

Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов КНС

А. П. Усачев*

** Усачев Алексей Павлович, кандидат технических наук, технический директор, ООО «Сибирь-мехатроника» 630087, Россия, г. Новосибирск, а/я 36, тел.: +7 (383) 399-00-55, e-mail: usachev@sibmech.ru*

Рассматривается методика оценки экономии электроэнергии от использования частотного регулирования производительности насосных агрегатов на канализационных насосных станциях. Методика основана на графическом анализе параметров рабочей точки насосов рабочей группы и рассчитана на использование в системах водоотведения, работа которых осуществляется по уровню в приемном резервуаре. Предлагаемая методика оценки эффективности частотного регулирования на канализационных насосных станциях проверена многолетним опытом ее использования и является именно оценочной. Экономия электроэнергии на канализационных насосных станциях существенно ниже, чем на водопроводных. Это относится к системам с регулированием

в режиме «старт-стоп». Данное обстоятельство связано с тем, что эффект от частотного регулирования заключается в снижении скорости движения жидкости в напорном трубопроводе. Эффект проявляется тем сильнее, чем больше динамическая составляющая характеристики сети относительно ее статической составляющей (в диапазоне изменения производительности станции). Практически это встречается крайне редко. Экономия электроэнергии в приведенных примерах с режимом «старт-стоп» не превышает 10% (без учета потерь в преобразователе частоты).

Ключевые слова: канализационная насосная станция, насосный агрегат, частотное регулирование, оценка эффективности, экономия электроэнергии.

Method of evaluating the effectiveness of frequency regulation of the performance of sewage pumping units

A. P. Usachev*

** Usachev Aleksei, Ph. D. (Engineering), Technical Director, «Sibir-Mekhatronika» LLC P. O. Box 36, 630087, Novosibirsk, Russian Federation, tel.: +7 (383) 399-00-55, e-mail: usachev@sibmech.ru*

The method of evaluating energy savings through the use of frequency regulation of the pumping unit performance at sewage pumping stations is considered. The method is based on a graphical analysis of the parameters of the operation point of the pumps in the working group and is developed for the use in sewer networks that operate according to the level in the receiving tank. The proposed method of evaluating the effectiveness of frequency regulation at sewage pumping stations has been proved by many years of experience of using and is precisely evaluative. Energy savings at sewage pumping stations are significantly lower than at water pumping stations. This applies to the systems with start/stop control because the effect of frequency regulation consists in reducing the velocity of fluid in the pressure pipeline. The bigger the dynamic component of the network characteristic in relation to its static component (in the range of the station capacity change), the stronger effect is manifested. In practice, this is extremely rare. The energy savings in the above examples with the start/stop mode does not exceed 10% (excluding the losses in the frequency converter).

Key words: sewage pumping station, pumping unit, frequency regulation, evaluation of effectiveness, energy saving.

Настоящая методика аналогична рассмотренной в статье [1] для водопроводных насосных станций, и относится к системам, работающим по уровню в резервуаре, прежде всего к канализационным насосным станциям. С точки зрения управления насосным оборудованием рассматриваемые системы работают в двух режимах:

с дросселированием (как правило, с помощью напорной задвижки). Насосные агрегаты (прежде всего относительно мощные насосы с высоко-

вольтными двигателями) работают непрерывно, уровень в резервуаре постоянный;

«старт-стоп», насосные агрегаты (прежде всего с двигателями 0,4 кВт и мощностью до 250–315 кВт) включаются по верхнему уровню, отключаются по нижнему, уровень в резервуаре переменный.

Системы, работающие по уровню в резервуаре, в отличие от систем, работающих по давлению, характеризуются тем, что рабочая точка насосов

Режим	Количество насосов, находящихся в работе	Продолжительность режима в году, ч	Производительность станции $Q_{\text{ср.ис}}^* = Q_{\text{ср.ис}}/Q_{\text{нас.ном}}$	Сеть	
				статический напор (относительно уровня в приемном резервуаре) $H_{\text{стат}}^* = H_{\text{стат}}/H_{\text{нас.ном}}$	потери напора в трубопроводе (при $Q_{\text{ср.ис}}^*$) $H_{\text{дин}}^* = H_{\text{дин}}/H_{\text{нас.ном}}$
1	Один насос № 1	8760 (круглый год)	0,7	0,87	0,03
2	Два насоса № 1, 2		1,4	0,87	0,16

Примечание: в относительных единицах к номинальным параметрам насоса.

перемещается не по прямой линии заданного давления, а по характеристике сети. Именно поэтому при расчете необходимо использовать параметры сети (статический напор относительно уровня в приемном резервуаре $H_{\text{стат}}$ и потери напора в сети при данной производительности $H_{\text{дин}}$). В остальном методика остается такой же, что и для систем, работающих по давлению [1]. Методика предполагает выделение нескольких относительно стабильных (прежде всего по производительности) расчетных режимов работы (2–4 режима), характеризующихся постоянным числом насосов, находящихся в работе.

Наиболее трудоемким, как и в системах по давлению [1], является расчет потребляемой мощности всеми насосами, находящимися в работе, при существующей схеме регулирования ($N_{\text{сеть_суш}}^*$) и при частотном регулировании (ЧР) – ($N_{\text{сеть_ЧР}}^*$). Для этого требуется определить параметры рабочей точки каждого насоса (напор, создаваемый насосом, производительность насоса и КПД в рабочей точке). Кроме того, при расчете необходимо учитывать наличие рабочей зоны насоса, выходить за пределы которой крайне не рекомендуется [2; 3].

