

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66

УДК 62.519

Автоматическое управление группой насосных агрегатов с целью снижения затрат электроэнергии

Г. Н. Здор¹⁾, А. В. Сеницын¹⁾, О. А. Аврутин²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾УП «Минскводоканал» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Повысительные насосные станции, оснащенные группой насосных агрегатов, работающих параллельно, являются типовыми объектами системы водоснабжения городов. Повышение их энергоэффективности – актуальная задача, поскольку энергопотребление станций составляет существенную долю в структуре энергопотребления водоканала. Цель исследования – определение возможностей повышения энергоэффективности насосных станций за счет автоматического управления режимами работы группой насосных агрегатов. В статье приведены результаты исследования изменения мгновенной эффективности повысительных насосных станций в условиях переменного водопотребления. Выявлены основные причины снижения эффективности работы насосных станций. Среди них – резкое снижение эффективности регулируемых насосных агрегатов при работе на гидравлическую сеть со значительной статической составляющей напора. Определены основные факторы, влияющие на длительность нахождения регулируемого насосного агрегата в неэффективной зоне. Предложен метод управления группой насосных агрегатов с учетом мгновенной эффективности каждого из них. Проведена апробация данного метода на локальных повысительных насосных станциях. Изучено влияние отключения регулируемого насосного агрегата, находящегося в неэффективной зоне, на общую эффективность работы насосной станции и на изменение ее выходного давления непосредственно после момента отключения насоса. Исследование показало, что своевременное отключение неэффективного регулируемого насосного агрегата может снизить энергопотребление насосной станции на 8–10 % по сравнению с управлением по традиционным методам. Диапазон изменения мгновенной эффективности насосной станции может служить критерием оценки правильности подбора насосного оборудования, а также быть обоснованием для его замены.

Ключевые слова: повысительные насосные станции, водопроводная сеть, КПД насосных агрегатов, энергоэффективность, автоматическое управление, преобразователь частоты

Для цитирования: Здор, Г. Н. Автоматическое управление группой насосных агрегатов с целью снижения затрат электроэнергии / Г. Н. Здор, А. В. Сеницын, О. А. Аврутин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 1. С. 54–66. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66

Адрес для переписки

Здор Геннадий Николаевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-51
rts@bntu.by

Address for correspondence

Zdor Genadiy N.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmel'nitskogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-51
rts@bntu.by

Pump Group Automatic Control for Reducing its Energy Consumption

G. N. Zdor¹⁾, A. V. Sinitsyn¹⁾, O. A. Avrutin²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾UE “Minskvodokanal” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Booster pumping plants, equipped with a group of pump units operating in parallel, are typical objects of the city water supply system. Improving its power efficiency is a very urgent topical objective, because its power consumption is a significant part in the structure of power consumption of water utilities. The aim of the present study is to identify opportunities of improving the power efficiency of pumping stations due to the automatic control of the pump group. The paper presents results of the study of the instantaneous efficiency changes of booster pumping stations under the conditions of variable water consumption. The basic reasons of the reducing pumping plant efficiency are reported in the article. Among them, there is a sharp decline in the effectiveness of the regulated pump units, when they functioning for the hydraulic network with a significant static component of the pressure. The main factors affecting the duration of the adjustable pumping unit in inefficient area are determined. The method of controlling a group of pumping units, taking into account the instantaneous efficiency of each of them was suggested. The approbation of this method at the local booster pumping stations was fulfilled. The effects of disabling the controlled pump unit which is in the ineffective area, on the overall efficiency of the pumping station and on alteration of its output pressure immediately after the pump is switched off are studied. It was shown that the timely shutdown of an inefficiently controlled pump unit can reduce the power consumption of the pumping plant by 8–10 % as compared to the traditional control methods. The range of variation of the instantaneous efficiency of the pumping station can serve as a criterion of correct selection of pumping equipment as well it can be the rationale of the necessity for its replacement.

Keywords: booster pumping plant, water supply network, efficiency of pumping units, energy efficiency, automatic control, frequency converter

For citation: Zdor G. N., Sinitsyn A. V., Avrutin O. A. (2017) Pump Group Automatic Control for Reducing its Energy Consumption. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (1), 54–66. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66 (in Russian)

Введение

Повысительные насосные станции используются для повышения давления воды в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения. Насосные агрегаты берут воду из сети низкого давления и подают ее в сеть высокого давления [1]. Величина требуемого давления на выходе станции зависит от этажности обслуживаемой жилой застройки и определяется исходя из СНБ 4.01.01–03 [2]. Расход воды на насосной станции определяется режимом водопотребления, а также величиной потерь и утечек воды в водопроводной сети [3].

