найденной критической точке определяется, как должно измениться давление на насосной станции. Алгоритм определения нужного изменения также описан ниже;

3. Чтобы исключить изменения уставки, обусловленные сбоями датчиков или сбоями в сетях передачи данных, а также, чтобы по возможности уменьшить число переключений режимов насосов за сутки, вычисленное значение давления подвергается медианной фильтрации, параметры которой выбираются по специальным критериям, описанным ниже;

4. Отфильтрованное значение рекомендуемого давления передается на частотный регулятор в качестве уставки, но не на каждом цикле, а один раз в 5 мин (согласно техническому регламенту регулятора).

Замечание. Определение контрольных точек и определение необходимых коррекций давления производится по статистической модели зоны водоснабжения, которая определяет зависимость давления в кон-

трольных точках от давления на насосной станции. Данная модель является адаптивной, она постоянно перестраивается по мере поступления статистики. Подробное описание этой модели приводится далее.

Для осуществления работы алгоритма требуется иметь:

- заданные пределы давлений для всех контрольных точек. Эти пределы должны обеспечивать надежное водоснабжение всех домов в зоне каждой контрольной точки;
- алгоритм определения критической контрольной точки;
- алгоритм для вычисления необходимого изменения давления на насосной станции;
- математическую (статистическую) модель зоны водоснабжения для осуществления работы указанных выше алгоритмов.

Реализация приведенных требований

Выбор пределов давлений для контрольных точек

Нужно так выбирать нижние пределы давлений для контрольных точек, чтобы обеспечить давление на верхних этажах домов, соответствующее нормам СНиП — 5 м водяного столба. Однако для этого надо было бы оснастить верхние этажи всех домов датчиками давления с дистанционной передачей данных, что технически пока нереально. Тем не менее, при управлении по нормативным суточным графикам водоснабжения всех потребителей было нормальным. Поэтому было принято решение использовать статистику измерений давлений в контрольных точках, за тот период (примерно полгода), когда управление еще велось по нормативным суточным графикам, но контрольные точки уже работали. По этой статистике для каждой контрольной точки были определены минимальные ночные и дневные давления. По журналу учета жалоб было проверено, что в моменты достижения этих минимальных давлений не поступало жалоб на перебои в подаче воды. Определенные таким способом минимальные давления были приняты в качестве нижних пределов для контрольных точек. Аналогично устанавливались и верхние пределы давления для контрольных точек. Заметим, что верхние пределы давления для контрольных точек при работе представляемого здесь алгоритма практически никогда не достигались.

Построение математической (статистической) модели

Для точного анализа давлений и выработки правильных управляющих воздействий нужно было бы иметь точную математическую модель всей гидравлической системы зоны водоснабжения. Однако это невозможно, поскольку для построения такой модели и ее калибровки нужно иметь подробную информацию о топологии и обо всех элементах гидравлической системы (трубах, задвижках, насосах и т.д.), а также об их состоянии на каждый конкретный момент времени. Такая информация недоступна. Поэтому нужно иметь эмпирическую (статистическую) модель, которая опи-

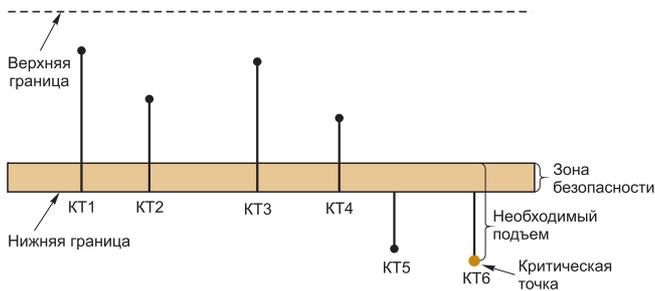


Рис. 2. Критическая точка типа 1

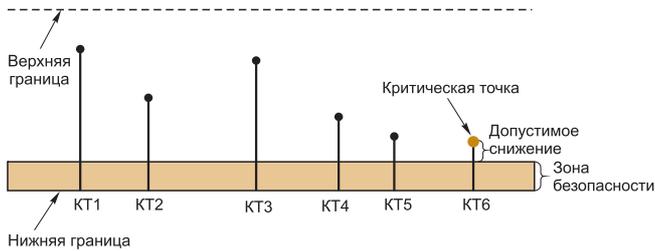


Рис. 3. Критическая точка типа 2

сывает зависимость изменения давления в контрольных точках от изменения давления на насосной станции. Данная модель может быть построена в четырех последовательно усложняющихся вариантах.

