

УДК 621

А.Н. Мальцев, О.С. Хватов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ  
НА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ**

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"

Предложен комплексный подход для определения энергоэффективных режимов работы насосных агрегатов канализационных насосных станций с частотно-регулируемыми приводами. Рассмотрены основные элементы КНС в отдельности и приведено математическое описание для каждого элемента. Получена система уравнений КНС, учитывающая технологические ограничения работы насосных агрегатов с одной стороны и максимальный КПД с другой. Построена зависимость напора от подачи насосного агрегата для разных скоростей вращения с учетом различного значения КПД при работе на гидравлическую сеть с противодавлением. Предложен вариант системы автоматического регулирования на базе fuzzy-регулятора и приведены результаты его работы. Приведены результаты замеров параметров вибрации при практическом внедрении рассматриваемой системы на одну из действующих КНС Нижегородской области.

*Ключевые слова:* частотное регулирование, экономическая эффективность, канализационные насосные станции.

Вопросам исследования и разработки насосных установок посвящено большое количество научных публикаций отечественных и зарубежных авторов. Среди российских публикаций, в первую очередь, следует назвать фундаментальные работы профессора Б.С. Лезнова и инженерной конторы "Ягорба" [1, 2, 3], профессоров Г.Б. Онищенко и М.Г. Юнькова [4]. Рассмотренные в них способы повышения энергоэффективности регулируемых электроприводов насосных агрегатов явились основой для их широкого практического внедрения на насосных установках и станциях.

Вопросам математического моделирования гидродинамических систем и созданию "виртуального" насосного агрегата посвящены работы профессора В.Г. Николаева [5, 6]. Профессором М.А. Мустафиным получены зависимости связи гидравлических, механических и электрических переменных силового канала центробежного насоса, а также предложен метод расчета частотно регулируемого электропривода насосного агрегата с учетом несинусоидальной формы токов в обмотках электрической машины [7].

Активная работа по энергосбережению в насосостроении и преобразовательной технике ведется зарубежными компаниями, такими как Xylem, Grundfos, KSB, Schneider Electric, Siemens, АВВ и др. [8, 9, 10].

При этом большинство работ, рассматривающих повышение энергоэффективности насосных установок, направлено на область водоснабжения, которая имеет значительно меньше тонкостей технологического процесса, чем процесс водоотведения. В статье предлагается рассмотрение процесса перекачки сточных вод на канализационной насосной станции (КНС), примерная структурная схема которой представлена на рис. 1. Данный тип КНС имеет место на предприятиях судоремонта и судостроения Нижегородской области (г. Бор), таких как ООО "ВОЛГАКОМФЛОТ", ОАО "Завод Нижегородский Теплоход", судоходная компания "ОКА" и др. Основными элементами оборудования КНС являются приемный резервуар, центробежный насос (ЦН), электропривод насоса на основе асинхронного электродвигателя (АД), преобразователя частоты (ПЧ) и системы автоматического регулирования (САР). Актуальность разработки данного вида модели объясняется ее применением на существующих и вновь проектируемых КНС.

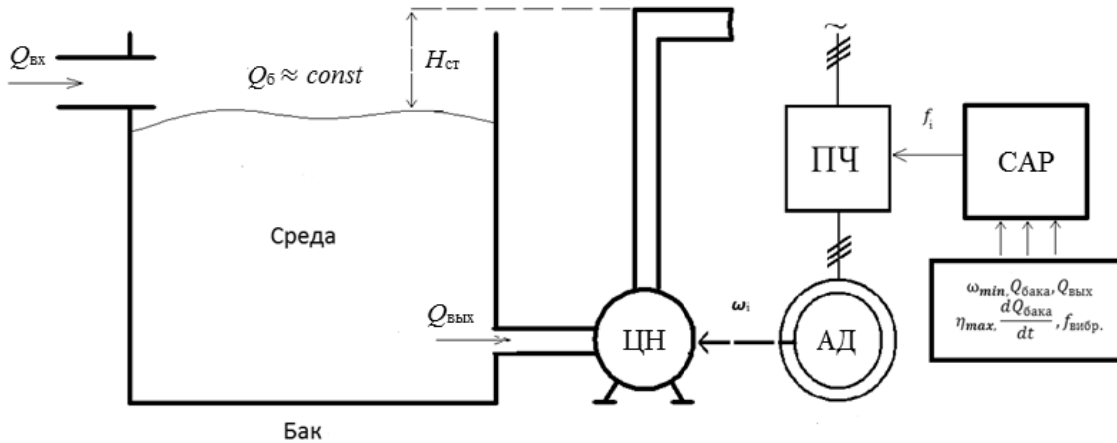


Рис. 1. Структурная схема КНС

Для описания математической модели предложенной системы рассмотрим ее элементы.

