

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ВОДОПРОВОДНО- КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА

Бохан А.Н., к.т.н., Колесник Ю.Н., инж.

Насосные агрегаты являются основными промышленными механизмами водопроводно-канализационных хозяйств, насосных станций нефте-продуктопроводов, и др.

Потребляя значительное количество электроэнергии, режимы работы этих агрегатов формируют графики электрических нагрузок, определяют энергетическую составляющую затрат в структуре себестоимости продукции, обладают наибольшими потенциальными возможностями для сокращения удельного расхода электроэнергии.

Рассмотрим вопросы энергосбережения для водопроводно-канализационных хозяйств (ВКХ).

В сферу деятельности ВКХ входит добыча и реализация питьевой воды потребителям, сбор и транспортировка сточных вод до очистных сооружений. Рассматривая особенности технологического процесса можно выделить следующие основные группы потребителей электроэнергии:

- станции первого подъема с погружными насосными агрегатами;
- сооружения насосных станций второго подъема;
- канализационные насосные станции.

Питание водопроводных сетей осуществляется от водозаборов.

Вода из артезианских скважин первого подъема подается в резервуары сооружений второго подъема. От площадок сооружений второго подъема водозаборов вода подается в водопроводные сети потребителей. Канализационная система включает канализационные коллекторы, насосные станции (КНС) и участки напорной канализации.

Анализ режимов работы производственных механизмов ВКХ показывает, что значительное количество насосных агрегатов имеют повышенный напор, а электроприводы этих механизмов работают с низкой загрузкой. Это связано с ошибками проектирования, обусловленными отличием прогнозируемых и реально существующих производительностей и нагрузок. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев электроприводы указанных механизмов являются нерегулируемыми, что не позволяет обеспечить режим рационального электропотребления в условиях переменной нагрузки, определяемой изменением потребности в разные периоды времени. В таких системах водоснабжения (с нерегулируемым электроприводом) регулирование производительности, как правило, осуществляется изменением положения дроссель-

ной заслонки. Данный способ не обеспечивает заметного снижения электропотребления при уменьшении производительности, и приводит к увеличению напора в сети, сокращая эксплуатационный ресурс сетей водоснабжения и технологического оборудования. Поэтому вопрос об энергосбережении на насосных агрегатах тесно связан с правильным выбором способа и устройств регулирования электропривода.

Известно, что полезная мощность, отдаваемая насосами перекачиваемой жидкости, определяется по выражению [1]:

$$P_n = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $Q$  – производительность насосов,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – рабочий напор, м;

$\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ ).

Эксплуатационные свойства центробежных механизмов представляются в виде зависимостей напора  $H$  и потребляемой мощности  $P$  от расхода  $Q$ , которые с достаточной точностью для инженерных расчетов описываются соотношениями [2]:

$$H = H_{x*} + (1 - H_{x*}) \cdot Q_*^2, \text{ о.е.}, \quad (2)$$

$$P = P_{x*} + (1 - P_{x*}) \cdot Q_*^3, \text{ о.е.}, \quad (3)$$

где  $H_{x*}$  и  $P_{x*}$  – напор и мощность насоса при  $Q_* = 0$ , о.е.

При этом напор центробежного механизма уравнивается напором гидравлической сети, характеристику которой обычно представляют в виде [2]:

$$H_* = H_{c*} + (1 - H_{c*}) \cdot Q_*, \text{ о.е.}, \quad (4)$$

где  $H_{c*}$  – статическая составляющая напора, о.е.

В результате изменения положения дроссельной заслонки изменяется характеристика сети (кривая 3, рис.1), а значит и производительность  $Q$  (рабочая точка А). При этом рабочий напор увеличивается (точка D). Если регулировать производительность  $Q$  изменением рабочей характеристики насосного агрегата (кривая 4), то рабочий напор уменьшается (точка С). Согласно формуле (1) снижение полезной мощности при этом составит:

$$\Delta P_n = Q \cdot H_D \cdot \rho \cdot g - Q \cdot H_C \cdot \rho \cdot g = \rho \cdot g \cdot (Q \cdot H_D - Q \cdot H_C) \sim S_{ABCD}, \quad (5)$$

где  $H_D$  – рабочий напор при изменении характеристики сети;

$H_C$  – рабочий напор при изменении характеристики насоса;

$S_{ABCD}$  – площадь прямоугольника ABCD (рис. 1).

