



Способы повышения эффективности работы много- насосных станций с использованием средств автомати- ческого контроля и управления

Рецензия эксперта на статью получена
27.03.2020 [Expert review on the article
received on Mart 27, 2020].

Как указывается в работах [5, 11, 12], большинство станций управления насосными агрегатами (НА) имеют следующий алгоритм работы: с помощью частотного электропривода регулируется частота вращения вала электродвигателя насоса, поддерживая необходимое давление на выходе насосной установки [6, 7].

Далее, основываясь на текущей частоте вращения насосного агрегата, производится дальнейшее формирование команд управления насосной станцией:

- подключение дополнительного насосного агрегата;
- отключение дополнительного насосного агрегата;
- переход в режим «сна».

Учитывая только значение текущего давления на выходе насосной установки и не беря во внимание дальнейшее водопотребление, невозможно определить рабочую точку насосной установки в последующие моменты времени, что непосредственно влияет на режим работы насосной установки и на её коэффициент полезного действия (КПД).

Работа по текущему алгоритму работы может привести к перерасходу электрической энергии, к возникновению дополнительных гидравлических ударов в системе водоснабжения и т.д.

Поэтому необходимо разработать адаптивные алгоритмы управления насосными станциями, которые могут заранее перестраивать работу системы с учётом спрогнозированного водопотребления.

На рис. 1 показан процесс нахождения оптимального режима работы насосной установки.

То есть для того, чтобы вывести насосную установку на режим работы с более высоким коэффициентом полезного действия (далее оптимальный режим работы), необходимо:

1. Определить текущий расход в каждый момент времени на насосной установке.
2. Определить значения текущего расхода за прошлый промежуток времени, провести прогнозирование водопотребления на необходимый промежуток времени в будущем.
3. Для спрогнозированного водопотребления определить рабочую точку насосной установки для различных комбинаций работы насосных агрегатов, входящих в состав данной насосной установки.
4. На основе проверенных комбинаций работы насосных агрегатов выбрать конкретный оптимальный режим работы насосной установки.

Далее рассмотрим каждый пункт более подробно.

УДК 628.12. Научная специальность: 05.23.04.

Способы повышения эффективности работы многонасосных станций с использованием средств автоматического контроля и управления

М. Л. Барбул, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург); **В. М. Васильев**, д.т.н., профессор, СПбГАСУ; **Ю. Т. Котов**, д.т.н., профессор, Мытищинский филиал Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ, г. Мытищи); **С. В. Староверов**, к.т.н., доцент, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ, г. Белгород)

В статье описан алгоритм управления многонасосными станциями повышения давления, основанный на прогнозировании текущего водопотребления населением. Прогнозирование проводится с использованием авторегрессионного метода анализа и основано на предположении, что значение прогнозируемого процесса линейно зависит от некоторого количества предыдущих значений того же процесса. Представлен алгоритм определения оптимального режима работы насосной установки повышения давления.

Ключевые слова: насосная станция, водопотребление, прогнозирование, регрессия, алгоритм управления.

UDC 628.12. Number of scientific specialty: 05.23.04.

Methods for improving the efficiency of multipump stations using automatic monitoring and control

M. L. Barbul, postgraduate student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); **V. M. Vasiliev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, SPbGASU; **Y. T. Kotov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch); **S. V. Staroverov**, PhD, Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

The article describes the control algorithm of multi-pump pressure boosting stations based on predicting the current water consumption by the population. Forecasting is carried out using the autoregressive analysis method and is based on the assumption that the value of the predicted process linearly depends on a number of previous values of the same process. An algorithm for determining the optimal operating mode of a pressure boosting pumping unit is presented.

Key words: pumping station, water consumption, forecasting, regression, control algorithm.



Рис. 1. Алгоритм выбора оптимального режима работы насосной установки

Определение текущего расхода на насосной установке

Сложность определения текущего расхода на насосном агрегате заключается в том, что изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведёт к изменению всех его рабочих параметров. При этом расход (подача) и перепад (напор) насосного агрегата зависят не только от частоты вращения, но также от статической составляющей напора или противодавления $H_{\text{п}}$, обусловленной работой других насосных агрегатов, и напора $H_{\text{ф}}$, создаваемого при нулевой подаче (фиктивный напор) [9,10].