Рассмотрим вычисление параметров (усредненные значения) рабочей точки каждого насоса для конкретных случаев режима работы КНС по количеству насосов, находящихся в работе: в первом случае один насос, во втором – два (таблица).

Частотное регулирование осуществляется одним насосом, второй насос без ЧР (регулирование его производительности доступно только с помощью дросселирования). Следует отметить, что статический напор сети приведен относительно уровня в приемном резервуаре. Данное обстоятельство позволяет не учитывать напор во всасывающем патрубке насосов, создаваемый уровнем в приемном резервуаре. Режим № 2 соответствует реконструкции по схеме кас-

кадного управления (частотное управление одним насосным агрегатом, остальные – без ЧР).

Рассмотрим системы с дросселированием и системы, работающие в режиме «старт-стоп».

Системы с дросселированием

В системе с дросселированием частотное регулирование принципиально дает экономию электроэнергии за счет устранения потерь на напорной задвижке (с помощью которой, как правило, и осуществляется дросселирование). Величина экономии зависит от режима работы КНС и параметров сети и лежит в диапазоне 20–30%. Предполагается, что в системе с дросселированием, как и в системе с частотным регулированием, уровень в приемном резервуаре является постоянной величиной.

Режим № 1 (количество насосов, находящихся в работе, один)

Упрощенная расчетная технологическая схема режима № 1 приведена на рис. 1, здесь же даны значения напоров при дросселировании и частотном регулировании (в относительных единицах к номинальным параметрам насоса). При этом учтено вышеотмеченное допущение, что

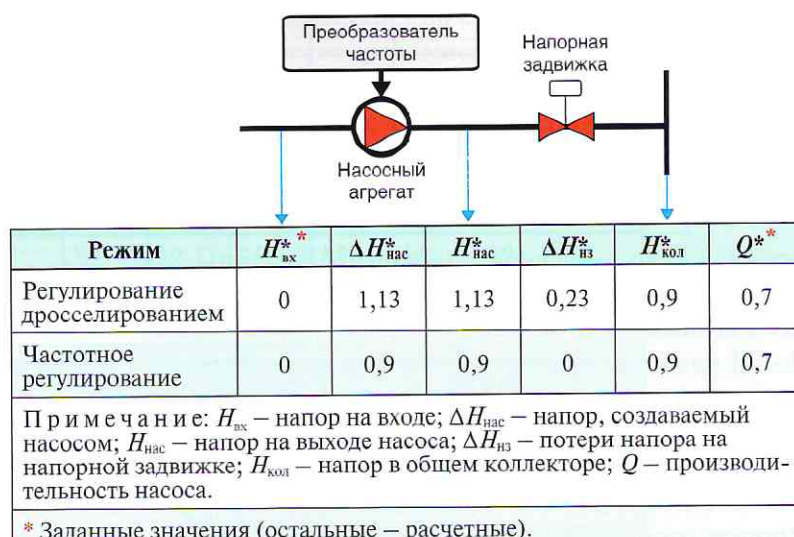


Рис. 1. Упрощенная расчетная технологическая схема режима № 1 (в работе один насос)

рабочих точек насоса $H_{\text{НА}}^*$, $Q_{\text{НА}}^*$ и $\eta_{\text{НА}}^*$. Для этого на напорной характеристике насоса отмечаются рабочие точки $\Delta H_{\text{нас}}^*$ и $Q_{\text{нас}}^*$ существующего режима и режима с частотным регулированием (точки «Д» и «А» соответственно на рис. 2). Координаты рабочей точки насоса существующего режима (точка «Д»): $[\Delta H_{\text{нас}}^*; Q^*] = [1,13; 0,7]$. Координаты рабочей точки насоса при частотном регулировании (точка «А»): $[\Delta H_{\text{нас}}^*; Q^*] = [0,9; 0,7]$. КПД* насоса (в относительных единицах) существующего режима определяется просто — проекцией соответствующей координаты рабочей точки на паспортную кривую КПД (точка «К», $\text{КПД}_{\text{ДР}}^* = 0,94$).

Для определения КПД с частотным регулированием предлагается воспользоваться свойствами подобия напорных характеристик при частотном регулировании [4]. Для этого необходимо построить параболу подобия (точки «О–А–Б»), проходящую через рабочую точку насоса при частотном регулировании до пересечения с паспортной напорной характеристикой насоса (точка «Б»). КПД точки пересечения (так называемая сходственная точка) и будет равен $\text{КПД}_{\text{ЧР}}$ (в данном случае точка «В», $\text{КПД}_{\text{ЧР}}^* = 0,96$). Все сказанное поясняется рис. 2.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети (в относительных единицах), составит:

$$N_{\text{сеть_ДР}}^* = \frac{H_{\text{НА}}^* Q_{\text{НА}}^*}{\eta_{\text{НА}}^* \eta_{\text{дв}}^*} = \frac{1,13 \cdot 0,7}{0,94 \cdot 1} = 0,84; \quad (2)$$