1. Приемный резервуар (бак)

Приемный резервуар типовой канализационной станции имеет полукруглую, либо круглую форму с определенной глубиной, которая может отличаться в зависимости от размера самой канализационной станции. Приемный резервуар можно охарактеризовать двумя параметрами: площадью зеркала воды  $S$ ,  $m^2$ , и высотой  $h$ , м. Объем резервуара  $V$ ,  $m^3$ , соответственно, определяется выражением:

$$V = S \cdot h. \tag{1}$$

В приемное отделение поступает определенное количество стоков  $Q_{вх}$ ,  $m^3/ч$ , которое может зависеть от множества факторов: день недели, праздничные дни, погодные условия, время года и прочее. Целесообразно пользоваться значением общего коэффициента неравномерности водоотведения  $K_{общ}$  или распределением суточного стока по часам суток, если имеются статистические данные о количестве поступаемых стоков на КНС.

Регулятор автоматизированной системы управления станцией будет формировать оптимальную частоту вращения насосного агрегата, которая позволит работать в зоне с максимально возможным КПД и стабилизировать уровень стоков на верхней максимально возможной отметке. Стабилизация уровня в верхнем положении обусловлена минимизацией статической составляющей напора, а значит и увеличением энергоэффективности работы системы [11]. При стабилизации уровня должно обеспечиваться следующее условие:

$$Q_{вх} = Q_{вых} \approx const.$$

Если известно предполагаемое количество поступаемых на КНС стоков, можно прогнозировать потенциал энергосбережения станции еще на стадии проектирования.

2. Центробежный насос

Рассмотрим центробежный насос с точки зрения прикладной аналитической гидромеханики [12], где он представлен как система, состоящая из последовательно соединенных четырех участков  $i=1,2,3,4$ : подводящий канал ( $i=1$ ), рабочее колесо ( $i=2$ ), отводящий канал ( $i=3$ ), диффузор ( $i=4$ ), обменивающихся в узлах соединения потоками жидкости. Рабочее колесо (участок  $i=2$ ) представлено в виде  $K$  одинаковых, соединенных, параллельно вращающихся относительно неподвижной оси каналов. Характеризуемый объемным расходом поток  $Q$ , протекающий через участки  $i=1,2,3,4$ , рассматривается как одно неразрывное целое. Поток в каждом из  $k$  каналов рабочего колеса составляет  $Q_k = \frac{Q}{K}$  (рис. 2).

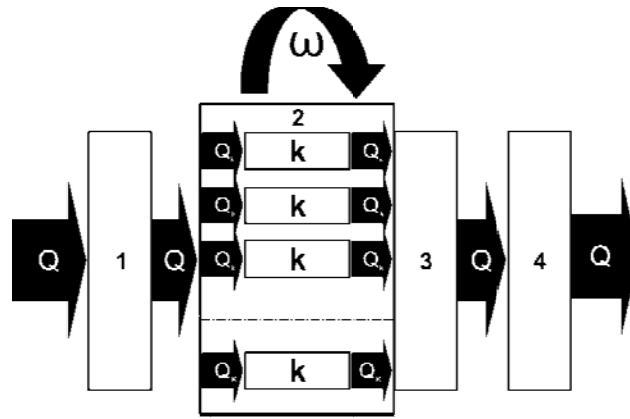


Рис. 2. Предлагаемая структурная схема разбиения центробежного насоса

Ввиду относительно небольшого размера рабочих колес (до  $D=525$  мм) насосных агрегатов промышленной серии (СМ, СД), которые обычно устанавливаются на КНС, а также минимального количества лопастей (обычно 2), участок  $i=2$  на рис. 2 можно рассматривать упрощенно, в качестве одного канала, вращающегося вокруг неподвижной оси. Данное допущение значительно упростит математические расчеты.