Учитывая особенности технологического процесса ВКХ, способы изменения рабочей характеристики насосного агрегата целесообразно дифференцировать по группам потребителей электроэнергии.

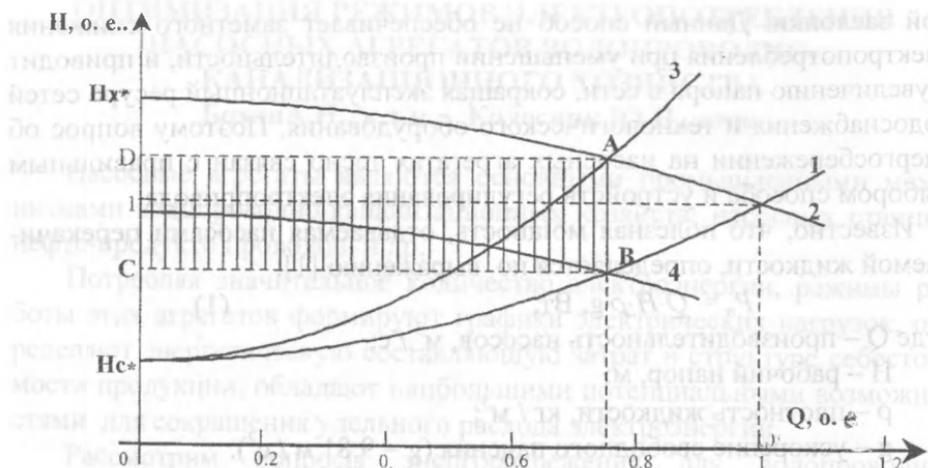


Рис. 1 Регулирование производительности насосного агрегата  
 1, 2 - исходные характеристики сети и насоса соответственно  
 3, 4 - характеристики сети и насоса при регулировании

Для насосных агрегатов станций второго подъема характерен неравномерный режим работы, определяемый изменениями потребности в разные периоды времени. Режим оптимального электропотребления таких агрегатов может обеспечить применение частотного электропривода. Регулирование производительности при этом осуществляется изменением скорости вращения рабочего колеса насоса за счет изменения подводимой к асинхронному электродвигателю частоты (одновременно изменяется величина подводимого напряжения).

Рабочие характеристики низконапорных насосов при этом видоизменяются в соответствии с законами подобия следующим образом [2]:

$$H_* = [H_{x*} + (1 - H_{x*}) \cdot (Q_* / n)^2] \cdot n^2, \text{ о.е.}, \quad (6)$$

$$P_* = [P_{x*} + (1 - P_{x*}) \cdot (Q_* / n)^3] \cdot n^3, \text{ о.е.}, \quad (7)$$

где  $n_*$  - скорость рабочего колеса насоса, о.е., для заданной производительности определяется, как:

$$n_* = \sqrt{\frac{H_{c*} + (H_{x*} - H_{c*}) \cdot Q_*^2}{H_{x*}}}, \text{ о.е.}, \quad (8)$$

Коэффициент полезного действия насоса:

$$\eta_n = \frac{P_{n*}}{P_*}, \text{ о.е.}, \quad (9)$$

Потребляемая из сети мощность насосного агрегата при дроссельном регулировании производительности:

$$P_{\partial} = \frac{P_{нд*}}{\eta_{\partial} \cdot \eta_{\partial в}}, \text{ о.е.}, \quad (10)$$