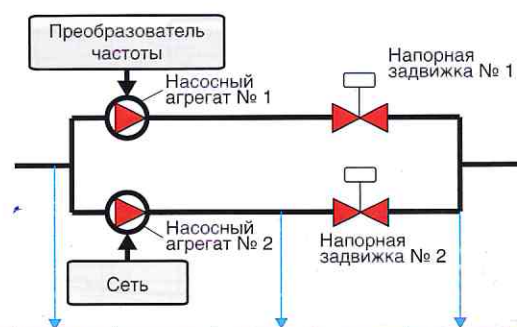
$$N_{\text{сеть_ЧР}}^* = \frac{H_{\text{НА}}^* Q_{\text{НА}}^*}{\eta_{\text{НА}}^* \eta_{\text{дв}}^* \eta_{\text{пч}}^*} = \frac{0,9 \cdot 0,7}{0,96 \cdot 1} = 0,656; \quad (3)$$

$$\Delta N_i^* = N_{\text{сеть_ДР}}^* - N_{\text{сеть_ЧР}}^* = 0,84 - 0,656 = 0,184$$

(22% экономии электроэнергии),

где $H_{\text{НА}}^*$; $Q_{\text{НА}}^*$; $\eta_{\text{НА}}^*$ — координаты рабочей точки насосного агрегата в относительных единицах; $\eta_{\text{дв}}^*$, $\eta_{\text{пч}}^*$, η^* приняты равными 1.

Следует отметить, что рабочая точка насоса не должна выходить за пределы рабочей зоны насоса (зеленый пунктир, точки «О–Е–Ж–О» на рис. 2) [3]. На паспортной напорной характеристике (на рис. 2 выделена черным цветом) ра-



Режим		$H_{\text{вх}}^*$	$\Delta H_{\text{нас}}^*$	$H_{\text{нас}}^*$	$\Delta H_{\text{пз}}^*$	$H_{\text{кол}}^*$	Q^*
ДР	Регулирование дросселированием; НА-1	0	1,13	1,13	0,1	1,03	0,7
	Регулирование дросселированием; НА-2	0	1,13	1,13	0,1	1,03	0,7
ЧР	Частотное регулирование; НА-1	0	1,03	1,03	0	1,03	0,47
	Без частотного регулирования; НА-2	0	1,03	1,03	0	1,03	0,93

* Заданные значения (остальные — расчетные).

Рис. 3. Упрощенная расчетная технологическая схема режима № 2 (в работе два насоса, НА-1 — с ЧР, НА-2 — без ЧР; напорные задвижки полностью открыты)

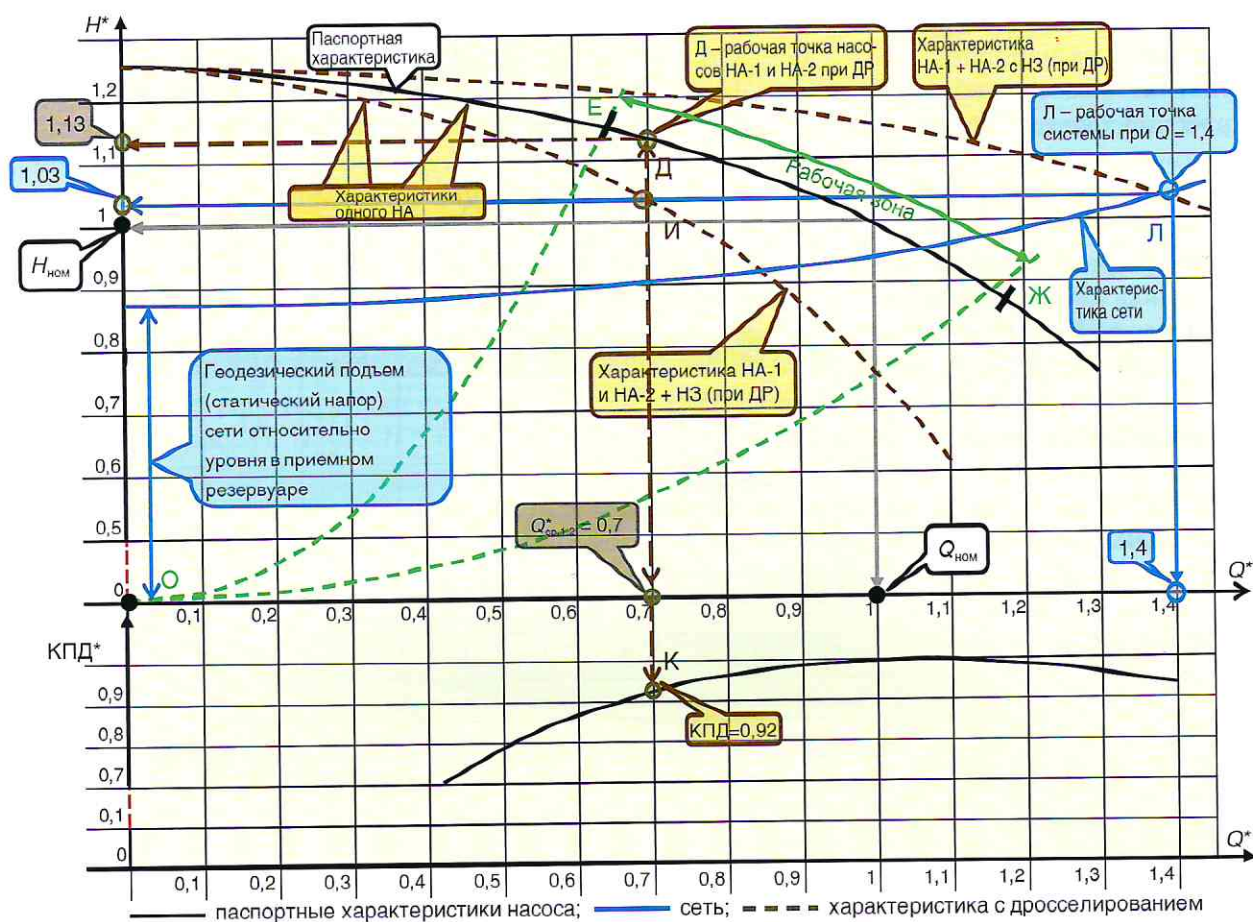
бочая зона обычно отмечается в виде диапазона (точки «Е–Ж»). Границы рабочей зоны изменяются при изменении частоты вращения рабочего колеса по соответствующим параболом [2]. В рассматриваемом случае рабочие точки насоса лежат в рабочей зоне насоса.