Известна математическая модель нестационарных механических и гидродинамических процессов в ЦН, выразим угловую скорость вращения рабочего колеса для стационарного режима работы при производной скорости вращения рабочего колеса и потоке жидкости, равной нулю [13]:

$$\omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 [(p_i)_1 - (p_i)_2] + \beta_{Q4} Q^2 - \sum_{i=1,3,4} \Delta p'_i(Q) - \frac{K\rho\zeta'_2(\omega)Q^2}{2(S_2)_1^2} + \sum_{i=1}^4 G_i}{\beta_{Q3}}}; \quad (2)$$

где  $p_1, p_2$  - давление во входном и выходном сечениях канала;

$\sum_{i=1}^4 \Delta p'_i(\omega, Q)$  функция, характеризующая общие потери давления в гидродинамической подсистеме;

$\Delta p'_2(Q, \omega) = \frac{K\rho\zeta'_2 Q^2}{2(S_2)_1^2}$  - функция, описывающая гидравлические потери в рабочем колесе

(участок  $i = 2$  гидродинамической подсистемы);

$\beta_{Q3}, \beta_{Q4}$  - коэффициент приведения, дифференциальных уравнений к форме Коши (более подробно описано в [13]);

$\sum_{i=1}^4 G_i$  - сила тяжести, действующая на ограничивающий элементарный объем сечения.

Для упрощения расчетов полагаем, что коэффициент сопротивления рабочего колеса  $\zeta'_2$  не зависит от частоты его вращения и равен константе.

### 3. Система ПЧ – АД

Чаще всего на практике в насосных установках используется ПЧ общего назначения (см. рис. 1), которые обеспечивают соотношение параметров питающего напряжения на статоре АД согласно:

$$\frac{U_{1i}}{f_{1i}} = \text{const},$$

где  $U_{li}, f_{li}$  - текущие значения напряжения и частоты на обмотке статора АД, соответственно.

Данный закон формирования питающего напряжения на статоре АД обеспечивается средствами широтно-импульсного управления инверторной группы (блока) ПЧ (рис. 3). Зависимость угловой частоты вращения АД от частоты питающего напряжения выражается формулой [14]:

$$\omega = \frac{60 \cdot f_{1j}}{p} \cdot (1 - s), \quad (3)$$

где  $p$  – количество пар полюсов АД;  $s$  – скольжение ротора АД.

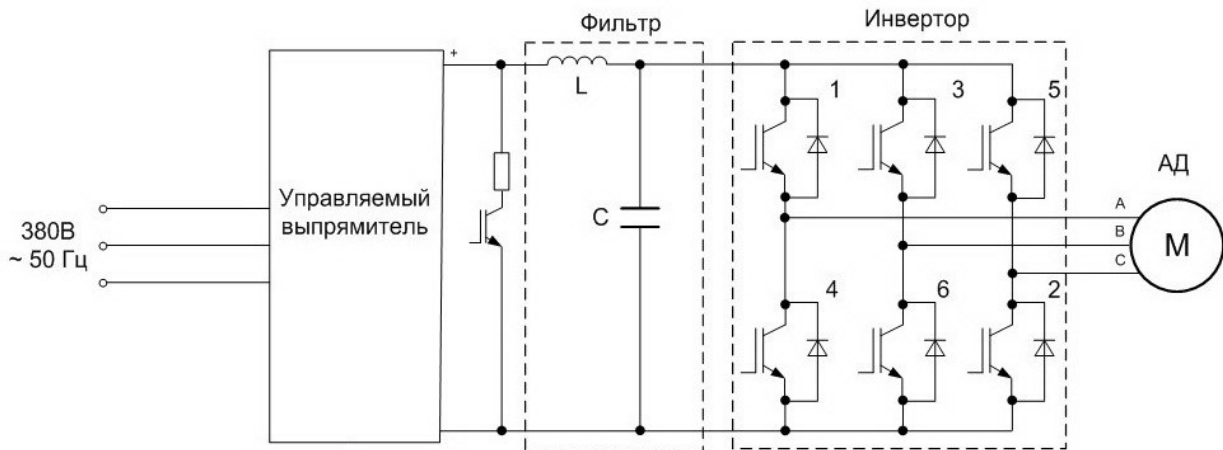


Рис. 3. Схема ПЧ инверторного типа

#### 4. Ограничения системы

Рассмотрим ограничения, накладываемые на систему автоматического регулирования, связанные с особенностями технологического процесса водоотведения. В [2] показано, что при скорости вращения, составляющей 10-15% от номинальной, нарушается однозначная зависимость между напором и подачей насоса. Это объясняется тем, что при уменьшении частоты вращения скорость движения воды в насосе уменьшается и при некотором критическом значении скорости изменится характер движения воды, течение перестанет быть турбулентным и наступит неопределенный переходный режим. Следовательно, для того, чтобы исключить попадание в данный режим, необходимо ограничить минимально допустимую скорость вращения на уровне 10-15% от номинальной скорости.