Режимы водопотребления, как правило, являются переменными и имеют ярко выраженные колебания в течение суток, недель, сезонов. На них оказывает влияние ряд факторов: погодные (температура и величина осадков), социальные (количество населения, структура промышленности) и др. [4]. Это требует регулирования производительности установленного на станции насосного оборудования. При этом существуют различные компоновочные схемы установки насосного оборудования [5] с использованием:

- одного насосного агрегата, производительность которого регулируется дросселированием или изменением частоты вращения;
- системы с группой параллельно работающих насосных агрегатов с каскадным включением. Часть из группы насосов может быть с постоянной производительностью, а часть – с регулируемой.

Для снижения энергопотребления насосных станций необходимо минимизировать внешние потери энергии в водопроводной сети. Они связаны с поддержанием завышенного давления на выходе насосной станции [6–8]. После определения необходимого и достаточного уровня выходного давления предлагается с помощью алгоритмов управления вывести насосы в наиболее оптимальные рабочие режимы.

Цель исследований – разработка метода управления группой параллельно работающих одинаковых насосных агрегатов, позволяющего минимизировать затраты электроэнергии на поддержание заданного давления в водопроводной сети.

Методология и методы исследования

Исследования проводили на повысительных насосных станциях, оборудованных группой из пяти параллельно работающих насосных агрегатов, два из которых – регулируемые. Эти насосные станции предназначены для подачи воды в многоэтажную жилую застройку. При такой схеме построения насосной станции достигается очень большой диапазон регулирования ее производительности, однако взаимное влияние насосных агрегатов в этом случае играет значительную роль. КПД совместной работы насосных агрегатов изменяется в весьма широких пределах.

Каждая из этих насосных станций оснащена типовой системой управления на базе программируемого логического контроллера. Производительность насосных агрегатов регулируется с помощью преобразователей частоты. Система управления оснащена средствами передачи данных по сети GSM. Вся информация о режимах работы насосной станции поступает на автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера системы водоснабжения. На АРМ диспетчера одновременно поступает информация с большого числа станций. Она обрабатывается и сохраняется в общую базу данных. Схема системы управления насосной станцией представлена на рис. 1.

Система управления (СУ), обозначенная на рис. 1 цифрой 1, работает в режиме поддержания заданного выходного давления по датчику 4. Исходя из величины входного давления (датчик 3) на станции, текущего режима водопотребления и величины заданного давления, система управления определяет необходимый состав работающих насосных агрегатов 2. Традиционно СУ настраивают таким образом, чтобы обеспечить наиболее точное поддержание заданного давления. Система управления оснащена устройством сбора и передачи данных, которое передает всю информацию о режимах работы насосной станции на АРМ диспетчера. Анализ режимов

проводили на основании собранных на АРМ диспетчера данных о работе насосной станции.

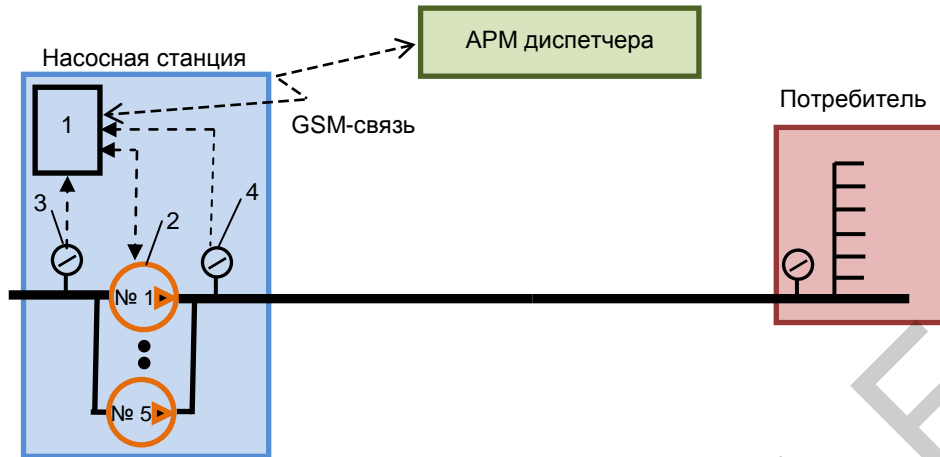


Рис. 1. Структурная схема работы насосной станции
Fig. 1. Block diagram of operation of the pumping plant

Насосная станция работает следующим образом: первоначально в системе работает один регулируемый насос, в случае, когда его производительности не хватает и давление продолжает падать, СУ переключает насос на работу от сети, а другой насос становится регулируемым. Насосы, запитанные от сети, работают в стабильном режиме и создают основную долю расхода. Регулируемый насос постоянно подстраивается под изменяющееся водопотребление, в результате чего его режим работы – переменный. При этом включение и выключение дополнительных насосных агрегатов происходит исходя из разницы между фактическим и заданным давлениями, а также с учетом текущей частоты вращения рабочих колес регулируемых насосов. Обычно электрическая схема системы управления позволяет любой из насосов включить от преобразователя частоты, т. е. сделать его регулируемым.