1. *Простейшая модель изменений 1:1.* В этой модели прогнозируется, что изменение давления на насосной станции вызывает точно такое же изменение давления на всех контрольных точках. Несмотря на всю свою простоту и грубость, эта модель имеет некоторое право на существование. Дело в том, что по статистике приращение давления в контрольных точках и на насосной станции связаны примерно линейной зависимостью с коэффициентом, колеблющимся вокруг величины 0,9. Отметим, что это относится только к тем случаям, когда менялось давление на насосной станции. Однако довольно часто давление на насосной станции не меняется (за счет работы регулятора), а давление на контрольной точке изменяется из-за изменения расхода. Но поскольку мы интересуемся именно влиянием изменения на насосной станции на контрольную точку, то такое грубое соотношение в первом приближении можно принять. Естественно, ни в какой статистической настройке такая грубая модель не нуждается.

2. *Настраиваемая линейная модель зависимости давления в контрольной точке от давления на насосной станции.* Эта модель учитывает фактически падение давления на пути воды от насосной станции к контрольной точке. Математический аппарат для настройки этой и других моделей описан ниже.

3. *Настраиваемая линейная модель, учитывающая кроме давления еще и расход воды в контрольной точке.* Такая модель имеет большую точность, поскольку из физических соображений ясно, что давление в контрольной точке сильно зависит от расхода в этой точке.

4. *Настраиваемая линейная модель, учитывающая помимо давления и расхода в данной контрольной точке еще и давления и расходы в соседних контрольных точках.* Такая

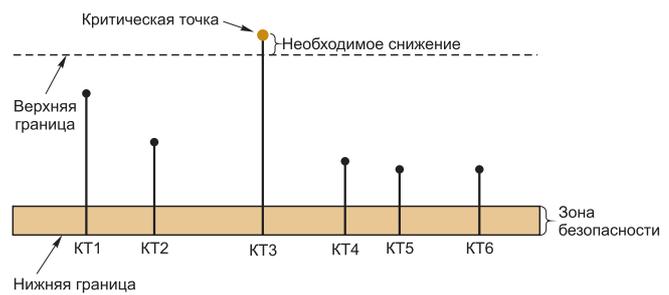


Рис. 4. Критическая точка типа 3

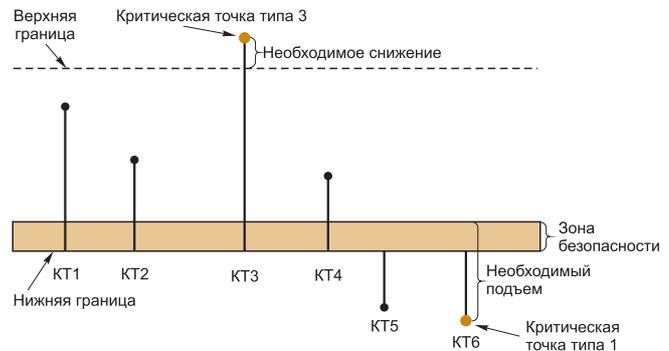


Рис. 5. Одновременное присутствие критических точек типов 1 и 3. Тревога

модель должна иметь еще большую точность, поскольку на падение давления в данной контрольной точке влияют расходы в тех контрольных точках, которые "сидят" на той же трубе, что и данная контрольная точка.

Заметим, что в настоящее время на эксплуатируемой системе используется модель 2, поскольку в силу ряда технических причин использовать показания расходомеров при частом циклическом опросе пока еще затруднительно. В следующих версиях программы предполагается использование показаний расходомеров и соответственно моделей 3 и 4.

Использование модели 1 зарезервировано для случаев, когда модель 2 или модели 3 и 4 будут давать грубые ошибки. Это возможно при резком изменении конфигурации сети вследствие аварий или крупных ремонтных работ. Однако за время опытной эксплуатации системы (в течение трех месяцев с марта по май 2009 г.) случаев неадекватного поведения модели 2 отмечено не было, и поэтому модель 1 никогда не использовалась.

Для настройки линейной статистической модели применяется рекуррентный алгоритм Качмажа [4]. Такой алгоритм был выбран потому, что он может непрерывно следить за изменениями линейной зависимости, и не требует перенастройки при изменении внешних условий, а также потому, что он прост для вычислений и не создает существенной нагрузки для ПК.

Приведем описание этого алгоритма применительно к линейной двухпараметрической модели, которая описывает зависимость давления в контрольной точке от давления на насосной станции (модель 2).