В этом случае зависимость расхода (подачи) и перепада (напора) насосного агрегата от частоты вращения принимает следующий вид:

$$Q = Q_6 \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n_{\text{ном}}}\right)^2 - \frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}}}{1 - \frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}}}}, \quad (1)$$

$$H = H_{\text{п}} + \left(H_6 + H_{\text{п}}\right) \frac{\left(\frac{n}{n_{\text{ном}}}\right)^2 - \frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}}}{1 - \frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}}}, \quad (2)$$

где $H_{\text{п}}$ — статическая составляющая напора или противодавление, обусловленное работой других НА, м; $H_{\text{ф}}$ — напор, создаваемый при нулевой подаче (фиктивный напор), м; n — текущая частота вращения насосного агрегата, мин⁻¹; $n_{\text{ном}}$ — номинальная частота вращения насосного агрегата, мин⁻¹; Q_6 — подача (расход), создаваемый НА при номинальной частоте вращения, м³/с; H_6 — перепад (напор), создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения, м; Q — подача (расход), создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения, м³/с; H — перепад (напор), создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения, м.

Методика определения фиктивного напора $H_{\text{ф}}$ и противодавления $H_{\text{п}}$ подробно описана в [2].

Прогнозирование водопотребления населением

На основании проведённых исследований водопотребления населением были выявлены данные закономерности [3]:

1. Форма графика суточного водопотребления изменяется циклично, то есть водопотребление одного дня недели повторяет водопотребление другого дня недели. Особенно это видно для понедельника, вторника, среды, четверга и пятницы.
2. Пики минимального и максимального водопотребления приходятся примерно на одно и то же время.

Изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведёт к изменению всех его рабочих параметров. В этом заключается сложность определения текущего расхода на насосном агрегате



Поскольку водопотребление меняется циклично, то возможно произвести прогнозирование водопотребления на последующие дни недели.

В данной работе применяется метод авторегрессионной модели прогнозирования и скользящего среднего, который основан на предположении о том, что значение процесса $Z(t)$ линейно зависит от некоторого количества предыдущих значений того же процесса $Z(t-1)$, ..., $Z(t-p)$ [1] и записывается в следующем виде:

$$Z(t) = C + \varphi_1 Z(t-1) + \varphi_2 Z(t-2) + \dots + \varphi_p Z(t-p) + \frac{1}{q} [Z(t-1) + Z(t-2) + \dots + Z(t-q)] + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где C — вещественная константа; p — порядок авторегрессии; φ_p — коэффициенты регрессии; $Z(t-p)$ и $Z(t-q)$ — предыдущие значения процесса; q — порядок скользящего среднего; $Z(t)$ — прогнозируемый процесс; ε_t — ошибка прогнозирования.

В нашем случае для задачи прогнозирования водопотребления мы можем получить систему уравнений [3]:

$$\begin{cases} Q(t+1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-1-p); \\ Q(t) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-p); \\ Q(t-1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-1-p); \\ \dots \\ Q(t-k) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-k-p), \end{cases} \quad (4)$$

где $Q(t+1)$ — прогнозируемое водопотребление (расход), м³/с; $Q(t)$ — водопотребление за прошлые промежутки времени (расход), м³/с; p — порядок авторегрессии; φ_p — коэффициенты регрессии; k — общее число уравнений в данной системе уравнений.

Для этой системы уравнений мы знаем все значения водопотребления $Q(t)$, поэтому, используя метод наименьших квадратов, можно легко определить коэффициенты φ_p и далее определить прогнозируемое водопотребление $Q(t+1)$.

На основании проведённых вычислений и измерений водопотребления было выявлено, что оптимальное значение порядка авторегрессии $p = 12$ (для случая определения водопотребления каждый час), а необходимое число уравнений в системе уравнений (4) $k = 72$. Для сглаживания пиков водопотребления, которые спрогнозировать достаточно сложно, дополняем нашу модель авторегрессии моделью скользящего среднего порядка $q = 2$. При этом ошибка прогнозирования суточного водопотребления не превышает 7%.