Заметим, что при работе насосного агрегата с противодавлением, нельзя использовать формулы приведения для определения напорных характеристик. Учитывая, что характеристика гидравлической сети пересекает ось напора в точке с подачей насоса равной нулю, можно вывести минимальную скорость вращения насосного агрегата при равенстве статической составляющей напора и напора, развиваемого насосом. Данное ограничение скорости вращения будет зависеть только от характеристики гидравлической сети, и определяться выражением:

$$\omega_{\min} = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}}}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{п}}$  – противодействие в системе подачи воды, м;  $H_{\text{ф}}$  – фиктивный напор при нулевой подаче, м.

Необходимо также учитывать ограничение, исключающее заиливание гидросооружений. Руководствуясь актуализированной редакцией СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения» от 2012 года [15] следует, что скорость потока канализационных вод при отсутствии измельчителей и песколовков, необходимая для самоочистки должна состав-

лять 0,7 - 1 м/с. Скорость потока может быть снижена до значения 0,5 м/с при применении механической очистки сточных вод: песколовки, измельчители, решетки с механическим дроблением и т.д. Данное ограничение скорости выражается формулой [16]:

$$\omega_{\min} \geq \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{A \cdot v}{Q_6}\right) \cdot \left(1 - \frac{H_n}{H_\phi}\right) + \frac{H_n}{H_\phi}}, \quad (5)$$

где  $Q_6$  – наибольшая для данной насосной установки подача за расчетный период, м<sup>3</sup>/ч;  $\omega_{\min}, \omega_{\text{ном}}$  – минимальное и номинальное значение частоты вращения насоса соответственно, с<sup>-1</sup>;  $v$  – скорость потока, м/с, в поперечном сечении гидравлического участка сети  $A$ , м<sup>2</sup>.

Фактически все КНС имеют статическую составляющую напора. Методы расчета КПД при наличии статической составляющей напора изложены в [1, 4, 7]. В статье предлагается определять КПД через аппроксимирующую функцию скорости вращения рабочего колеса насосного агрегата [7]:

$$\eta_{\text{ун}}(\omega, H_c) = a_0 + a_1 \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} + a_2 \left(\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}\right) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Уравнения (1) - (6), объединенные в единую систему, являются основой для определения режимов работы КНС при условии обеспечения максимальной энергоэффективности:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = S \cdot h = Q_{\text{ex}} \cdot t, \text{ где } h \rightarrow \max; \\ \omega = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 [(p_i)_1 - (p_i)_2] + \beta_{Q4} Q^2 - \sum_{i=1,3,4} \Delta p_i(Q) - \frac{K\rho\zeta'_2 Q^2}{2(S_2)_1^2} + \sum_{i=1}^4 G_i}{\beta_{Q3}}}; \\ \omega = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s); \\ \omega_{\min} \geq 0.1 - 0.15 \cdot \omega_{\text{ном}}; \\ \omega_{\min} = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_n}{H_\phi}}; \\ \omega_{\min} \geq \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{A \cdot v}{Q_6}\right) \cdot \left(1 - \frac{H_n}{H_\phi}\right) + \frac{H_n}{H_\phi}}; \\ \eta_{\text{ун}}(\omega, H_c) = a_0 + a_1 \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} + a_2 \left(\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}\right) \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (7)$$

На рис. 4 представлена зависимость  $H=f(Q)$  насосного агрегата КНС при работе с противодействием. Также указаны области работы насоса с различным значением КПД. Данная зависимость удобна для наглядного определения скоростных зон эффективной работы насоса.

Ввиду того, что полученная модель КНС хотя и имеет строгое математическое описание, но нахождение всех переменных уравнений в условиях практического применения является достаточно сложным и емким процессом, а также наличие нелинейностей в (7) и необходимость узких экспертных знаний технологии самого процесса позволяют нам отойти от принципов классической теории автоматического управления и использовать методы нечет-

кой логики (FUZZY-логики). Результат работы виртуальной модели fuzzy-регулятора для канализационной насосной станции представлен на рис. 5, а, б.