Мощность, потребляемая из сети при частотном регулировании:

$$P_{\text{ч}} = \frac{P_{пч*} \cdot K_{\text{ч}}}{\eta_{\text{ч}} \cdot \eta_{\partial в}}, \text{ о.е.}, \quad (11)$$

где  $P_{нд*}$ ,  $P_{пч*}$  – полезная мощность насоса при дроссельном и частотном регулировании производительности соответственно, о.е.;

$\eta_{\partial}$ ,  $\eta_{\text{ч}}$  – соответственно КПД насоса при дроссельном и частотном регулировании производительности, о.е.;

$\eta_{\partial в}$  – КПД приводного электродвигателя;

$K_{\text{ч}}$  – коэффициент, учитывающий потребление частотного преобразователя, ( $K_{\text{ч}} \approx 1,1$ ).

Потребляемая агрегатом мощность из сети и КПД насоса удобно определяются по графикам в зависимости от производительности  $Q$  и способа ее регулирования (рис.2, 3).

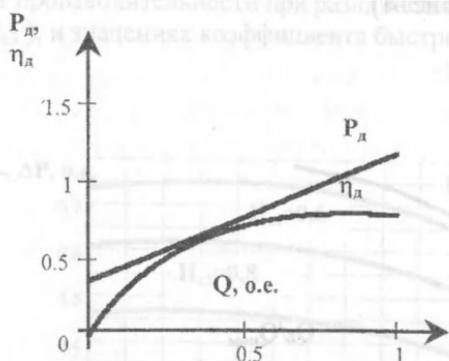


Рис. 2. Характеристики КПД насоса и потребляемой из сети мощности при дроссельном регулировании.

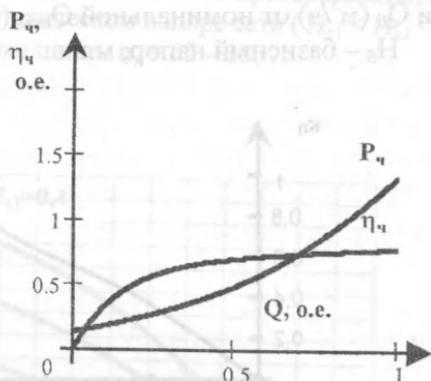


Рис. 3. Характеристики КПД насоса и потребляемой из сети мощности при частотном регулировании.

Таким образом, регулирование производительности изменением характеристики насоса более целесообразно как с технической, так и с экономической точки зрения. Снижение потребляемой из сети мощности и энергии за счет применения частотного преобразователя при известных параметрах насосного агрегата ( $P_{х*}$ ,  $H_{х*}$ ,  $\eta_{\partial в}$ ,  $Q_{\text{ном}}$ ,  $\eta_{п.ном}$ ) и гидравлической сети ( $H_{с*}$ ), для заданного графика производительности

$Q(t)$ , могут быть определены по выражениям:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{\eta_{\text{об}}} [P_{x^*} + (1 - P_{x^*}) \cdot Q] - \frac{K_q}{\eta_{\text{об}}} [P_{x^*} \cdot (\frac{H_{c^*} + (H_{x^*} - H_{c^*}) \cdot Q^2}{H_{x^*}})^{3/2} + Q \cdot (1 - P_{x^*}) \frac{H_{c^*} + (H_{x^*} - H_{c^*}) \cdot Q^2}{H_{x^*}}], \text{ о.е.}, \quad (12)$$

$$\Delta W = P_{н.б} \sum \Delta P_i \cdot t_i, \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (13)$$

где  $P_{н.б}$  – базисная мощность насоса, определяемая для исходного режима работы агрегата (рабочая точка М, рис. 1);

$\Delta P_i$  – снижение мощности, потребляемой из сети насосным агрегатом, при работе с производительностью  $Q$  в течении времени  $t_i$  (согласно графика нагрузки  $Q(t)$ ).

