

Эффективность применения частотно-регулируемого электропривода на канализационных насосных станциях

ВВЕДЕНИЕ

Вокруг вопроса эффективности применения частотно-регулируемого электропривода на канализационных насосных станциях (КНС) не один год идут споры. Многие считают, что установка преобразователя частоты экономически невыгодна, ввиду его сравнительно высокой стоимости и, как следствие, длительного срока окупаемости. Поэтому они являются сторонниками проверенного повторно-кратковременного режима работы насосных агрегатов.

Их оппоненты придерживаются противоположной точки зрения, полагая, что применение частотного регулирования экономически выгодно во всех случаях, а срок окупаемости при этом сравнительно невелик.

Существует также мнение, что альтернативой частотному регулированию при средних нагрузках (расходах) является просто грамотный подбор насосных агрегатов.

Как показывает опыт, универсального решения пока не существует.

Целью данной статьи является попытка определения критериев для оценки эффективности применения частотного регулирования.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ

Энергетические потери гидравлической сети, или потери напора, являются ключевым критерием при определении эффективности частотного регулирования. Рассмотрим упрощённую технологическую схему КНС (рис. 1). Основными элементами схемы являются: задвижки Зд1, Зд2, Зд3, приёмный резервуар ПР, насосный агрегат НА и напорный коллектор НК длиной $L_{НК}$.

Выделим основные технологические параметры:

$H_{п}$ — напор, создаваемый уровнем в приёмном резервуаре на входе насосного агрегата;

$H_{на}$ — давление, создаваемое насосным агрегатом;

$P_{н}$ — давление за насосным агрегатом;

$P_{вых}$ — давление на выходе напорного коллектора;

$Q_{сток}$ — расход стоков, поступающих в приёмный резервуар;

$Q_{вых}$ — расход стоков, перекачиваемых насосом НА.

Кроме того, можно выделить:

$\Delta H_{ст.нк}$ — перепад высот напорного коллектора;

$\Delta H_{дин.нк}$ — динамические потери давления в напорном коллекторе.

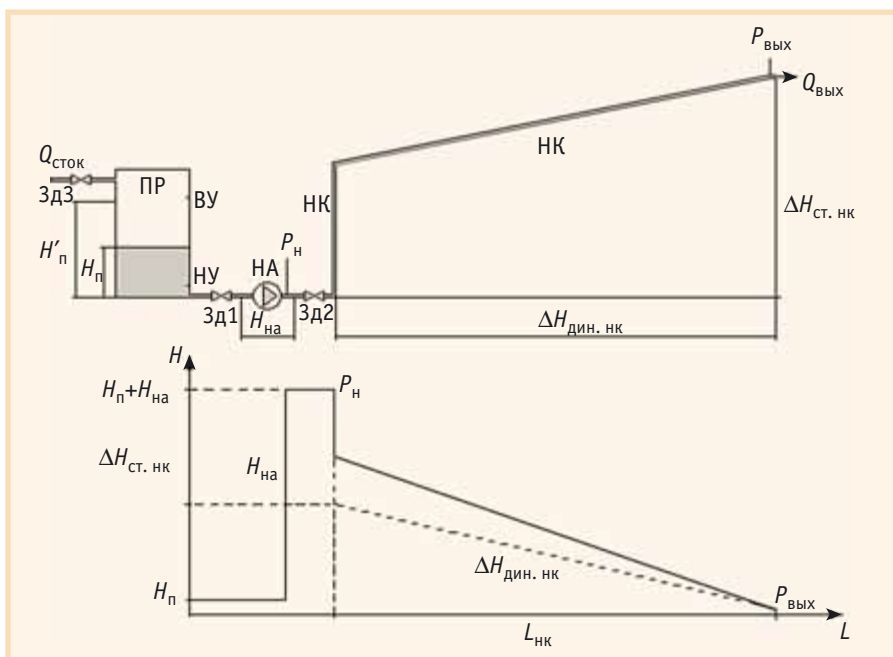
Стоки с расходом $Q_{сток}$ поступают в приёмный резервуар ПР. Далее стоки с расходом $Q_{вых}$ перекачиваются насосом НА через напорный коллектор.