Эффективность работы предложенного способа прогнозирования водопотребления на основе авторегрессионной модели с использованием модели скользящего среднего будет зависеть от того, насколько полученная функция водопотребления, выражающая неоднозначность значений, согласуются с реальной жизненной ситуацией. Более того, эта ситуация постоянно изменяется при смене времени года, при появлении новых потребителей, при изменении параметров гидравлической сети и т.д. Поэтому данная система должна быть наделена способностью адаптации.

Процесс адаптации водопотребления показан на рис. 2.

Прогнозирование будних дней недели строится на основании значений водопотребления последних трёх будних

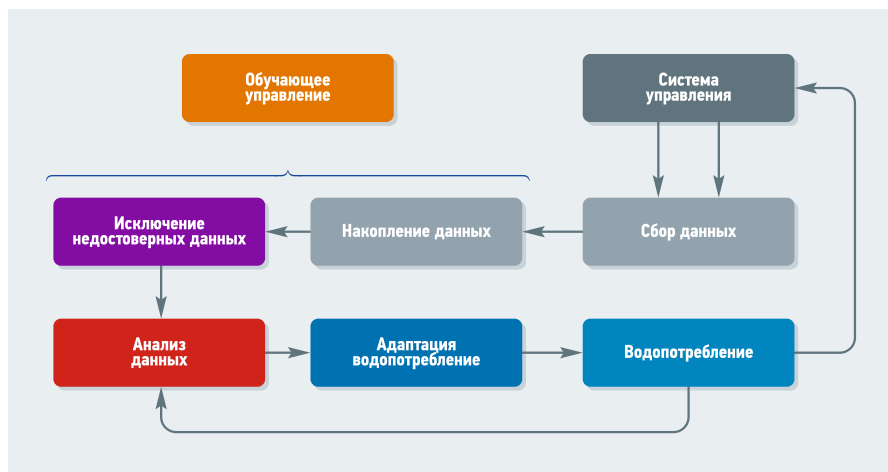


Рис. 2. Адаптация водопотребления

дней недели с помощью авторегрессионной модели прогнозирования с использованием модели скользящего среднего. В случае отклонения среднеквадратичного отклонения реального значения от спрогнозированного более чем на 7%, для дальнейшего прогнозирования выбирается спрогнозированное значение (реальное значение считается ошибочным и эти данные исключаются). При повторении ситуации в следующие дни недели — в расчёт берутся реальные значения (идёт смена режима водопотребления, происходит процесс адаптации).

Для выходных и праздничных дней прогнозирования водопотребления ведётся аналогично будним дням недели с учётом, что в первый выходной день в максимальное время водоразбора значение водопотребления принимается, как среднее значение максимальных водопотреблений в первой половине дня преды-

дущих трёх дней недели. Прогнозирование последующих выходных дней ведётся на основании фактических данных предыдущих выходных дней.

Определение рабочей точки насосной установки для различных комбинаций работы насосных агрегатов

Рабочую точку насосного агрегата определяют следующие три параметра.

I. Расход $Q_{НА}$, который должен создать насосный агрегат в момент времени t .

В нашем случае расходом является спрогнозированное водопотребление (определено в предыдущем пункте) в момент времени $Q(t+1)$.

II. Перепад давления $p_{НА}$, которое должен создать насосный агрегат в момент времени t .

Давление на выходе многонасосной станции $p_{ВЫХ}$ можно найти из уравнения:

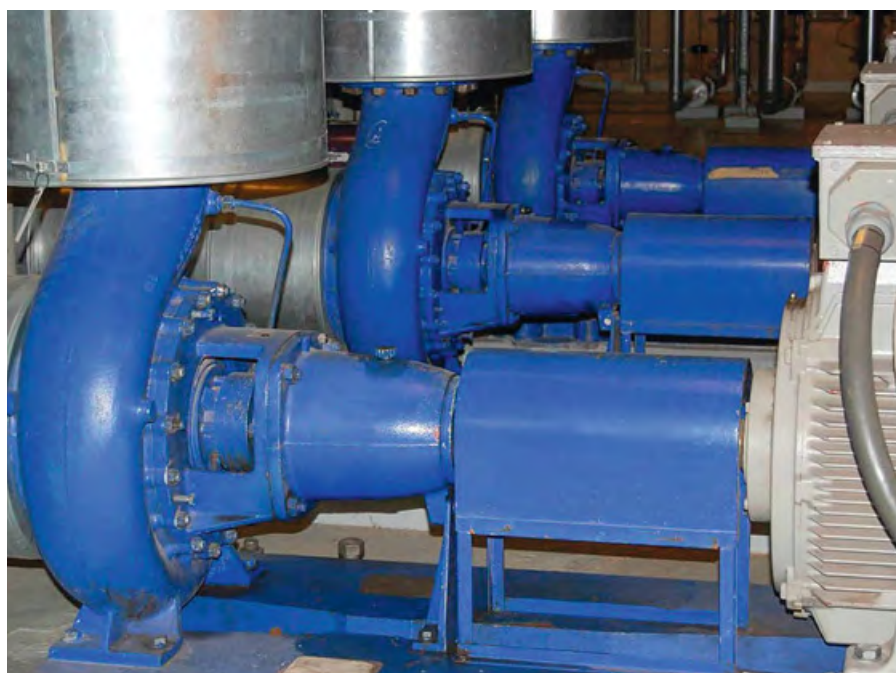
$$\rho g h_A + p_{ВХ} + p_{НА} = p_{ВЫХ} + \rho g h_C + f(Q), \quad (5.1)$$

где $p_{ВЫХ}$ — давление перед насосным агрегатом, МПа; $p_{НА}$ — перепад давлений, который создаёт насосный агрегат, МПа; $h_A = h_C$ — высота над уровнем моря точек входного и выходного патрубка насосной установки, м; $f(Q)$ — гидравлические потери, МПа; ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

Поскольку датчик давления в контролируемой точке находится на выходе насосной станции, то значение гидравлических потерь мало и ими можно пренебречь. В итоге уравнение примет вид:

$$p_{ВЫХ} = p_{ВХ} + p_{НА}, \quad (5.2)$$

то есть давление на выходе станции зависит только от давления воды на входе и перепада давления, создаваемого насосным агрегатом.





Поскольку давление на выходе насосной станции поддерживается постоянным, то перепад давления на насосном агрегате в каждый момент времени из уравнения (5.2) можно определить как:

$$P_{НА} = P_{ВЫХ} - P_{ВХ}. \quad (5.3)$$

Если предположить, что давление воды на входе в насосную станцию будет постоянным, то по уравнению (5.3) можно определить необходимый перепад, который должен создавать насосный агрегат.

III. Частота вращения насосного агрегата для обеспечения расхода $Q_{НА}$ и перепада давлений $P_{НА}$ в момент времени t . В работах [9,10] показано, что превышение напора является одной из причин возникновения потерь электроэнергии в насосных установках. Следовательно, целесообразно поддерживать такую частоту вращения насоса, при которой геометрическое место рабочих точек насосного агрегата лежало бы на рабочей характеристике трубопровода. В этом случае оптимальная частота вращения насосного агрегата имеет вид [9]:

$$n = n_{НОМ} \sqrt{\frac{H_{П}}{H_{Ф}} + \left(1 - \frac{H_{П}}{H_{Ф}}\right) \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^2}, \quad (6)$$

где $H_{П}$ — статическая составляющая напора или противодействие, обусловленное работой других насосных агрегатов, м; $H_{Ф}$ — напор, создаваемый при нулевой подаче (фиктивный напор), м; n — частота вращения насосного агрегата, мин⁻¹; $n_{НОМ}$ — номинальная частота вращения насосного агрегата, мин⁻¹; Q_0 — наибольшая для данной системы подача насоса, м³/с; Q — необходимая подача насоса, м³/с.

Работа насоса с частотой вращения, определяемое уравнением (6), обеспечивает поддержание минимальных значений напора на выходе насосной установ-

ки во всём диапазоне изменения её подачи. Благодаря ликвидации превышения напора энергопотребление насоса уменьшается до возможного минимума [9].