Значение базисной мощности насоса может быть найдено по выражению:

$$P_{н.б} = \frac{Q_б \cdot H_б}{367,2 \cdot \eta_{н.ном} \cdot k_\eta}, \quad \text{кВт}, \quad (14)$$

где  $k_\eta$  – коэффициент, учитывающий изменение КПД насоса относительно номинального  $\eta_{н.ном}$  за счет отличия базисной производительности  $Q_б$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) от номинальной  $Q_{ном}$  (рис. 4).

$H_б$  – базисный напор, м.в.с.

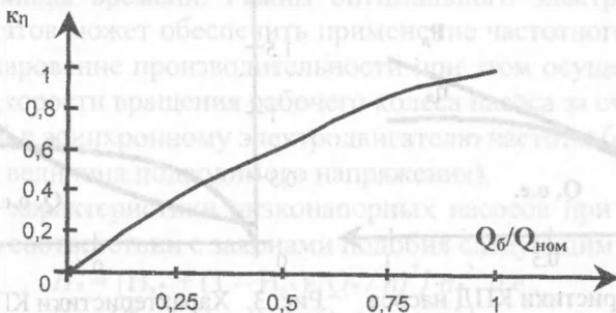


Рис.4. Определение коэффициента  $k_\eta$  при отличии базисной производительности насоса  $Q_б$  от номинальной  $Q_{ном}$

В качестве базисных условий для определения  $P_{x^*}$ ,  $H_{x^*}$ ,  $H_{c^*}$ ,  $P_{н.б}$  принимаются значения напора  $H_б$  и производительности  $Q_б$  при исходных характеристиках насоса и гидравлической сети (рабочая точка М, рис. 1).

Анализ выражения (12) показывает, что эффективность применения частотного преобразователя изменяется в зависимости от статической составляющей напора в гидравлической сети  $H_{c^*}$ .

Характер этого изменения (рис.5, 6) указывает, что применение частотного преобразователя при меньших  $H_c$  более целесообразно (при прочих равных условиях).

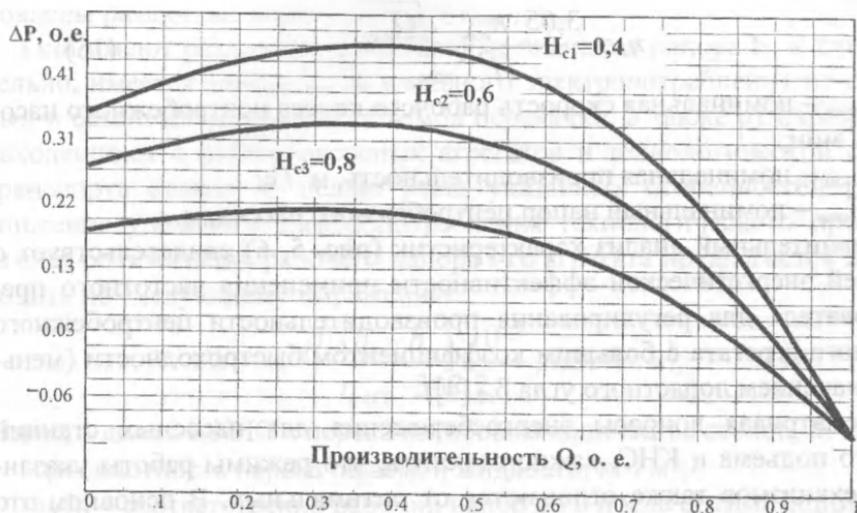


Рис.5. Зависимости эффективности применения частотного преобразователя от производительности при различном статическом напряжении сети ( $H_{c1} < H_{c2} < H_{c3}$ ), и значениях коэффициента быстроходности  $n_s = 65 - 180$ .