Энергию для перекачивания стоков (полезную энергию) за определённое время (например, за час) можно определить как произведение массы стоков на геометрическую высоту подъёма за вычетом давления, создаваемого уровнем в приёмном резервуаре $H_{п}$:

$$W_{сток} = (\Delta H_{ст.нк} - H_{п}) \cdot Q_{сток} \cdot g, \quad (1)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Здесь и далее параметры, соответствующие напору или давлению (потере давления), выражены в метрах водяного столба.

Расход поступающих стоков носит переменный характер и зависит от многих факторов: времени года, дня недели, времени суток. Производительность насосного агрегата рассчитывается на максимальный расход с запасом, поэтому расход $Q_{вых}$ больше $Q_{сток}$.



Условные обозначения:

Зд1, Зд2, Зд3 — задвижки; ПР — приёмный резервуар; НА — насосный агрегат; НК — напорный коллектор; ВУ — верхний уровень; НУ — нижний уровень.

Рис. 1. Упрощённая технологическая схема КНС

В общем случае затрачиваемую энергию для перекачивания стоков можно определить как произведение массы стоков на разность давления за насосным агрегатом P_H и давления, создаваемого уровнем в приёмном резервуаре H_{Π} , и на долю рабочего времени насосного агрегата $T_{на}$ в рассматриваемом временном интервале (например, в течение часа):

$$W_{затр} = (P_H - H_{\Pi}) \cdot Q_{\text{вых}} \cdot g \cdot T_{на} \quad (2)$$

Возникает вопрос о значении H_{Π} в повторно-кратковременном режиме. При работе насосного агрегата уровень в приёмном резервуаре изменяется от ВУ (верхнего уровня) в момент включения до НУ (нижнего уровня) в момент отключения. Динамика изменения уровня в приёмном резервуаре при работающем насосе также зависит от расхода стоков (например, при пиковом расходе насос работает постоянно и уровень близок к ВУ). Следует отметить, что независимо от гидравлических параметров сети энергия, затрачиваемая насосным агрегатом для перекачивания одного и того же объёма стоков, в повторно-кратковременном режиме при НУ ниже, чем при ВУ, так как при НУ динамические потери меньше. Разница может достигать 10% и более в зависимости от характеристик сети. Поэтому для оценки и сопоставления величин энергии, затраченной в разных режимах, в случае повторно-кратковременного режима следует рассматривать работу насосного агрегата при уровне в приёмном резервуаре H_{Π} , равном НУ, то есть при уровне, характеризующемся минимальными затратами энергии.

В идеальном случае должно сохраняться равенство затрачиваемой и полезной энергии на перекачивание стоков. На практике, к сожалению, этого не получается. Попробуем разобраться, как уменьшить затрачиваемую энергию.

Давление за насосным агрегатом P_H складывается из трёх составляющих: перепада высот напорного коллектора $\Delta H_{\text{ст. нк}}$, давления на выходе напорного коллектора $P_{\text{вых}}$ и динамических потерь давления в напорном коллекторе $\Delta H_{\text{дин. нк}}$.

Динамические потери пропорциональны квадрату расхода $Q_{\text{вых}}$. Очевидно, что при равенстве $Q_{\text{вых}} = Q_{\text{сток}}$ динамические потери будут минимально возможными. Давление на выходе напорного коллектора $P_{\text{вых}}$ необ-

ходимо для «проталкивания» расхода $Q_{\text{вых}}$ через выходное сечение. При снижении расхода $Q_{\text{вых}}$ давление $P_{\text{вых}}$ уменьшается.