Данный метод обеспечивает надежное поддержание давления, однако при этом он имеет ряд недостатков:

- система управления не контролирует эффективность использования электроэнергии на поддержание заданного давления, а это приводит к росту энергопотребления насосной станцией;
- система не контролирует, в каких технологических режимах работают регулируемые насосные агрегаты. В результате регулируемые насосные агрегаты могут длительное время работать вне границ паспортной рабочей области. Это приводит к повышению нагрузок на детали насосного агрегата (рабочие колеса, уплотнители, подшипники и т. д.) и снижению срока их эксплуатации.

Поэтому в рамках исследования создан метод управления, ориентированный не только на поддержание заданного давления, но и на контроль эффективности работы насосной станции. В качестве критерия эффектив-

ности работы насосной станции использовали ее гидравлический КПД, который определяли по формуле [8]

$$\eta_{\text{гидр}} = \frac{P_{\text{гидр}}}{P_{\text{элект}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{гидр}}$ – гидравлическая мощность, развиваемая насосной станцией, т. е. мощность, передаваемая жидкости насосом; $P_{\text{элект}}$ – суммарная электрическая мощность, потребляемая приводами регулируемых насосных агрегатов и приводами насосов, работающих от сети.

Электрическая мощность является измеряемым параметром, гидравлическая (полезная мощность) определяется формулой

$$P_{\text{гидр}} = Q\rho gH, \quad (2)$$

где Q – подача насосной станции, м³/с; ρ – плотность жидкости кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – полный напор насоса, м.

Полный напор насоса

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}, \quad (3)$$

где Z – высота центра поперечного сечения трубопровода над эталонной плоскостью; p – манометрическое давление, отнесенное к центру поперечного сечения; u – средняя осевая скорость, определяемая отношением объемной подачи к площади поперечного сечения трубы.

Поскольку сечение трубопроводов на повысительных насосных станциях на входе и выходе насосного агрегата одинаковое, динамической составляющей напора можно пренебречь. Предлагается непрерывно оценивать эффективность работы насосных агрегатов и производить их отключение с учетом динамики изменения эффективности.

Организация исследования

По предложенной выше методике система управления была переведена в режим контроля эффективности работы насосных агрегатов. Исследования проводили на ряде повысительных насосных станций УП «Минскводоканал». Полученные данные передавались по протоколу МЭК 60870-5-104 [9] на АРМ диспетчера, где анализировались в виде графиков. Типовой график КПД повысительной насосной станции, состоящей из пяти насосных агрегатов Wilo Helix V1603, представлен на рис. 2. Данные на графике приведены за одну неделю. Изменение КПД носит повторяющийся по суткам характер.

Красной линией на рис. 2 показан номинальный КПД насосной станции – 55 %. Мгновенный КПД станции изменяется от 35 до 55 %. При этом номинальных значений КПД достигал лишь в часы максимального разбора

воды, в остальное время КПД существенно меньше номинальных значений. Особенно заметно КПД снижается в ночное время.



Рис. 2. График изменения коэффициента полезного действия повысительной насосной станции

Fig. 2. A graph of the alteration of efficiency of the booster pumping plant

Определим причины снижения КПД насоса в общем виде, для этого проанализируем режимы его работы при изменении частоты вращения рабочего колеса насоса. Воспользуемся следующей методикой [10]. Изменение напора и мощности при регулировании частоты вращения рабочего колеса для центробежных насосных агрегатов описывается уравнениями, приведенными ниже.

Напорная характеристика насоса

$$H = A_2 n^2 + B_2 Q n + C_2 Q^2, \quad (4)$$

где A_2 , B_2 , C_2 – коэффициенты, определяемые характеристиками насосного агрегата; n – частота вращения рабочего колеса; Q – расход, развиваемый насосным агрегатом.