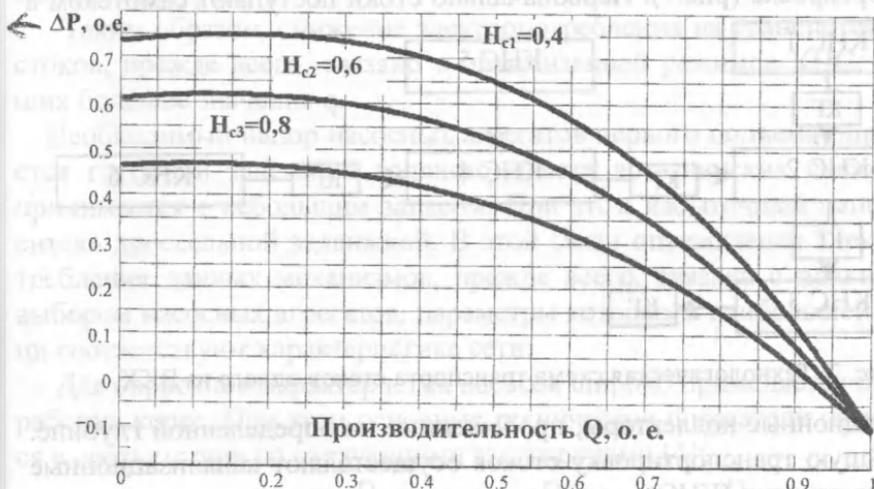


Рис.6. Зависимости эффективности применения частотного преобразователя от производительности при различном статическом напряжении сети ( $H_{c1} < H_{c2} < H_{c3}$ ), и значениях коэффициента быстроходности  $n_s = 180 - 282$ .

Характеристики рис. 5, 6 построены для различных диапазонов значений коэффициента быстроходности [3], который может быть найден по следующему выражению:

$$n_s = \frac{3,65 \cdot n_{\text{ном}} \cdot \sqrt{Q_{\text{ном}}}}{H^{3/4}_{\text{ном}}}, \quad (15)$$

где  $n_{\text{ном}}$  – номинальная скорость рабочего колеса центробежного насоса, об / мин;

$Q_{\text{ном}}$  – номинальная производительность, м<sup>3</sup> / с;

$H_{\text{ном}}$  – номинальный напор центробежного насоса, м.

Сравнительный анализ характеристик (рис. 5, 6) свидетельствует о большей энергетической эффективности применения частотного преобразователя для регулирования производительности центробежного насосного агрегата с большим коэффициентом быстроходности (меньшим значением лопастного угла  $\beta_{12}$  [4]).

Рассматривая вопросы энергосбережения для насосных станций первого подъема и КНС, важно отметить, что режимы работы указанных механизмов также отличаются от оптимальных. В основном это связано с несоответствием желаемого напора (определяется характеристикой сети) и напора, развиваемого насосным агрегатом.

Минимально необходимый напор КНС определяется глубиной канализационного коллектора, перепадом высот на входе и выходе участков напорной канализации, а также потерями на сопротивление при транспортировке (рис.7). Первоначально стоки поступают самотеком в

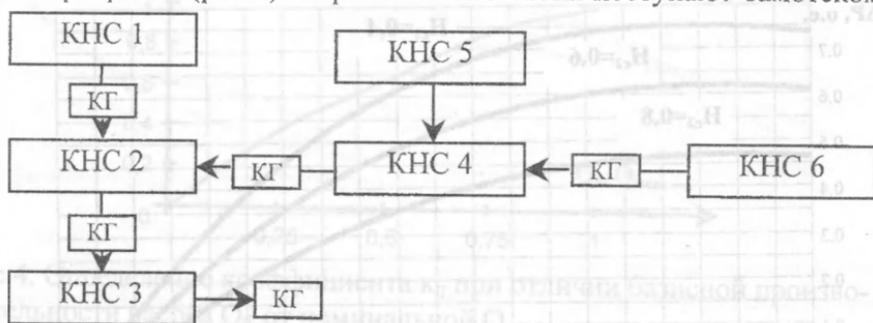


Рис. 7. Технологическая схема транспорта стоков одного из ВКХ.