Режим № 2 (количество насосов, находящихся в работе, два; один с частотным регулированием, другой без частотного регулирования)

Упрощенная расчетная технологическая схема режима приведена на рис. 3, здесь же даны значения напоров при существующем регулировании дросселированием и частотном регулировании (при частотном регулировании напорные задвижки обоих насосов полностью открыты). На рис. 3 и 4 учтено, что при существующем режиме дросселированием нагрузка насосов выровнена (одинаковая).

При частотном регулировании одним насосом НА-1 режим второго насоса НА-2 определяется положением его напорной задвижки (НЗ). В приведенном примере напорная задвижка НА-2 полностью открыта (рис. 5).

Следует отметить, что в определенных случаях при полностью открытой задвижке насос может оказаться в зоне перегрузки (если точка «Л» на рис. 5 окажется ниже номинального напора насоса). Во избежание этого напорная задвижка НА-2 должна быть прикрыта до состояния не



Режим		Параметры рабочей точки насоса (режим № 2: $Q_{ср}^* = 1,4$)		
		Q^*	$H_{нас}^*$	КПД
ДР	Существующий режим с дросселированием, НА-1 и НА-2	$1,4/2 = 0,7$	1,13	0,92

Рис. 4. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме № 2 при существующем режиме дросселированием (в работе два насоса, оба выровнены)

более номинальной нагрузки насосного агрегата [4; 5]. Это может быть сделано либо ручным способом с помощью оператора (ориентируясь по токовой нагрузке приводного электродвигателя), либо автоматически с помощью блока управления запорно-регулирующей арматуры серии СР200.

В рассматриваемом примере при частотном регулировании координаты рабочей точки НА-2 (насос без ЧР) будут $[\Delta H_{нас2}^*; Q_{нас2}^*; КПД_{нас2}^*] = [1,03; 0,93; 0,99]$. НА-1 (насос с ЧР) при этом будет загружен по производительности на $Q_{нас1}^* = 1,4 - 0,93 = 0,47$, и координаты его рабочей точки будут $[\Delta H_{нас1}^*; Q_{нас1}^*; КПД_{нас1}^*] = [1,03; 0,47; 0,77]$.

Для существующего режима с учетом, что нагрузка насосов выровнена, координаты рабочей точки будут $[\Delta H_{нас}^*; Q_{нас}^*; КПД_{нас}^*] = [1,13; 0,7; 0,92]$. Сказанное поясняется рис. 4 и 5.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети, составит:

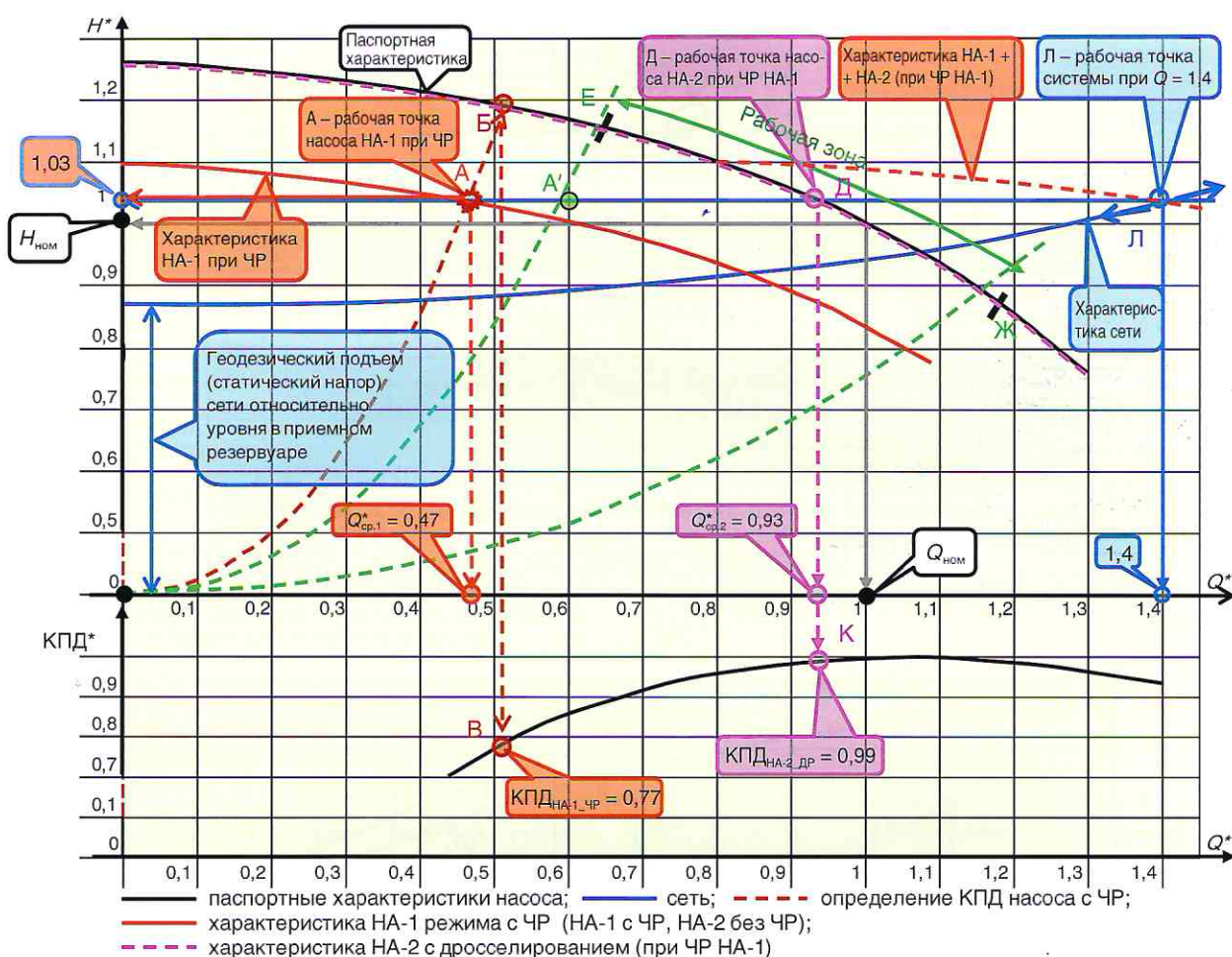
$$N_{сеть_ДР}^* = 2 \frac{H_{НА}^* Q_{НА}^*}{\eta_{НА}^* k \eta_{дв}^*} = 2 \frac{1,13 \cdot 0,7}{0,92 \cdot 1} = 1,72; \quad (4)$$