Определим полезную мощность насосного агрегата, подставив (4) в (2)

$$P_{\text{гидр}} = \rho g (A_2 n^2 Q + B_2 Q^2 n + C_2 Q^3). \quad (5)$$

При этом на затрачиваемую насосом механическую мощность при изменении скорости вращения существенное влияние оказывают циркуляционные и механические потери в насосе. В общем виде уравнение механической мощности

$$P_{\text{мех}} = A n^2 Q - B Q^2 n + D n^3, \quad (6)$$

где A , B , D – коэффициенты, определяемые характеристиками насосного агрегата.

Для регулируемого насоса потребляемая энергия будет определяться формулой

$$P_{\text{элект}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пч}}}, \quad (7)$$

где $\eta_{\text{дв}}$, $\eta_{\text{пч}}$ – КПД электродвигателя и преобразователя частоты.

Подставив уравнения (5)–(7) в (1), получим аналитическую зависимость изменения КПД насоса от частоты вращения

$$\eta_{\text{гидр}} = \frac{(\rho g (A_2 n^2 Q + B_2 Q^2 n + C_2 Q^3)) \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пч}}}{A n^2 Q - B Q^2 n + D n^3}. \quad (8)$$

Анализ уравнения (8) показывает, что характеристика КПД имеет один максимум, который и определяет зону оптимального использования насоса.

Напорные характеристики (уравнение (4)) и графики полного КПД насосного агрегата Wilo Helix V1603 (уравнение (8)) при различных частотах вращения его рабочего колеса показаны на рис. 3. График КПД насосного агрегата приведен с учетом КПД электродвигателя и КПД преобразователя частоты. Графики параметров для равной частоты вращения выполнены с одинаковым стилем линий.

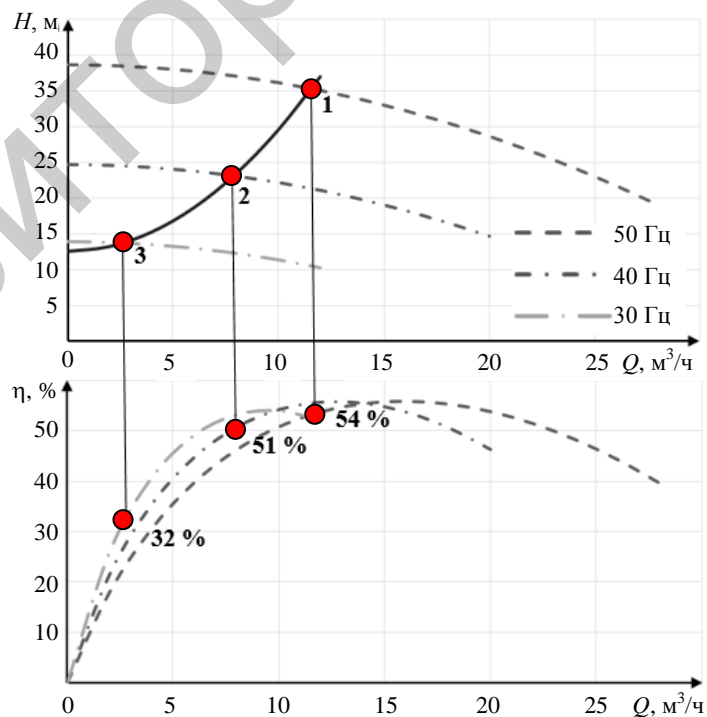


Рис. 3. Изменение коэффициента полезного действия регулируемого насосного агрегата

Fig. 3. The alteration of the efficiency of the adjustable pumping unit

Графики демонстрируют частоты вращения: 50 Гц (100 % номинальной скорости), 40 Гц (80 % номинальной скорости), 30 Гц (60 % номинальной скорости). Также на рис. 3 показана характеристика водопроводной сети. Особенностью водопроводной сети для повысительной насосной станции является значительная высота подъема воды. Такой вид водопроводной сети называется сетью с большой статической составляющей напора. В данной сети при снижении давления расход уменьшается значительно быстрее, чем в сети без статической составляющей.

Рабочие точки насоса будут определяться пересечением характеристики водопроводной сети и напорных характеристик насоса. При изменении частоты вращения насос переходит из рабочей точки 1 (с КПД 54 %) в рабочие точки 2 (с КПД 51 %) и 3 (с КПД 32 %). Таким образом, КПД насосного агрегата будет низким в случае, когда он длительное время работает левее своей рабочей зоны: с малым расходом и большим напором. Анализ результатов замеров показал, что насос может оказаться в этой зоне, если:

- он работает один на сеть со значительной статической составляющей, и требуемый напор превышает его номинальный напор;
- одновременно на станции работают на общий водовод несколько насосных агрегатов, часть из которых работает напрямую от сети, а часть регулируется с помощью преобразователей частоты. В результате взаимного влияния насосных агрегатов регулируемые насосы могут оказаться в крайне неэффективных режимах работы. Из-за этого часть насосов в группе может работать с очень низким КПД, что приводит к общему снижению КПД насосной станции.