Выбор оптимального режима работы насосной установки

Для каждой рабочей точки прогнозируемого водопотребления через равные промежутки времени (в нашем случае каждый час) определяется КПД насосного агрегата [8]:

$$\eta_{НА} = \eta_{НАС} + \eta_{ДВ} + \eta_{ПЧ}, \quad (7)$$

где $\eta_{НАС}$ — КПД насоса; $\eta_{ДВ}$ — КПД электродвигателя; $\eta_{ПЧ}$ — КПД преобразователя частоты. Методика определения величин $\eta_{НАС}$, $\eta_{ДВ}$ и $\eta_{ПЧ}$ описана в [4].

При этом КПД насосного агрегата по формуле (7) определяется для различных комбинаций работы насосной установки:

- работает только один насосный агрегат, поддерживая необходимое давление в заданной точке;
- работают два насосных агрегата на одной частоте вращения, поддерживая необходимое давление в заданной точке;
- работают два насосных агрегата, при этом один насосный агрегат работает на фиксированной частоте вращения, второй насосный агрегат — на изменяемой частоте вращения, поддерживая необходимое давление в заданной точке.

Предлагается адаптивный метод управления многонасосными станциями, который в режиме реального времени может заранее перестраивать работу многонасосной установки (с учётом спрогнозированного водопотребления) на режим работы с более высоким КПД

Далее выбирается режим работы станции управления с максимальным КПД (более подробно см. [4]). В итоге новый способ управления многонасосными станциями позволяет снизить относительное энергопотребление на 7% без каких-либо дополнительных затрат.

Выводы

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Существующие методы управления насосными станциями основываются только на частоте вращения насосного агрегата и в своём алгоритме работы не учитывают один из важных факторов работы насосной установки — будущее водопотребление.
2. Разработан адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления, учитывающий сезонное изменение водопотребления населением, изменение сети водоснабжения и т.д.
3. Предлагается адаптивный метод управления многонасосными станциями, который в режиме реального времени может заранее перестраивать работу многонасосной установки (с учётом спрогнозированного водопотребления) на режим работы с более высоким КПД. ●

1. Бокс Дж., Дженкинс Г.М. Анализ временных рядов, прогноз и управление. — М.: Мир, 1974. 406 с.
2. Барбул М.Л., Котов Ю.Т. Определение рабочей точки насосного агрегата при наличии противодействия // Естественные и технические науки, 2016. №10. С. 152–159.
3. Барбул М.Л., Староверов С.В. Прогнозирование водопотребления населением на основе авторегрессионной модели // Энергобезопасность и энергосбережение, 2018. №6. С. 40–43.
4. Барбул М.Л., Староверов С.В. Способ управления многонасосными станциями с учётом текущего водопотребления [Электр. текст] // Вестник Евразийской науки, 2018. №5. Режим доступа: esj.today.
5. Барбул М.Л., Староверов С.В., Феоктистов А.Ю. Современные алгоритмы управления многонасосными станциями // Энергосбережение и водоподготовка, 2018. №5. С. 9–15.
6. Васильев В.М., Фёдоров С.В., Кудрявцев А.В. Насосы и насосные станции: учеб. пособие. Ч. I. — СПб.: СПбГАСУ, 2017. 131 с.
7. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. Т. 3: Системы распределения и подачи воды. — М.: Изд-во АСВ, 2004. 256 с.
8. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. — М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
9. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках. — М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
10. Фащилко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб. пособие. — М.: Горная книга, 2011. 260 с.
11. León Celi Chr.F., Iglesias-Rey P.L., Martínez Solano F.J. Energy optimization of supplied flows from multiple pumping stations in water distributions networks. Procedia Engineering. Vol. 186. 2017. Pp. 93–100.
12. Bagloee S.A., Mohsen A., Patriksson M. Minimization of water pumps' electricity usage: A hybrid approach of regression models with optimization. Expert Systems with Applications. Vol. 107. October 2018. Pp. 222–242.

References — see page 78.

Methods for improving the efficiency of multipump stations using automatic monitoring and control. Pp. 22–25.