$$N_{сеть_ЧР}^* = \frac{H_{НА1}^* Q_{НА1}^*}{\eta_{НА1}^* k \eta_{дв}^* \eta_{пч}^*} + \frac{H_{НА2}^* Q_{НА2}^*}{\eta_{НА2}^* k \eta_{дв2}^*} = \frac{1,03 \cdot 0,47}{0,77 \cdot 1} + \frac{1,03 \cdot 0,93}{0,99} = 1,597; \quad (5)$$

$$\Delta N_i^* = N_{сеть_ДР}^* - N_{сеть_ЧР}^* = 1,72 - 1,597 = 0,123$$

(7% экономии электроэнергии).

Следует отметить, что рабочая точка насоса НА-1 выходит за пределы рабочей зоны насоса (точка «А» на рис. 5). Такая ситуация встречается довольно часто на практике, когда от насосной станции требуется расход несколько больше, чем производительность одного насоса, и в этом случае устанавливается частотное регулирование на один из насосов. Данная ситуация описана в работе [5]. Для ее устранения предлагается спе-



Параметр		Параметры рабочей точки насоса (режим № 2: $Q_{ср}^* = 1,4$)		
		Q^*	$H_{нас}^*$	КПД
ЧР	НА-1 с частотным регулированием	$1,4 - 0,93 = 0,47$	1,03	0,77
	НА-2 – от сети (напорная задвижка открыта)	0,93	1,03	0,99

Рис. 5. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме № 2 при частотном регулировании НА-1 (в работе два насоса, НА-1 – с ЧР, НА-2 – без ЧР; напорные задвижки полностью открыты)

циальный алгоритм, суть которого заключается в следующем: «Задвижку насоса НА-2 приоткрывают на величину, при которой рабочая точка насоса с частотным регулированием (НА-1) будет находиться в районе левой границы рабочей области (в точке «А» на рис. 5)».

Системы с режимом «старт-стоп»

Предполагается, что в системе с режимом «старт-стоп» уровень в приемном резервуаре есть величина переменная (уровни включения и выключения насосов разные: уровень включения обычно максимален, уровень выключения минимален). В системе с частотным регулированием уровень в приемном резервуаре есть величина постоянная. Рассмотрение проводится для той же абстрактной КНС с параметрами таблицы.

Режим № 1 (количество насосов, находящихся в работе, один)

Упрощенная расчетная технологическая схема режима приведена на рис. 6, здесь же даны значения напоров при регулировании в режиме «старт-стоп» и частотном регулировании (в относительных единицах к номинальным параметрам насоса).

Для режима «старт-стоп» все значения в таблице приведены при среднем уровне в резервуаре. Для режима с частотным регулированием все значения в таблице приведены при верхнем уровне в резервуаре. Значение Q^* определяется режимом КНС и числом насосных агрегатов, находящихся в работе (таблица). Расчетные значения Q_{max}^* , $\Delta H_{нас}^*$, $H_{нас}^*$, $\Delta H_{нз}^*$ и $H_{кол}^*$ определяются следующим образом.