Сама модель записывается в виде:

$$P_k = c_{0k} + c_{1k} P_{nc},$$

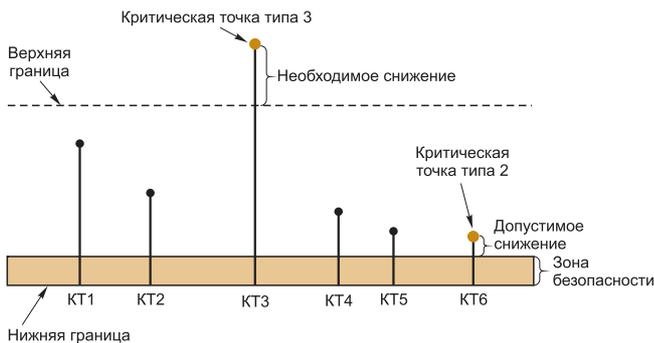


Рис. 6, а. Неустрашимое противоречие между критическими точками типов 2 и 3. Тревога

где P_k – давление в k -й контрольной точке, P_{nc} – давление на насосной станции, c_{0k} и c_{1k} – свободный член и коэффициент двухпараметрической линейной модели для k -й контрольной точки.

Алгоритм Качмажа для настройки этой модели имеет следующий вид:

$$\begin{cases} c_{0k}[t] = c_{0k}[t-1] - \Delta[t], \\ c_{1k}[t] = c_{1k}[t-1] - \Delta[t]P_{nc}[t]t \end{cases}$$

$$\Delta[t] = \frac{c_{0k}[t-1] + c_{1k}[t-1]P_{nc}[t] - P_k[t]}{1 + P_{nc}^2[t]}$$

где $[t]$ – момент времени, когда производится коррекция модели, $[t-1]$ – момент времени предыдущей коррекции.

Алгоритм определения критической контрольной точки

Определение критической контрольной точки осуществляется в следующей последовательности:

1. Проверяется, есть ли среди контрольных точек такие, где давление ниже заданного для этой точки. Для каждой из этих точек по математической модели вычисляется величина повышения давления на насосной станции, которая необходима, чтобы давление в точке оказалось выше предписанного этой точке минимума плюс некоторый запас безопасности (обычно 0,1...0,2 м вод. ст.). Среди этих точек выбирается та, для которой это необходимое повышение давления на насосной станции самое большое. Она объявляется критической точкой типа 1 (рис. 2).

2. Если все контрольные точки имеют давление выше их нижних пределов, то для каждой точки по математической модели вычисляется, насколько нужно снизить давление на насосной станции, чтобы давление в данной контрольной точке достигло своего допустимого нижнего предела плюс запас безопасности. Среди всех точек выбирается та, для которой это снижение наименьшее. Эта точка объявляется критической типа 2 (рис. 3).

3. Проверяется, есть ли контрольные точки, у которых давление выше допустимого предела. Среди них находится та, для которой вычисленное по математической модели снижение давления на насосной станции самое большое. Эта точка объявляется критической точкой типа 3 (рис. 4).

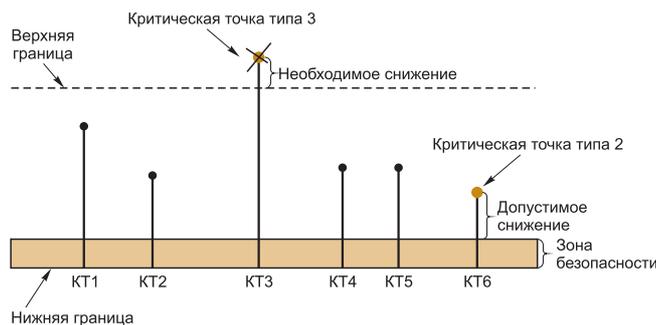


Рис. 6, б. Ситуация, когда критическая точка типа 3 может быть проигнорирована

Теоретически возможно, хотя и очень маловероятно, одновременное появление критических точек и типа 1, и типа 3. Это означает либо серьезную ошибку в данных, либо аварийную ситуацию в системе. Такую ситуацию исправить изменением давления на насосной станции невозможно. При этой ситуации оператору выдается сигнал тревоги (рис. 5).

Вполне возможна ситуация, когда одновременно имеются критические точки типов 2 и 3. В этом случае сравниваются величины вычисленных по математической модели компенсаций: для точки типа 2 вычисляется, насколько необходимо снизить давление на насосной станции, чтобы давление в этой точке оказалось на нижнем пределе плюс необходимый запас безопасности, а для точки типа 3 – на сколько необходимо снизить давление на насосной станции, чтобы давление в этой точке оказалось ниже верхнего предела. Если компенсация для точки типа 3 больше, чем компенсация для точки типа 2, то велика опасность того, что устранение нарушения в точке типа 3 приведет к нарушению в точке типа 2. Такую ситуацию тоже нельзя исправить изменением давления на насосной станции, поэтому оператору выдается сигнал тревоги (рис. 6, а).