Mikhail L. Barbul, postgraduate student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); **Victor M. Vasiliev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, SPbGASU; **Yuri T. Kotov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch); **Sergey V. Staroverov**, PhD, Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

1. Dzh. Boks, G.M. Dzhenskis. *Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie* [The analysis of time series prediction and control]. Moscow. Mir ["The World" Publishing House]. 1974. 406 p. [In Russian]
2. M.L. Barbul, Ju.T. Kotov. *Opreделение rabochej točki nasosnogo agregata pri nalichii protivodavlenija* [Determination of the operating point of the pump unit in the presence of counter-pressure]. *Estestvennye i tehicheskie nauki* ["Energy Security and Energy Saving" Magazine]. 2016. No. 10. Pp. 152–159. [In Russian]
3. M.L. Barbul, S.V. Staroverov. *Prognozirovanie vodopotreblenija naseleniem na osnove avtoregressionnoj modeli* [Prediction of water consumption by the population based on the autoregressive model]. *Jenergobezopasnost' i jenergoberezhenie* ["Energy Security and Energy Saving" Magazine]. 2018. No. 6. Pp. 40–43. [In Russian]
4. M.L. Barbul, S.V. Staroverov. *Sposob upravlenija mnogonasosnymi stancijami s uchetom tekushhego vodopotreblenija* [The method of controlling multi-pump stations, taking into account the current water consumption]. *Vestnik Evrazijskoj nauki* ["Bulletin of Eurasian Science" Magazine]. 2018. No. 5. Web-source: esj. today. [In Russian]
5. M.L. Barbul, S.V. Staroverov, A.Ju. Feoktistov. *Sovremennye algoritmy upravlenija mnogonasosnymi stancijami* [Modern control algorithms for multi-pump stations]. *Jenergoberezhenie i vodopodgotovka* ["Energy Saving and Water Treatment" Magazine]. 2018. No. 5. Pp. 9–15. [In Russian]
6. V.M. Vasil'ev, S.V. Fedorov, A.V. Kudrjavcev. *Nasosy i nasosnye stancii: ucheb. posobie* [Pumps and pumping stations: A tutorial]. Part 1. St. Petersburg. SPbGASU [St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering]. 2017. 131 p. [In Russian]
7. M.G. Zhurba, L.I. Sokolov, Zh.M. Govorova. *Vodosnabzhenie. Proektirovanie sistem i sooruzhenij* [Water supply. Design of systems and structures]. T. 3. *Sistemy raspredelenija i podachi vody* [Vol. 3. Water distribution and supply systems: A tutorial]. Moscow. Izd-vo ASV [Publishing House of the Association of Construction Universities]. 2004. 256 p. [In Russian]
8. B.S. Leznov. *Chastotno-reguliruemyy jelektroprivod nasosnykh ustanovok* [Variable frequency drive electric pumping units: A tutorial]. Moscow. Mashinostroenie ["Mechanical engineering" Publishing House]. 2013. 176 p. [In Russian]
9. B.S. Leznov. *Jenergoberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy saving and adjustable drive in pump and blower units: A tutorial]. Moscow. Jenergoatomizdat [Publishing House of Energy and Nuclear Industry ("Energoatomizdat" Publishers)]. 2006. 360 p. [In Russian]
10. V.N. Fashhilenko. *Reguliruemyy jelektroprivod nasosnykh i ventiljatornykh ustanovok gornyx predpriyatij: ucheb. posobie* [Adjustable electric drive of pumping and fan installations of mining enterprises: A tutorial]. Moscow. Gornaja kniga ["The mountain book" Publishing House]. 2011. 260 p. [In Russian]
11. Chr.F. León Celi, P.L. Iglesias-Rey, F.J. Martínez Solano. Energy optimization of supplied flows from multiple pumping stations in water distributions networks. *Procedia Engineering*. Vol. 186. 2017. Pp. 93–100.
12. S.A. Bagloee, A. Mohsen, M. Patriksson. Minimization of water pumps' electricity usage: A hybrid approach of regression models with optimization. *Expert Systems with Applications*. Vol. 107. October 2018. Pp. 222–242.