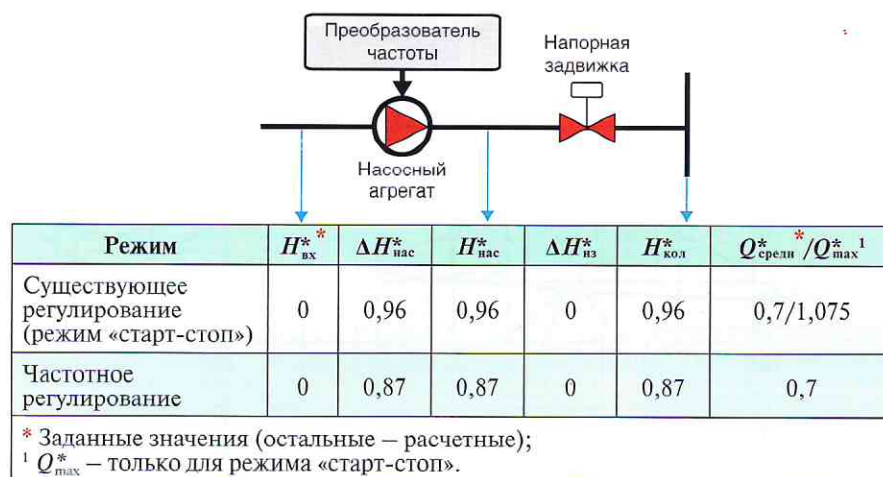
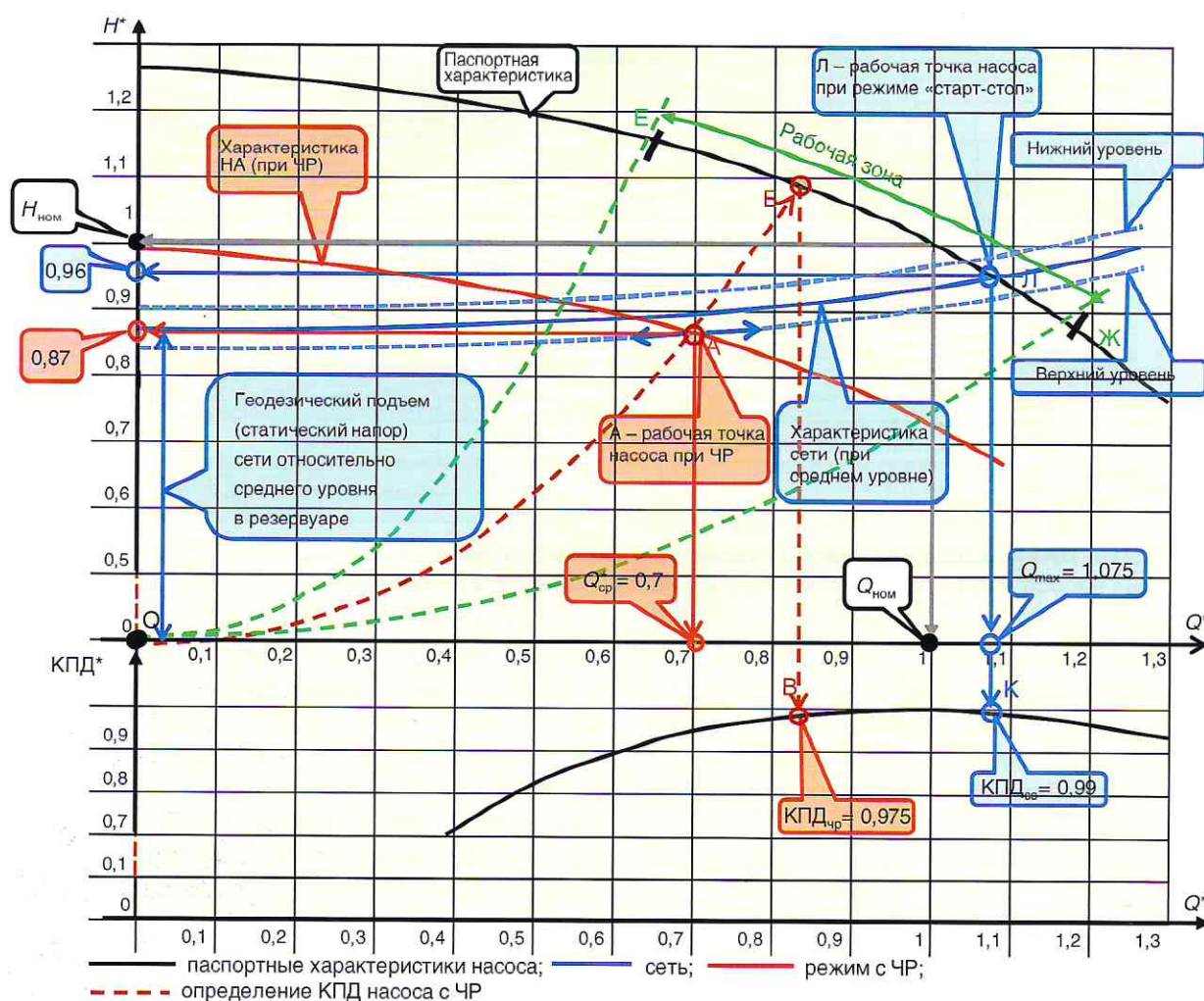


Рис. 6. Упрощенная расчетная технологическая схема режима КНС № 1 (в работе один насос)



Режим	Параметры рабочей точки насоса (режим № 1: $Q_{ср}^* = 0,7$)		
	Q^*	$H_{нас}^*$	КПД
Существующий режим «старт-стоп»	1,075	0,96	0,99
С частотным регулированием	0,7	0,87	0,975

Рис. 7. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме № 1 (в работе один насос) при режиме «старт-стоп» и частотном регулировании