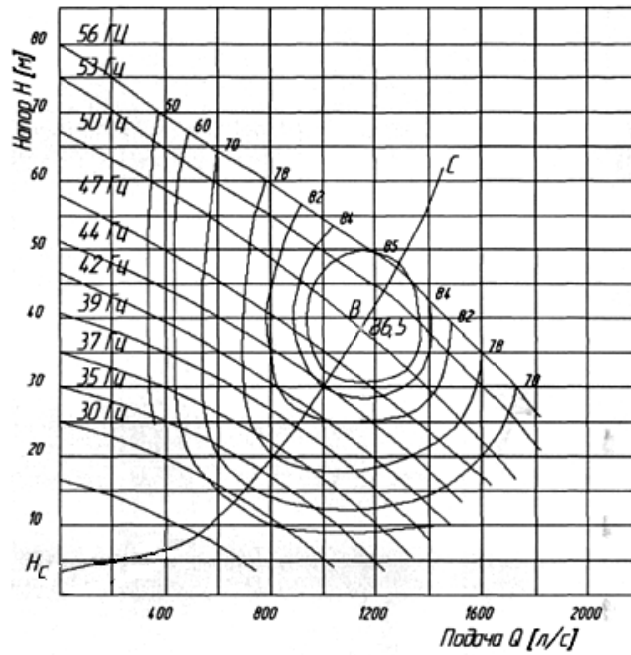
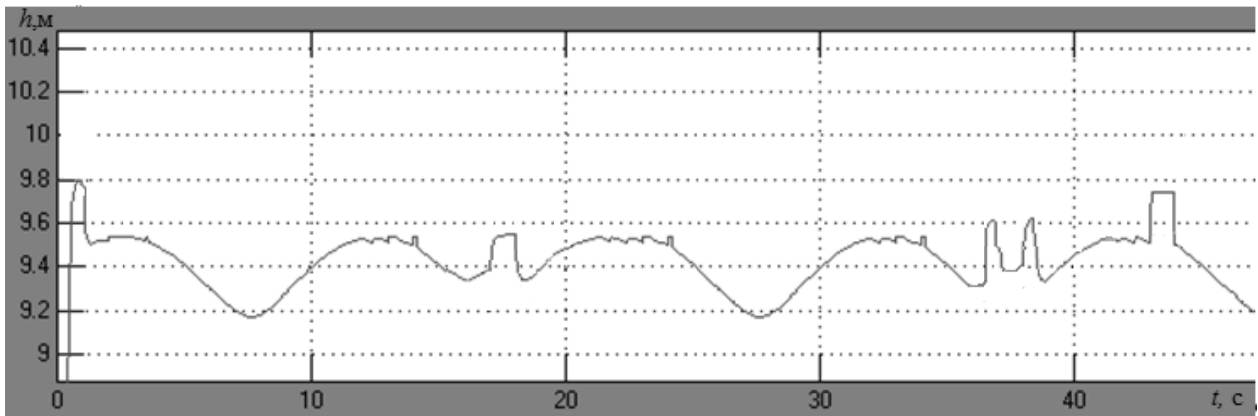
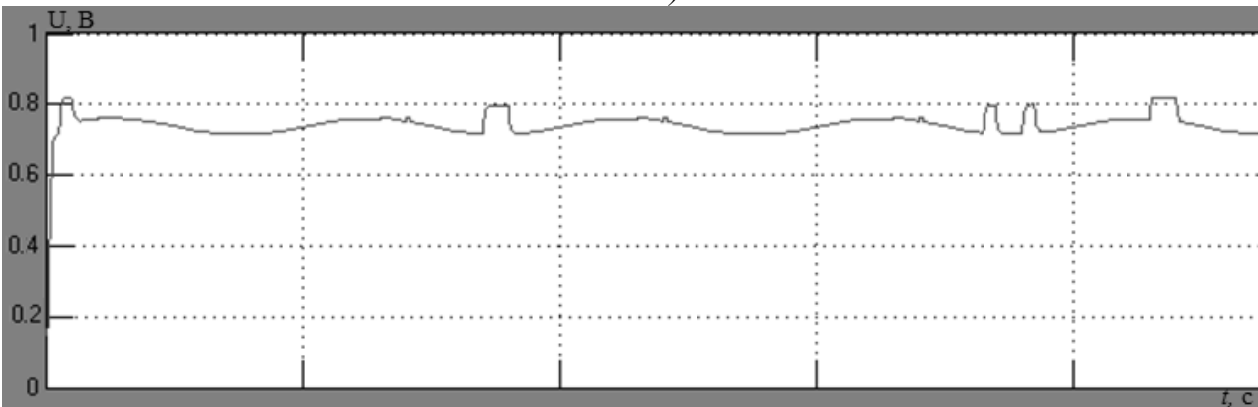