Влияние регулируемых насосов, находящихся в неэффективном режиме, на выходное давление станции незначительно. Для исключения неэффективной работы регулируемых насосных агрегатов предлагается определять мгновенную эффективность каждого из них, а затем отключать насосный агрегат в случае снижения его эффективности ниже заданного порога. Мгновенная эффективность оценивается исходя из мощности потребляемой каждым из насосов, а также из его развиваемых напора и расхода. При этом расход оценивается исходя из паспортной напорной характеристики насоса и текущей частоты вращения его рабочего колеса.

Покажем, как будут изменяться КПД насосной станции и ее выходное давление, если оперативно выключить неэффективный насосный агрегат (рис. 4).

В нижней части рис. 4 горизонтальными полосами показаны периоды работы насосных агрегатов, в верхней части отображаются графики основных параметров работы насосной станции. Всего за сутки отключение насосов происходило три раза, в эти моменты проведены вертикальные прямые, фиксирующие параметры графиков. При этом ни при одном из отключений выходное давление станции не снижалось.

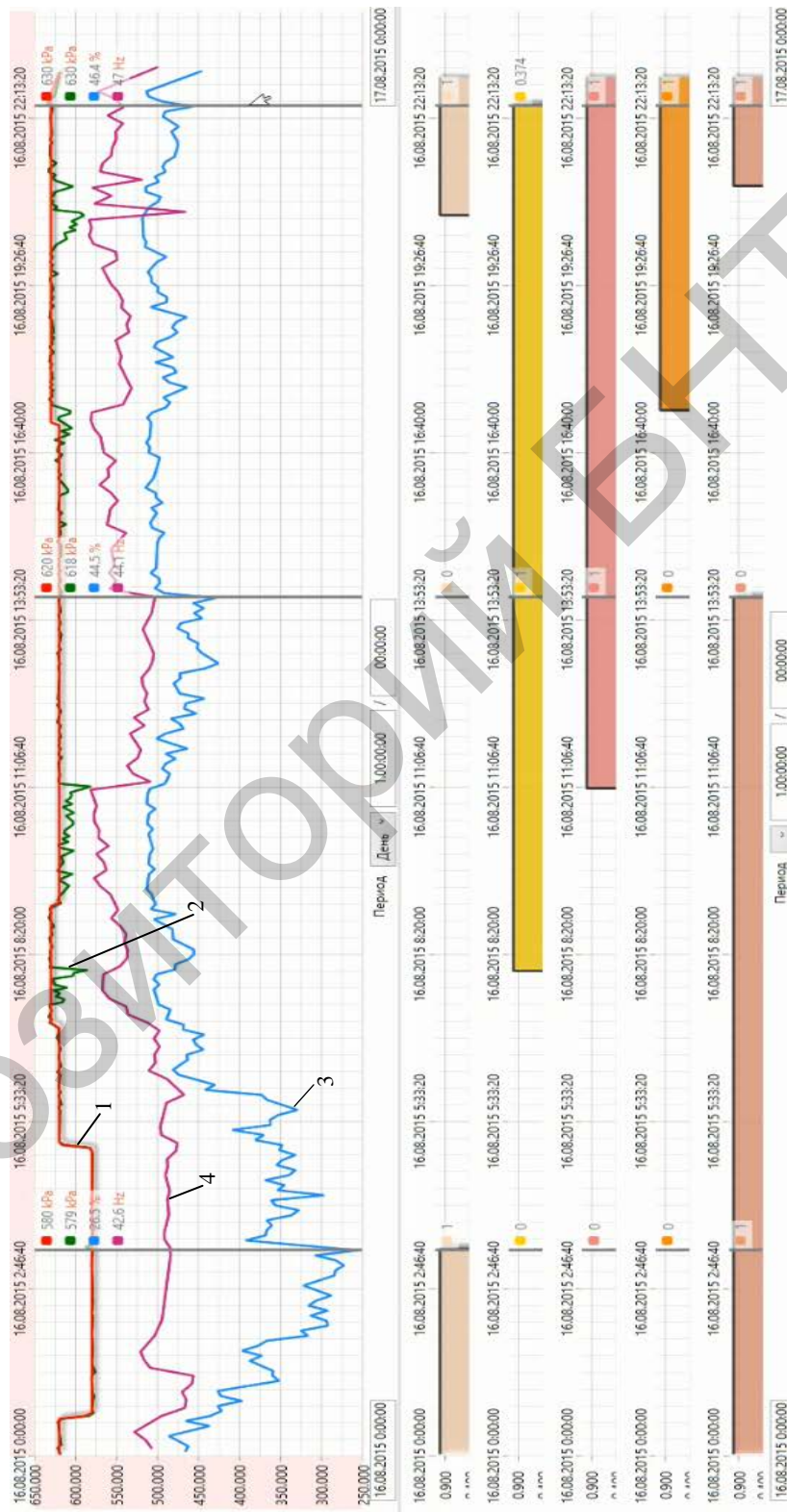


Рис. 4. Изменение коэффициента полезного действия насосной станции при отключении неэффективного насосного агрегата:

1 – заданное выходное давление; 2 – фактическое выходное давление; 3 – КПД насосной станции; 4 – частота регулируемого насоса

Fig. 4. The alteration of the efficiency of the pumping plant, disabling an ineffective pumping unit:

1 – the specified outlet pressure; 2 – the actual outlet pressure; 3 – efficiency of the pumping plant; 4 – the frequency of the regulated pump

Проанализируем моменты отключения насосов.

1. При переходе с двух насосов на один (рис. 4, крайняя левая линия) КПД станции скачкообразно изменился с 27,0 до 36,6 %, частота вращения рабочего колеса насоса составила 42,6 Гц.

2. При переходе с трех насосов на два (средняя линия) КПД станции скачкообразно изменился 44,4 до 50,2 %, частота вращения рабочего колеса насоса составила 44,1 Гц.