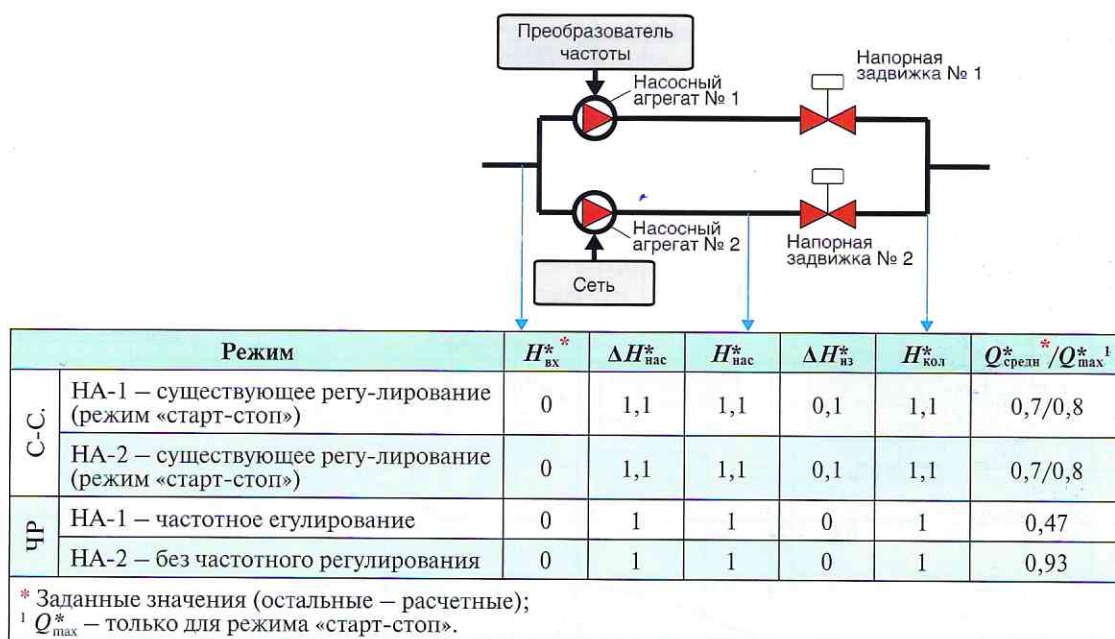


Рис. 8. Упрощенная расчетная технологическая схема режима № 2 (в работе два насоса, НА-1 – с ЧР, НА-2 – без частотного регулирования)

При режиме «старт-стоп» (С-С): Q_{max}^* – точка пересечения характеристики сети (при среднем уровне в резервуаре) и суммарной напорной характеристики работающих насосов; $\Delta H_{нас}^*$ – параметр рабочей точки насоса (по графику паспортной характеристики при $Q = Q_{max}^*$ с учетом числа насосов, находящихся в работе); $H_{кол}^*$ – параметр рабочей точки сети при $Q = Q_{max}^*$, $H_{нас}^* = \Delta H_{нас}^*$, $\Delta H_{нз}^* = H_{нас}^* - H_{кол}^*$.

При частотном регулировании: $\Delta H_{нз}^* = 0$; $H_{кол}^* = H_{нас}^* = \Delta H_{нас}^*$, так как $H_{вх}^* = 0$ и $\Delta H_{нз}^* = 0$. Мощность, потребляемая из сети, определяется аналогичным образом, что и при дросселировании, выражением (1).

При режиме «старт-стоп» производительность и напор сети изменяются в процессе работы насоса из-за изменения уровня в резервуаре. При включении насоса по верхнему уровню в резервуаре производительность максимальная, а напор минимальный. При выключении насоса по нижнему уровню в резервуаре производительность минимальная, а напор максимальный. Функции изменения производительности и напора в процессе изменения уровня нелинейные. Однако для инженерных расчетов вполне допустимо производить расчет по средним значениям параметров точки пересечения характеристики сети (при среднем уровне в резервуаре) и напорной характеристике насоса.

Таким образом, при режиме «старт-стоп» $N_{сеть_С-С}^* = \gamma N_{сеть}^*$, где $\gamma = Q_{средн}^*/Q_{max}^*$, $N_{сеть}^*$ – мощность, потребляемая из сети, в режиме «старт-стоп» при работе насосов (в импульсе).

Для расчета потребления мощности из сети $N_{сеть_С-С}^*$ и $N_{сеть_ЧР}^*$ необходимо знать координаты рабочих точек насоса $H_{НА}^*$, $Q_{НА}^*$ и $\eta_{НА}^*$. Для этого на напорной характеристике насоса отмечаются рабочие точки $H_{НА}^*$ и $Q_{НА}^*$ существующего режима (в импульсе) и режима с частотным регулированием (рис. 7). Координаты рабочей точки насоса существующего режима (точка «Л»): $[\Delta H_{нас}^*; Q_{нас}^*] = [0,96; 1,075]$. Координаты рабочей точки насоса при частотном регулировании (точка «А»): $[\Delta H_{нас}^*; Q_{нас}^*] = [0,87; 0,7]$. КПД* насоса существующего режима (в импульсе) определяется просто – проекцией соответствующей координаты рабочей точки на кривую КПД (точка «К», $KPD_{С-С}^* = 0,99$). КПД с частотным регулированием определяется по сходственной точке «Б» (аналогично вышерассмотренному, в данном случае точка «В»), $KPD_{ЧР}^* = 0,975$. Все сказанное поясняется рис. 7.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети, будет:

$$N_{сеть_С-С}^* = \gamma \frac{H_{НА}^* Q_{НА}^*}{\eta_{НА}^* \eta_{дв}^*} = \frac{0,7}{1,075} \cdot \frac{1,13 \cdot 0,7}{0,94 \cdot 1} = 0,679; \quad (6)$$