Таким образом, необходимую энергию для перекачивания стоков можно снизить за счёт снижения расхода $Q_{\text{вых}}$ до величины расхода стоков $Q_{\text{сток}}$. Насосный агрегат при этом будет работать постоянно с расходом $Q'_{\text{вых}} = Q_{\text{сток}}$, уровень в приёмной ёмкости будет постоянным, равным H'_{Π} . При этом давление P'_H будет меньше P_H на величину разницы динамических потерь при расходе $Q'_{\text{вых}}$ и $Q_{\text{сток}}$. Одним из способов достижения равенства расходов $Q'_{\text{вых}}$ и $Q_{\text{сток}}$ является применение частотного регулирования.

Затрачиваемую энергию для перекачивания стоков при частотном регулировании можно определить как произведение массы стоков на разность давления за насосным агрегатом и давления, создаваемого уровнем в приёмном резервуаре H'_{Π} :

$$W'_{затр} = (P'_H - H'_{\Pi}) \cdot Q'_{\text{вых}} \cdot g, \quad (3)$$

где P'_H — давление за насосным агрегатом при частотном регулировании.

При оценке эффективности частотного регулирования необходимо учитывать гидравлические характеристики сети и расход стоков.

Сравним выражения затрачиваемых энергий на перекачивание стоков при повторно-кратковременном и частотном режимах, то есть выражения (2) и (3), соответственно. Правые части этих выражений фактически представлены массой стоков, перекачанных за определённое время с давлением P_H для повторно-кратковременного режима (здесь дополнительно учитывается доля рабочего времени $T_{на}$) и с давлением P'_H для режима частотного регулирования. Запишем отношение затрачиваемых энергий на перекачивание стоков, соответствующих обоим режимам:

$$\begin{aligned} \frac{W_{затр}}{W'_{затр}} &= \frac{(P_H - H_{\Pi}) \cdot Q_{\text{вых}} \cdot g \cdot T_{на}}{(P'_H - H'_{\Pi}) \cdot Q'_{\text{вых}} \cdot g} = \\ &= \frac{P_H - H_{\Pi}}{P'_H - H'_{\Pi}} = \frac{\Delta H_{\text{дин. нк}} + \Delta H_{\text{ст. нк}} + P_{\text{вых}} - H_{\Pi}}{\Delta H'_{\text{дин. нк}} + \Delta H_{\text{ст. нк}} + P'_{\text{вых}} - H'_{\Pi}} = \\ &= \frac{\Delta H_{\text{дин. нк}} + \Delta H_{\text{ст. нк}} - H_{\Pi}}{\Delta H'_{\text{дин. нк}} + \Delta H_{\text{ст. нк}} - H'_{\Pi}} \quad (4) \end{aligned}$$

Ввиду относительно небольшой величины давления на выходе напорного коллектора значениями $P_{\text{вых}}$ и $P'_{\text{вых}}$

можно пренебречь и считать их равными нулю. Кроме того, здесь учтено, что $Q'_{\text{вых}} = Q_{\text{вых}} \cdot T_{на}$.

Выражение (4) показывает, во сколько раз применение частотного регулирования будет выгодней повторно-кратковременного режима работы. Разница между динамическими составляющими потерь давления является квадратичной функцией от расхода. Следовательно, экономия энергии будет тем больше, чем меньше будет расход при частотном регулировании, то есть чем меньше отношение $Q'_{\text{вых}}/Q_{\text{вых}}$. С другой стороны, чем больше перепад высот напорного коллектора, тем меньше отношение затрачиваемых энергий при неизменной сумме статических и динамических потерь напора — значит, экономия энергии будет выше при меньшем перепаде высот напорного коллектора. В приёмном резервуаре при частотном регулировании может поддерживаться любой уровень от НУ до ВУ, и, как видно из (4), повышение уровня H'_{Π} увеличивает экономию энергии.