Рис. 4. Зависимость  $H=f(Q)$  насосного агрегата КНС для различных скоростей вращения



а)



б)

Рис. 5. Результат работы имитационной модели fuzzy-регулятора:  
 а – текущее значение поступающих стоков (уровень резервуара);  
 б – реакция регулятора на изменения уровня поступающих стоков

На основе имеющегося практического опыта было выявлено, что при внедрении частотного регулирования на КНС, где гидравлическая сеть имеет большую статическую составляющую напора, могут наблюдаться резонансные колебания на определенных частотах. Результаты практических исследований колебаний с максимальной амплитудой приведены на рис. 6.

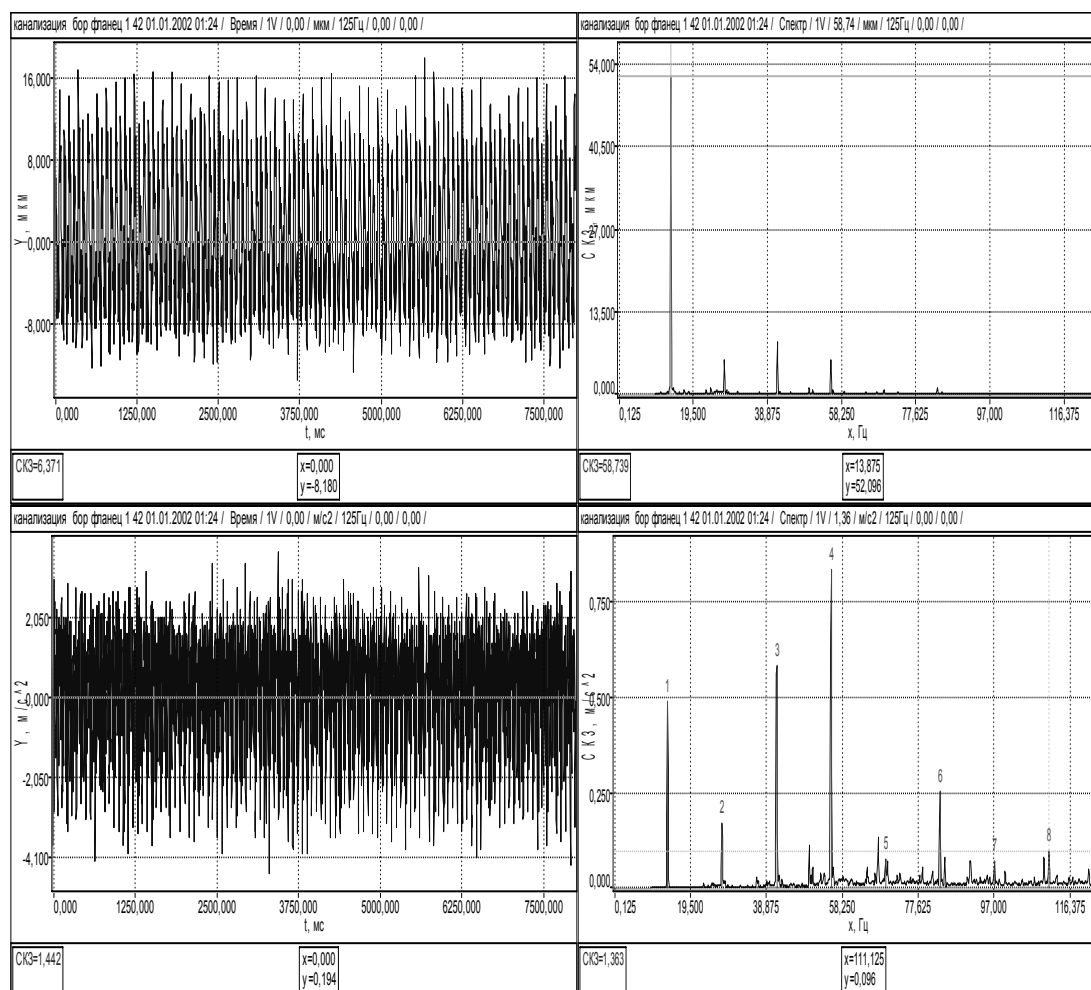


Рис. 6. Исследование резонансных колебаний напорного коллектора КНС

Из графика видно, что максимальная амплитуда колебаний возникает на частоте 42 Гц и составляет 40 мкм, а виброускорение в данном случае составило  $0,833 \text{ м/с}^2$ . Это обусловлено тем, что частоты пульсаций параметров внутреннего потока жидкости могут оказаться близкими к одной из собственных частот поперечных колебаний трубопровода, в результате чего могут реализоваться резонансные колебания. Очевидно, что работа электропривода при частотах, близких к 42 Гц, в данном практическом примере должна быть исключена.

### Выводы

Полученная система уравнений (7) позволяет определять энергоэффективные режимы работы насосов с частотно-регулируемыми электроприводами в составе КНС при учете имеющихся технологических ограничений по скоростным зонам работы.

### Библиографический список

1. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходушных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках / Б.С. Лезнов. – М., 1998. – 180 с.

3. Лезнов, Б.С. Частотно регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
4. Онищенко, Г.Б. Электропривод турбомеханизмов / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.
5. Николаев, В.Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения: дис. ... д-ра тех. наук. – М., 2010. – 375 с.
6. Николаев, В.Г. Энергосберегающие способы управления насосным оборудованием канализационных насосных станций / В.Г. Николаев, И.В. Барсук // Сборник трудов научно-технической конференции. МИКХиС, 2007. – 158 с.
7. Мустафин, М.А. Энергосберегающие системы электроприводов насосных агрегатов: автореф. дис. ... д-ра. тех. наук. Алматы, 2007. – 43 с.
8. Antriebsbaueinheit fur eine Kreiselpumpe. GRUNDFOS A/S, Strom Niels Jorgen, Skafsgaard Martin Byskov, Sorenaen Truels (Vottmann, Heiko et al Patenanwalte Wilcken & Vottmann, Bei der Lohmuhle 23 23554 Lubeck), №04015972.5.