канализационные коллекторы, проложенные на определенной глубине. Дальнейшую транспортировку стоков осуществляют канализационные насосные станции (КНС), распределенные по длине участков канализационной сети. Из КНС стоки поступают в камеры гашения (КГ), а затем в очистные сооружения. Длина участков напорной канализации и диаметр трубопроводов определяются рельефом местности и макси-

мальными нагрузками ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) участков канализационной сети.

При определении удельного расхода электроэнергии на перекачку канализационных стоков, принимается во внимание, что на КНС установлены различные агрегаты:  $\eta_{\text{агр}} = \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{дв}}$ .

Они имеют различные номинальные значения напора  $h_n$  и следовательно, имеется зависимость удельного электропотребления от суточных и сезонных колебаний объемов перекачки, а также от параметров находящихся в работе насосных агрегатов и технологической схемы транспорта стоков. С целью учета указанных особенностей расчет снижения удельного электропотребления технологического процесса за счет оптимизации рабочего напора  $i$ -го агрегата предлагается производить по следующему выражению:

$$\Delta W = q_i \cdot \frac{\rho \cdot (h_i - h_m) \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{агр}} \cdot 367,2}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3, \quad (16)$$

где  $q_i$  – доля  $i$ -й КНС в перекачке общего количества стоков, о. е.;

$\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости,  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;

$h_i, h_m$  – соответственно рабочий напор до и после оптимизации, м.

$$q_i = \frac{V_i}{V_I}, \text{ о. е.} \quad (17)$$

где  $V_i, V_I$  – соответственно объемы сточных вод, перекачиваемых  $i$ -й КНС, и КНС головного участка в соответствии с технологической схемой (КНС 3, рис.7).

Таким образом, снижение электропотребления на транспортировку стоков, прежде всего, связано с оптимизацией режимов КНС, имеющих большее значение  $q$ .

Необходимый напор насосных агрегатов первого подъема определяется глубиной залегания водяного пласта артезианских скважин, и принимается с небольшим запасом. При этом избыточный напор «гасится» дроссельной задвижкой. В этой связи оптимизация электропотребления данных механизмов, прежде всего, связана с правильным выбором насосных агрегатов, параметры которых в наибольшей степени соответствуют характеристике сети.

Для коррекции характеристик насосов широко применяется обточка рабочих колес. При этом основные технические показатели изменяются в соответствии со следующими выражениями [4]:

$$H = H_1 \cdot \left(\frac{D}{D_1}\right)^2, Q = Q_1 \cdot \frac{D}{D_1}, P = P_1 \cdot \left(\frac{D}{D_1}\right)^3, \quad (18)$$

где  $H_1, Q_1, P_1$  – соответственно напор, производительность и потребляемая насосом мощность при диаметре рабочего колеса насоса  $D_1$ .

Анализ выражения (18) показывает, что несмотря на некоторое изменение КПД насоса, обрезка рабочего колеса может привести к значительному снижению удельных энергозатрат.

### Выводы:

- применение частотного электропривода наиболее целесообразно для насосных агрегатов второго подъема, для которых характерен переменный режим работы, при этом оптимизация режимов электропотребления КНС и насосных агрегатов первого подъема, прежде всего, связана с правильным выбором и оптимизацией рабочих характеристик насосных агрегатов.
- предложены зависимости, позволяющие оценивать энергетическую эффективность применения частотного преобразователя при различном статическом напоре гидравлической сети, которые показывают, что применение частотных преобразователей для регулирования производительности насосных агрегатов с большим коэффициентом быстроходности и меньшим лопастным углом более целесообразно.

### Литература.

1. Энергетические характеристики насосных станций. / Б. П. Тихоненков, А. Ф. Шаповал, В. П. Богомолов. // Промышленная энергетика, – 1998, – №2.
2. Ю. В. Копылов, Б. А. Чуланов. Экономия электроэнергии в промышленности. – М.: Энергия, 1978.
3. Электротехнический справочник. Т. 3. Кн. 2. Использование электрической энергии./ Под общ. ред. И. Н. Орлова и др. –7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 616 с.: ил.
4. В. М. Черкасский. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М., "Энергия", 1977.