Возвращаясь к технологической схеме КНС, можем сделать вывод, что выражение (4) будет максимальным при больших динамических потерях $\Delta H_{\text{дин. нк}}$, то есть длинном напорном коллекторе, малом перепаде высот напорного коллектора $\Delta H_{\text{ст. нк}}$ и уровне H'_{Π} , равном ВУ.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСНОГО АГРЕГАТА ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Ранее P_H было охарактеризовано как давление, необходимое для покрытия гидравлических потерь; в то же время P_H можно представить как сумму давления, создаваемого уровнем в приёмном резервуаре P_{Π} , и давления, развиваемого насосом $P_{на}$:

$$P_H = P_{\Pi} + P_{на} \quad (5)$$

Соответствующим образом, используя H'_{Π} и $H'_{на}$, можно записать формулу для P'_H при частотном регулировании, которая будет аналогична формуле (5).

Рассмотрим характеристику $Q-H$ насоса при работе с гидравлической сетью (рис. 2). Рабочая точка A соответствует повторно-кратковременному режиму работы насоса и одновременно олицетворяет собой частный слу-

чай частотного режима при $Q_{\text{сток}} = Q_{\text{вых}}$ (работа насоса с номинальной частотой вращения). При снижении расхода стоков до значения $Q'_{\text{вых}}$ рабочая точка смещается влево и вниз по характеристике сети. Как видно из графика, смещение рабочей точки по вертикали сопряжено с динамическими потерями в напорном коллекторе.

Полезная энергия насоса в повторно-кратковременном режиме определяется как произведение давления, развиваемого насосом, на расход:

$$W_{\text{на. полезная}} = P_{\text{на}} \cdot Q_{\text{вых}} \cdot g \quad (6)$$

Полезная энергия в режиме частотного регулирования ($W'_{\text{на. полезная}}$) определяется по формуле, аналогичной формуле (6), с использованием соответственно $P'_{\text{на}}$ и $Q'_{\text{вых}}$.

С учётом КПД насоса полную энергию насосного агрегата в повторно-кратковременном режиме и в режиме частотного регулирования представим соответственно как:

$$W_{\text{на}} = \frac{P_{\text{на}} \cdot Q_{\text{вых}} \cdot g \cdot T_{\text{на}}}{\eta} \quad (7)$$

$$W'_{\text{на}} = \frac{P'_{\text{на}} \cdot Q'_{\text{вых}} \cdot g}{\eta'} \quad (8)$$

где η — КПД насоса в повторно-кратковременном режиме при расходе $Q_{\text{вых}}$ и частоте вращения $n_{\text{вых}}$; η' — КПД насоса в режиме частотного регулирования при расходе $Q'_{\text{вых}}$ и частоте вращения $n'_{\text{вых}}$.

Для оценки экономии сравним полные энергии насоса при повторно-кратковременном (7) и частотном (8) режимах работы, аналогично тому, как это сделано в (4):

$$\begin{aligned} \frac{W_{\text{на}}}{W'_{\text{на}}} &= \frac{P_{\text{на}} \cdot Q_{\text{вых}} \cdot g \cdot T_{\text{на}} \cdot \eta'}{P'_{\text{на}} \cdot Q'_{\text{вых}} \cdot g \cdot T_{\text{на}} \cdot \eta} = \\ &= \frac{P_{\text{на}}}{P'_{\text{на}}} \cdot \frac{\eta'}{\eta} \quad (9) \end{aligned}$$

Как видно из выражения (9), экономия энергии зависит от отношения давлений и значений КПД насоса в разных режимах. Отношение давлений, развиваемых насосом, характеризует экономию, достигаемую за счёт снижения гидравлических потерь.

Влияние отношения коэффициентов полезного действия насоса рассмотрим

более подробно, используя рис. 3 и 4.