9. KSB AG // Pump Industry Analyst. Germany. 2005, Issue 11, November 2005. – P. 5.
10. Economical Aspects of Variable Frequency Drives in Pumping Stations. 1994, ITT Flygt System Engineering.
11. Лезнов, Б.С. Технические основы энергосбережения в насосных установках / Б.С. Лезнов, В.Б. Чебанов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – №7.
12. Лурье, А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1961. – 824 с.
13. Русецкая, Г.В. Разработка средств исследований нестационарных механических и гидродинамических процессов в центробежных насосах на стадии проектирования: дис. ... д-ра. техн. наук. Н.Новгород, НГТУ им Р.Е.Алексеева, 2010.
14. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
15. СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения». – М., 2012. – 141 с.
16. Мальцев, А.Н. Техническая актуальность автоматизации канализационных станций на базе преобразователя частоты и программируемого логического контроллера / А.Н. Мальцев, В.А. Тихомиров, О.С. Хватов // Вестник ВГАВТ. – 2015. – №42.

*Дата поступления  
в редакцию 06.10.2017*

**A.N. Maltsev, O.S. Khvatov**

## **THE DEFINITION OF ENERGY EFFICIENT MODES IN PUMPING UNITS OPERATION WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVES AT THE SEWER STATIONS**

Volga State University of Water Transport

**Purpose:** the definition of a comprehensive approach for defining energy-efficient operation modes of pumping units sewage pumping stations with variable frequency drives.

**Design/methodology/approach:** Describes the main elements of the SPS separately and the mathematical descriptions for each item.

**Findings:** The resulting system of equations of the SPS, taking into account the technological constraints of pumping units on the one hand and maximum efficiency on the other.

**Research limitations/implications:** The dependence of the pressure from the feed pump unit for different speeds of rotation taking into account the different values of efficiency when working on hydraulic network backpressure. The proposed system of automatic control based on fuzzy controller and the results of its work. The results of measurements of vibration parameters in the practical implementation of the system on one of the existing SPS in Nizhny Novgorod region.

**Originality/value:** the obtained mathematical model in conjunction with the use of the fuzzy-regulator will improve the energy efficiency of sewage pumping stations.

*Key words:* frequency regulation, economic efficiency, sewage pumping station.