3. При переходе с пяти насосов на четыре (крайняя правая линия) КПД станции скачкообразно изменился 46,4 до 49,6 %, частота вращения рабочего колеса насоса составила 47 Гц.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- частота вращения рабочего колеса насоса, при которой происходило отключение насосных агрегатов, является величиной непостоянной и может изменяться в достаточно широких пределах;
- при большом количестве параллельно работающих насосных агрегатов эффективность регулируемого насоса может стремительно падать даже при снижении частоты его вращения на 5 %;
- чем больше работает насосов параллельно, тем меньше влияние отключения одного регулируемого насоса на общий КПД насосной станции.

Результаты исследования и их обсуждение

Традиционные алгоритмы управления насосными станциями, основанные на фиксированных частотах вращения рабочего колеса насоса, при которых происходит отключение дополнительных насосных агрегатов, не могут обеспечить исключения длительных неэффективных режимов работы насосов. Поэтому предлагается при управлении их работой производить непрерывную оценку величины КПД каждого из насосов и выполнять включение/выключение насосных агрегатов с учетом их КПД.

Исследование показало, что длительность нахождения насосных агрегатов, работающих на станции, в неэффективных режимах может изменяться с течением времени в очень широких пределах. Она зависит от многих факторов:

- изменения характеристики водопроводной сети;
- изменения режима водопотребления (расхода воды на станции);
- состава группы работающих насосных агрегатов и их характеристик и т. д.

Типовая циклограмма работы насосной станции представлена на рис. 5. Если до оптимизации на станции работали два или три насоса, то после проведения оптимизации часть времени работал лишь один насос. А общее время работы двух и трех насосов изменилось значительно. На рис. 5 выделены временные зоны, в которых работа регулируемого насосного агрегата была неэффективна. Общая длительность неэффективной работы насосного агрегата составила 5 ч/сут.