Если же компенсация для точки типа 3 меньше компенсации для точки типа 2, то снижение давления на насосной станции, обеспечивающее нужное давление в точке типа 2, скорее всего приведет к достаточному понижению давления и в точке типа 3. Поэтому критическая точка типа 3 игнорируется и остается только точка типа 2 (рис. 6, б).

Итак, мы исключили ситуации, когда одновременно появляются критические точки разных типов, поэтому в дальнейшем будут разбираться ситуации, когда имеется только одна критическая точка конкретного типа.

Вычисление коррекции давления на насосной станции

Вычисленное для текущей критической точки необходимое давление на насосной станции является предварительным значением для уставки регулятора насосной станции. Предварительным это значение является потому, что непосредственно использовать его для изменения уставки нельзя, поскольку это значение следует за резкими изменениями показаний датчиков в контрольных точках, которые время от



Рис. 7, а. Подробные графики давления на насосной станции

времени происходят вследствие сбоя как в самих датчиках, так и в системах передачи данных.

Полученное предварительное значение уставки требуется отфильтровать, чтобы:

- 1) система управления не реагировала на резкие изменения показаний датчиков;
- 2) система по возможности мало изменяла значения уставки в течение суток.

Однако линейные фильтры в данном случае использовать нецелесообразно, поскольку они обладают следующими недостатками:

- а) после большого выброса в измеренных данных (например, вследствие кратковременного сбоя датчика) линейный фильтр дает достаточно сильный всплеск рекомендуемого значения уставки, который потом долго затухает;
- б) фильтры изменяют значение на выходе практически так же часто, как часто изменяется входной сигнал, хотя эти изменения более медленные.

Более подходящим для данной ситуации представляется применение медианных фильтров, использующих скользящую медиану [5]. Они никак не реагируют на кратковременное изменение входного сигнала, а их реакция на долговременное изменение начинается тогда, когда в окне скользящей медианы наберется более половины точек, "проголосовавших" за это изменение.

В качестве длины окна скользящей медианы были приняты два значения: 15 выборок для спокойных периодов и 7 выборок для периодов изменений. В дальнейшем скользящая медиана с первым размером окна называется "длинной медианой", а со вторым размером — "короткой медианой". Длинная медиана применяется для спокойных периодов суток, когда водопотребление изменяется мало (обычно ночь и день), а короткая медиана — для активных периодов, когда водопотребление изменяется быстро (обычно утро и вечер). Способ детектирования спокойных и активных периодов приведен ниже.

Отметим, что длинная медиана не создает "карманов" и "выступов" на графике уставки (то есть кратковременных понижений и повышений давления) в спокойные периоды, но зато при резком изменении



Рис. 7, б. Сравнение графика давления на насосной станции и графика нормативного давления

водопотребления вырабатываемая ею уставка отстает от запросов потребителей и запаздывает с началом повышения или понижения давления. Короткая же медиана своевременно реагирует на начало или окончание повышенного водопотребления, но может создавать нежелательные "карманы" и "выступы" в периоды спокойного водопотребления.

Детектирование спокойных и активных периодов водопотребления

Для детектирования спокойных и активных периодов водопотребления решено было не привязываться к конкретному времени суток, поскольку изменение водопотребления может происходить не только утром или вечером, но и как следствие внешних событий (спортивные матчи, концерты, праздники и т.д.). В результате проведения ряда экспериментов над статистикой, собранной в период существования нынешней конфигурации системы управления зоны водоснабжения ПНС, было выяснено, что достаточно надежным критерием изменения активности водопотребления является скорость изменения такого критерия, как средний модуль отклонения от текущего среднего (более устойчивый аналог дисперсии) суммы приращений давлений на всех контрольных точках. В виде формулы этот критерий может быть выражен как:

$$D[t] = \frac{\sum_{i=1}^N |X[t-i] - \bar{X}[t]|}{N},$$

$$\bar{X}[t] = \frac{\sum_{i=1}^N X[t-i]}{N},$$

где N — число отсчетов усреднения;

$$X[t] = \sum_{j=1}^M P_j[t] - P_j[t-1],$$

где M — число контрольных точек.

Данный критерий имел следующие параметры: число отсчетов усреднения — 15 ед.; порог срабатывания $D[t] \geq 5$.

При превышении данного порога период водопотребления считается активным и для фильтрации выби-

рается короткая медиана, а если значение критерия ниже этого порога, период считается спокойным и выбирается длинная медиана. Отметим, что этот критерий довольно хорошо отражает моменты изменения водопотребления – в "спокойные" периоды значение критерия колеблется около 1, а в моменты изменения водопотребления сразу подскакивает до уровня примерно 10.