Рабочая точка A (рис. 3) соответствует повторно-кратковременному режиму работы насоса с расходом $Q_{\text{вых}}$. Рабочие точки $A1'$ и $A2'$ соответствуют режиму частотного регулирования, каждая из них характеризуется своим расходом $Q'_{\text{вых}1}$ и $Q'_{\text{вых}2}$. Как видно из графика, при снижении расхода уменьшается давление на выходе насоса, а рабочая точка смещается по характеристике сети из точки A в точку $A1'$ (для расхода $Q'_{\text{вых}1}$) и в точку $A2'$ (для расхода $Q'_{\text{вых}2}$). При этом коэффициент полезного действия насоса снижается [1]. Теперь рассмотрим, как изменяется соотношение затрачиваемых энергий при изменении расхода стоков с учётом снижения КПД насосного агрегата в режиме частотного регулирования (рис. 4). Рабочая точка A на графике соответствует ситуации, когда расход стоков равен производительности насоса при повторно-кратковременном режиме (насос работает постоянно). Затрачиваемая энергия в этом случае пропорциональна расходу $Q_{\text{сток}}$ (с увеличением $Q_{\text{сток}}$ режим работы насоса не изменяется, а время работы увеличивается). При частотном регулировании затрачиваемая энергия не линейна: с одной стороны, при снижении расхода $Q_{\text{сток}}$ снижаются динамические потери сети, с другой стороны — увеличиваются потери в насосе, то есть падает его коэффициент полезного действия. При определённом расходе $Q_{\text{сток min}}$ значения затрачиваемой энергии для обоих режимов становятся равными (точка $A3$).

При расходе стоков меньше $Q_{\text{сток min}}$ затрачиваемая энергия в режиме частотного регулирования больше, чем в повторно-кратковременном режиме. Очевидно, что затрачиваемая энергия в режиме

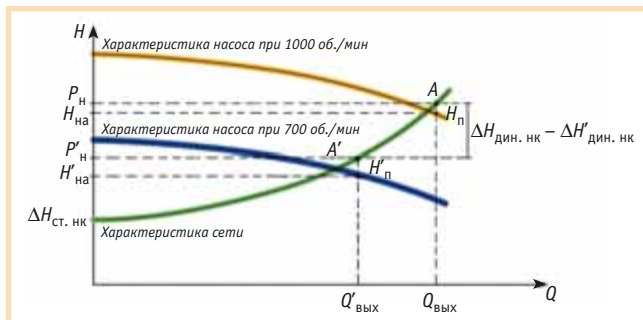


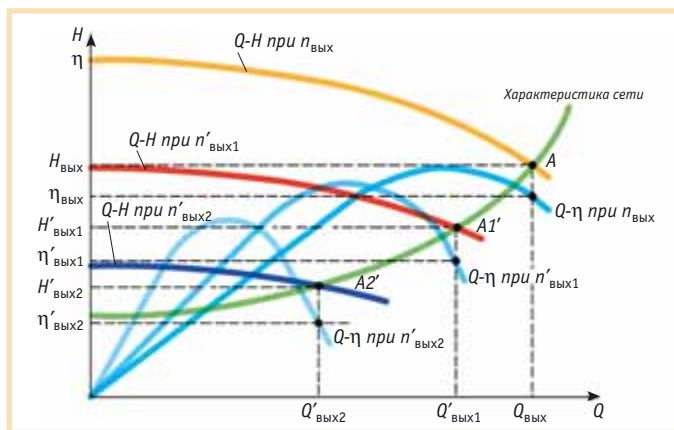
Рис. 2. Характеристики Q-H насосного агрегата и сети при частотном регулировании

частотного регулирования будет меньше, чем в повторно-кратковременном режиме, при расходе больше, чем $Q_{\text{сток min}}$, но при этом меньше, чем $Q_{\text{на}}$:

$$Q_{\text{сток min}} < Q_{\text{сток}} < Q_{\text{на}} \quad (10)$$

Максимальная экономия энергии при частотном регулировании, по сравнению с повторно-кратковременным режимом, будет при некотором расходе $Q'_{\text{опт. вых}}$. Снижение экономии энергии наблюдается при расходе меньше, чем $Q'_{\text{опт. вых}}$, за счёт уменьшения коэффициента полезного действия насоса и при расходе больше, чем $Q'_{\text{опт. вых}}$, за счёт увеличения динамических потерь.