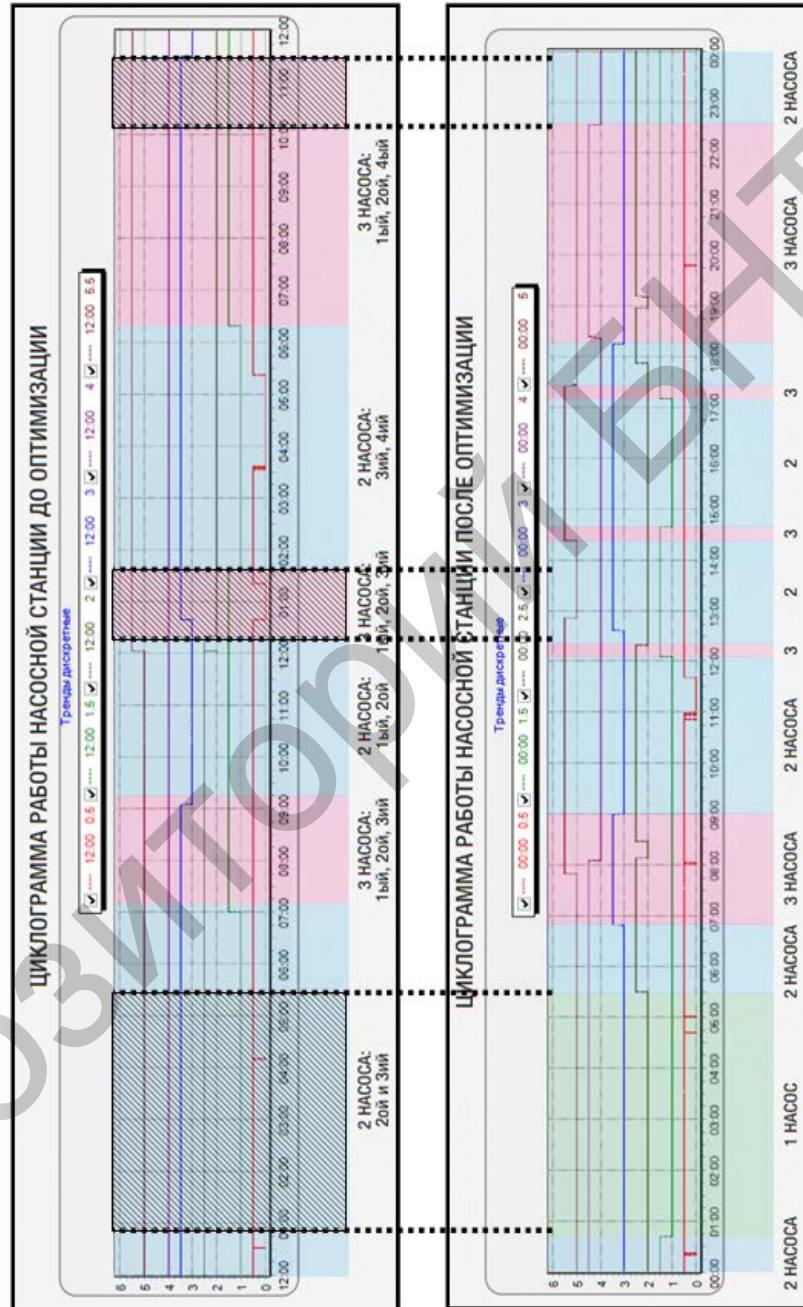


Рис. 5. Циклограмма работы насосной станции

Fig. 5. Sequence diagram of the operation of the pumping plant

Доля длительности работы определенного количества насосов от общего рабочего времени станции приведена в табл. 1.

Таблица 1

Длительность работы разного числа насосов за сутки
The duration of the functioning of a different number of pumps per day

Количество работающих насосов	Длительность работы, ч/сут	
	с использованием традиционных алгоритмов	при работе с учетом КПД насоса
1	–	4,8
2	16	11,6
3	8	7,6

К недостаткам предлагаемого метода можно отнести необходимость использования паспортных характеристик насосных агрегатов в расчетах. Это снижает точность метода при работе с изношенными насосными агрегатами.

ВЫВОДЫ

1. КПД работы повысительной насосной станции, оснащенной группой насосных агрегатов, изменяется в зависимости от режима водопотребления и может быть значительно меньше паспортных значений. Это вызвано тем, что регулируемые насосные агрегаты выходят за пределы своей рабочей области и работают с крайне малыми расходами.

2. В ходе исследования выявлено, что если насосный агрегат работает с низким КПД, его влияние на уровень выходного давления станции минимально. При его отключении нагрузка перераспределяется между оставшимися насосными агрегатами и существенного падения давления на выходе насосной станции не происходит.

3. При исключении неэффективных режимов работы насосных агрегатов с использованием автоматизированных систем управления общее энергопотребление насосной станции снижается в среднем на 8–10 % (по результатам исследований на локальных повысительных насосных станциях в г. Минске). В процессе управления можно производить анализ правильности подбора насосных агрегатов под фактические режимы работы насосной станции, а также оценивать целесообразность замены насосных агрегатов на новые.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции. 2-е изд., перераб. и доп. / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. М.: Стройиздат, 1986. 320 с.
2. Строительные нормы Республики Беларусь. Водоснабжение питьевое. Общие положения и требования: СНБ 4.01.01–03. Минск: Минстройархитектуры, 2003. 22 с.
3. Лезнов, Б. С. Экономия электроэнергии в насосных установках / Б. С. Лезнов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.