Результаты опытной эксплуатации АСУ

Система управления ПНС с описанным алгоритмом эксплуатируется с 19 марта 2009 г. по настоящее время. На рис. 7, а приводится график давления на насосной станции, работающей под управлением данного алгоритма, за 48-часовой период с 27 по 29 апреля 2009 г. На графике приводятся следующие кривые: нефильтрованная (несглаженная) уставка; уставка давления, вырабатываемая алгоритмом; давление на выходе насосной станции; давление в критической точке; уставка давления, вырабатываемая алгоритмом; нормативное значение давления (по которому станция управлялась ранее); давление на выходе насосной станции.

Из графика видно, что несглаженная уставка сильно колеблется (имеет высокие зубцы), что отражает характер колебаний давления в критической точке. Фильтрованная уставка, подающаяся на контроллер управления насосами, имеет ступенчатый характер, типичный для медианной фильтрации и удобный для управления. Редко изменяющаяся ступенчатая линия – нормативное значение давления.

Ниже для удобства интерпретации приведен тот же график, на котором оставлены только две кривые – нормативного давления и давления на выходе насосной станции, управляемой рассматриваемым алгоритмом (рис. 7, б).

Из приведенных графиков видно, что под управлением данного алгоритма давление на насосной станции практически всегда держится ниже нормативного значения. Днем нормативное давление назначается так, чтобы обеспечивалось нужное давление в самые пиковые часы этого периода (утро и вечер), но не учитывает возможности опустить давление в середине дня, когда люди меньше пользуются водой. Ночное значение нормативного давления выбирается так, чтобы обеспечить давление поздно вечером и рано утром, но тоже не учитывает возможности опустить давление в середине ночи. Назначаемое алгоритмом давление учитывает все эти подробности. Оно вовремя изменяется в утренний и вечерний пе-

риоды и правильно отслеживает провалы в водопотреблении в середине дня и середине ночи, а также изменение водопотребления в периоды массовых мероприятий. Например, в Пасхальную ночь давление упало примерно в 4 часа ночи, когда люди перестали смотреть телевидение и пошли спать. В обычные дни такое уменьшение давления происходит примерно в 23:30 – 0:30.

Среднее снижение давления по сравнению с нормативным давлением за период испытаний составило примерно 1...1,5 м вод. ст. Это дает 2...3% экономии электроэнергии и снижение потерь воды на 4...5%.

Заключение

Рассмотрен новый алгоритм управления насосной станцией зоны водоснабжения по большому числу контрольных точек и приведены результаты его опытной эксплуатации.

Алгоритм опрашивает контрольные точки, на основании статистического моделирования выбирает из них одну критическую и по той же статистической модели вычисляет изменение уставки давления на насосной станции так, чтобы скорректировать давление в данной критической точке. Полученное значение уставки подвергается медианной фильтрации для исключения влияния сбоя в датчиках и сетях передачи данных, а также уменьшения числа переключений режимов насосов. Скорость реакции медианного фильтра регулируется с помощью специального статистического теста.

Результаты опытной эксплуатации показывают, что применение данного алгоритма приводит к существенной экономии электроэнергии и уменьшению потерь воды за счет снижения давления на выходе насосной станции.

Список литературы

1. Хямяляйнен М.М., Смирнова С.В., Юдин М.Ю. Комплексные гидравлические расчеты системы подачи воды С.-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 9.
2. Глуховский И.И., Каменецкий А.Б. Сокращение потерь воды в жилищном фонде // ЖКХ. 2000. №6.
3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных установках. М.: ИК "Ягорба" – "Биоинформ-сервис". 1998.
4. Аведьян Э.Д. Модифицированный алгоритм Качмажа для оценки параметров линейных объектов // Автоматика и телемеханика. 64(1978). №5.
5. Tukey J.W. Exploratory Data Analysis, Addison – Wesley, Reading, Mass. 1971.

Левин Илья Кивович – канд. техн. наук, научный сотрудник,

Крижевский Павел Владимирович – инженер-разработчик ООО "Индасофт".

Контактный телефон (495) 580-70-20.

Internet-проект для специалистов по промышленной автоматизации

www.avtprom.ru

Новости рынка промышленной автоматизации,

выставки и конференции, фирмы, полезные ссылки, специализированная литература, интервью и обзоры.

Более 5000 подписчиков на еженедельную новостную рассылку.

Закажите эффективную и адресную рекламу за разумные деньги.