Вернемся к режимам работы КНС. Рассматривая потери гидравлической сети и энергетические характеристики насоса, мы пришли к выводу, что при некотором оптимальном расходе $Q'_{\text{опт. вых}}$ частотное регулирование наиболее экономично. В то же время расход поступающих стоков изменяется во времени и не равен оптимальному расходу $Q'_{\text{опт. вых}}$. Как в этих условиях добиться максимальной экономии? Оче-



Условные обозначения:

$H_{\text{вых}}$ — напор, создаваемый на выходе насосного агрегата ($P_{\text{на}}$);
 $\eta_{\text{вых}}$ — КПД насосного агрегата при частоте вращения $n_{\text{вых}}$ и расходе $Q_{\text{вых}}$ (η).

Рис. 3. Характеристики Q-H и Q-η насосного агрегата при частотном регулировании

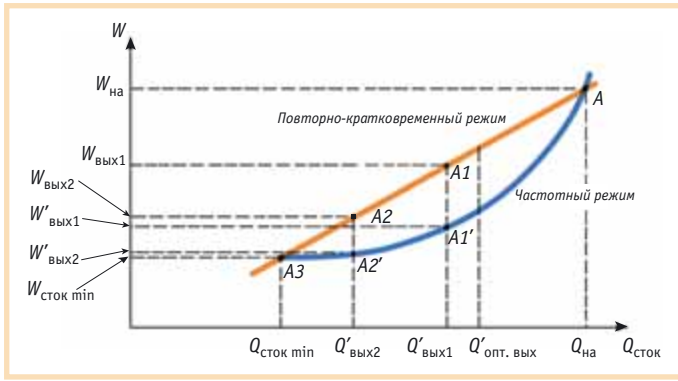


Рис. 4. Характеристики $Q-W$ насоса при повторно-кратковременном и частотном режимах работы

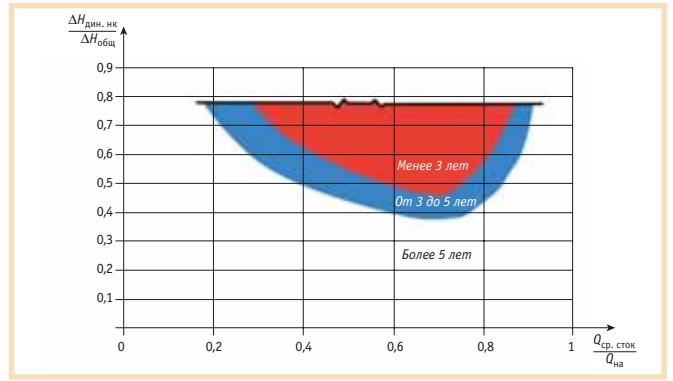


Рис. 5. Условия эффективного применения частотного регулирования на КНС (по критерию срока окупаемости преобразователя частоты)

видно, что при расходе больше, чем оптимальный расход $Q'_{\text{опт. вых}}$, нужно поддерживать уровень в приёмном резервуаре ($Q'_{\text{вых}} = Q_{\text{сток}}$). Если расход меньше оптимального расхода $Q'_{\text{опт. вых}}$, более экономичным режимом работы насоса становится режим частотного регулирования с поддержанием расхода $Q'_{\text{опт. вых}}$ при частоте вращения $n_{\text{опт}}$. [2]. Отметим, что при этом насос не будет работать постоянно: подобно работе в повторно-кратковременном режиме, он будет включаться при ВУ и отключаться при НУ.