4. Петросов, В. А. Устойчивость водоснабжения / В. А. Петросов. Харьков: Издательский дом «Фактор», 2007. 360 с.
5. KSB Know-How. Volume 5. Planning Information for Pressure Booster Systems [Electronic resource]. Mode of Access: <https://www.ksb.com/blob/18190/7c8b470ca972d3093491b5219d56cafd/band-5-en-planungshinweise-druckerhoehungsanlagen-data.pdf>. Date of Access: 03.07.2016.
6. Здор, Г. Н. Задачи оптимального управления на локальных повысительных насосных станциях / Г. Н. Здор, А. В. Синицын // Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы Республ. науч.-практ. семинара. Минск: Бизнесофсет, 2014. С. 127.
7. Здор, Г. Н. Управление режимами работы повысительных насосных станций в функции реального давления у потребителя / Г. Н. Здор, А. В. Синицын, Р. С. Кадемик // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы III междунар. науч.-практ. конф. / редкол.: Ф. И. Пантелеенко [и др.]. Минск: Бизнесофсет, 2015. С. 150.
8. Насосы динамические. Методы испытаний: ГОСТ 6134–2007 (ИСО 9906–1999). Введ. 01.01.2012. М.: Стандартиформ, 2004. 102 с.
9. Устройства и системы телемеханики. Ч. 5: Протоколы передачи. Разд. 104. Доступ к сети для ГОСТ Р МЭК 870-5-101 с использованием стандартных транспортных профилей: ГОСТ Р МЭК 60870-5-104–2004. Введ. 01.07.2005. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 45 с.
10. Онищенко, Г. Б. Электропривод турбомеханизмов / Г. Б. Онищенко, М. Г. Юнько. М.: Энергия, 1972. 240 с.

Поступила 08.08.2016 Подписана в печать 17.10.2016 Опубликовано онлайн 31.01.2017

REFERENCES

1. Karelin V. Ya., Minaev A. V. (1986) *Pumps and Pump Station*. 2nd ed. Moscow, Stroiizdat Publ. 320 (in Russian).
2. Construction Norms of the Republic of Belarus 4.01.01–03 (2003) Drinking Water-Supply. General Provisions and Requirements. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. 22 (in Russian).
3. Leznov B. S. (1991) *Electricity Saving in the Pump Installations*. Moscow, Energoatomizdat. 144 (in Russian).
4. Petrosov V. A. (2007) *Sustainability of Water Supply*. Kharkov, Factor Publ. 360 (in Russian).
5. KSB Know-How. Volume 5. Planning Information for Pressure Booster Systems. Available at: <https://www.ksb.com/blob/18190/7c8b470ca972d3093491b5219d56cafd/band-5-en-planungshinweise-druckerhoehungsanlagen-data.pdf>. (Accessed 3 July 2016).
6. Zdor G. N., Sinitsyn A. V. (2014) Objectives of the Optimal Control in the Local Boosting Pump Stations. *Avtomatizatsiia i Robotizatsiia Protseessov i Proizvodstv: Mater. Respubl. Nauch.-Prakt. Sem.* [Automation and Robotics Processes and Production. Materials of the Republic Scientific-and-Practical Seminar] Minsk, Biznesofset Publ. 127 (in Russian).
7. Zdor G. N., Sinitsyn A. V., Kademik R. S. (2015) Operating Mode Control of the Booster Pump Station as a Function of the Actual Pressure at the Side of the Customer. *Innovatsionnye Tekhnologii, Avtomatizatsiia i Mekhatronika v Mashino- i Priborostroenii: Mater. III Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Innovation Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical and Instrument Engineering: Proceeding of the 3rd International Scientific-and-Practical Conference]. Minsk, Biznesofset Publ. 150 (in Russian).
8. State Standard 6134–2007 (ISO 9906–1999) (2004). Dynamic Pumps. Test Methods. Minsk, Standartinform. 102 (in Russian).
9. State Standard R IEC 60870-5-104–2004 (2004) Telecontrol Equipment and Systems. Part 5. Transmission Protocols. Section 104. Network Access for IEC 60870-5-101 Using Standard Transport Profiles. Moscow, Standard Publ. House. 45 (in Russian).
10. Onishenko G. B., Yunko M. G. (1972) *The Electric Drive of Turbo Mechanism*. Moscow, Energya. 240 (in Russian).

Received: 8 August 2016

Accepted: 17 October 2016

Published online: 31 January 2017