Полученные оценки эффективности

При средней рыночной стоимости 1 кВт мощности преобразователя частоты 3000 руб. и стоимости 1 кВт электроэнергии 1 руб. для грубой оценки целесообразности применения частотного регулирования можно воспользоваться графиком на рис. 5.

По оси абсцисс отложены значения отношения средних расходов стоков станции к номинальному расходу насоса, а по оси ординат – значения отношения динамических потерь в напорном коллекторе к общим потерям (сумме статических и динамических потерь). На графике представлены две кривые, характеризующие окупаемость преобразователя частоты за 3 года (верхняя кривая) и за 5 лет (нижняя кривая). Эти кривые образуют в поле графика три области, соответствующие условиям (соотношениям значений параметров), при которых обеспечивается окупаемость преобразователя частоты за (сверху вниз) 3 года, 5 лет и срок более 5 лет.

Как видно из графика, эффективность применения частотного регулирования, выраженная через срок окупаемости, зависит как от динамических потерь давления в напорном кол-

лекторе, так и от средних расходов стоков. Срок окупаемости может быть одинаковым при разных соотношениях данных параметров. Как правило, при рассмотрении вопроса применения частотного регулирования на КНС руководствуются сроком окупаемости преобразователя частоты 3 года. Полученные результаты говорят о том, что для такого срока окупаемости динамические потери должны быть больше статических потерь, а средние расходы стоков должны быть близки к 50-70% от производительности насоса.

Данный график был построен с использованием математической модели насосного агрегата, учитывающей особенности работы при переменных частотах вращения центробежного насоса и асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, а также посредством моделирования значений параметров гидравлической сети ($\Delta H_{\text{ст. нк}}$ и $\Delta H_{\text{дин. нк}}$ при неизменной их сумме) для переменных расходов стоков.

Несколько слов о математической модели насосного агрегата. Моделированию работы асинхронного электродвигателя при ненормальных частотах посвящено много учебников и публикаций. Что касается моделирования работы центробежного насоса при ненормальных частотах вращения, тут ситуация совершенно другая. Существующая теория подобия для насосных агрегатов применима лишь для частоты вращения, отличающейся от номинальной величины до 10%. Поэтому при проведении расчётов экономической эффективности используют различные «аналоги» теории подобия. Ситуация усложняется тем, что практически все производители насосов не располагают их характеристиками для ненормальных частот вращения (в лучшем случае для 2/3 от номинальной частоты).

Используемая в расчётах математическая модель насоса является собой тот редкий «лучший случай», когда была реализована возможность подтвердить корректность модели данными, представленными заводом-изготовителем. Причём характеристики насоса при частоте, равной 2/3 от номинальной, отличались от расчётных характеристик не более чем на 5%.

Из приведённых в данной статье расчётов и графиков видно, что определение эффективности применения частотного регулирования является «индивидуальным» и требует в каждом конкретном случае проведения исследования объекта, то есть определения характеристик сети и насосных агрегатов, проведения расчётов с учётом специфики и особенностей объекта и его оборудования.

Данная статья подготовлена под редакцией Владимира Павловича Бугрова. Её публикацией автор отдаёт дань светлой памяти этого замечательного учёного. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов М., Чистяков А. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми электроприводами// Современные технологии автоматизации. — 2001. — № 1.
2. Прокопов А.А., Бакалов А.В., Олейник В.А. Применение низковольтного комплексного устройства СЧР для автоматизации канализационных насосных станций// Теплоэнергоэффективные технологии: Информационный бюллетень. — СПб: ВИТУ, Академический центр теплоэнергоэффективных технологий. — 2003. — № 2 (31).

**Автор — сотрудник
ТЦ «ВЗЛЕТ-Промавтоматика»,
ЗАО «ВЗЛЕТ»
Телефон: (812) 380-8127
Факс: (812) 714-7138**