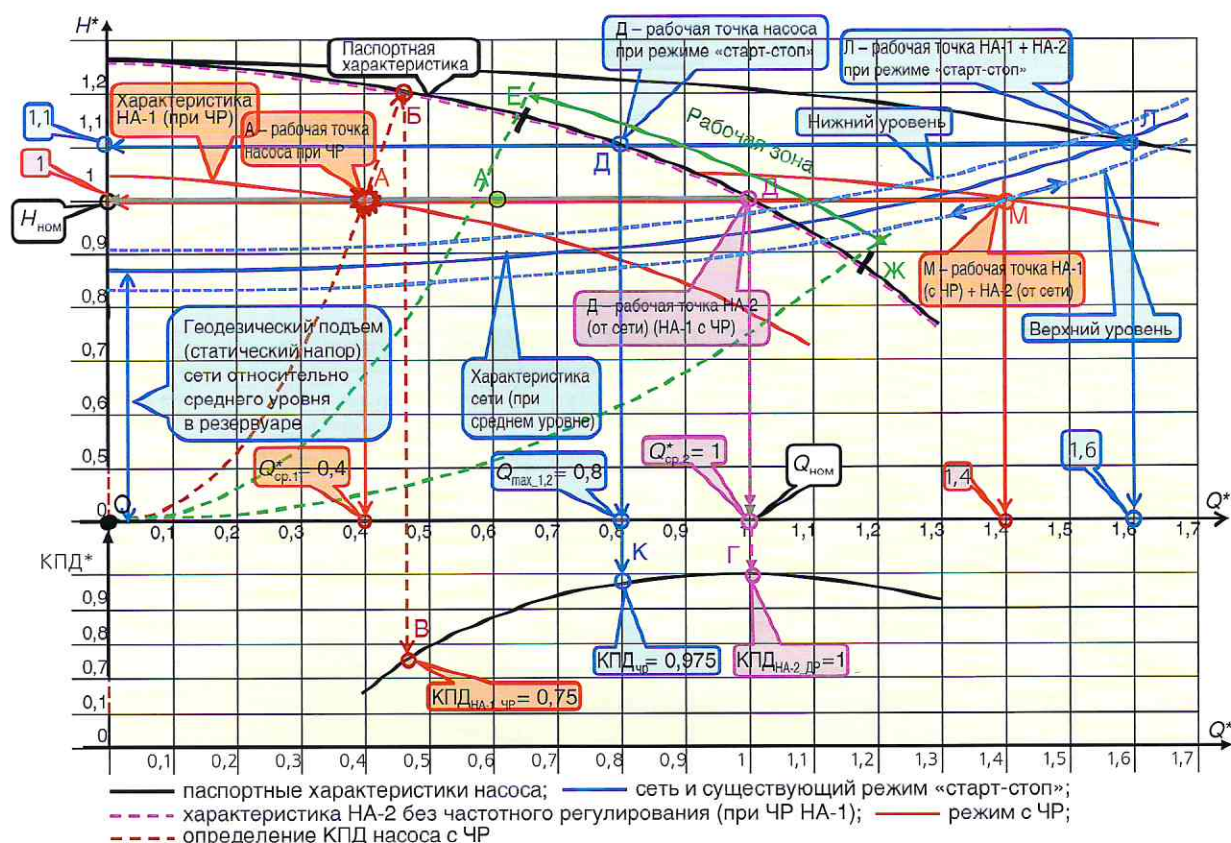
$$N_{сеть_ЧР}^* = \frac{H_{НА}^* Q_{НА}^*}{\eta_{НА}^* \eta_{дв}^* \eta_{пч}^*} = \frac{0,87 \cdot 0,7}{0,975 \cdot 1} = 0,625; \quad (7)$$

$$\Delta N_i^* = N_{сеть_С-С}^* - N_{сеть_ЧР}^* = 0,679 - 0,625 = 0,054$$

(8% экономии электроэнергии),

где $\eta_{дв}^*$, $\eta_{пч}^*$, k приняты равными 1.

Следует отметить, что рабочая точка насоса не должна выходить за пределы рабочей зоны насо-



Режим		Параметры рабочей точки насоса (режим № 2: $Q_{\text{ср}}^* = 1,4$)		
		Q^*	$H_{\text{нас}}^*$	КПД
С-С	НА-1 и НА-2 – существующий режим «старт-стоп»	$1,6/2 = 0,8$	1,1	0,975
ЧР	НА-1 с частотным регулированием	$1,4 - 1 = 0,4$	1	0,75
	НА-2 без частотного регулирования (напорная задвижка открыта)	1	1	1

Рис. 9. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме № 2 при существующем режиме «старт-стоп» и частотном регулировании (в работе два насоса, НА-1 – с ЧР, НА-2 – без ЧР)

са. В рассматриваемом случае рабочие точки насоса лежат в рабочей зоне насоса.

Режим № 2 (количество насосов, находящихся в работе два; один с частотным регулированием, другой без частотного регулирования)

Упрощенная расчетная технологическая схема режима приведена на рис. 8, здесь же даны значения напоров при регулировании в режиме «старт-стоп» и частотном регулировании. В таблице учтено, что при существующем режиме «старт-стоп» загрузка насосов выровнена (одинаковая).

При частотном регулировании одним насосом НА-1 режим второго насоса НА-2 определяется положением его напорной задвижки. В приведенном примере напорная задвижка полностью открыта. Следует отметить, что в определенных случаях при полностью открытой за-

движке насос может оказаться в зоне перегрузки (если точка «М» на рис. 9 окажется ниже номинального давления насоса). Во избежание этого напорная задвижка НА-2 должна быть прикрыта до состояния не более номинальной нагрузки насосного агрегата [5].

В рассматриваемом примере координаты НА-2 (насос без частотного регулирования) будут $[\Delta H_{\text{нас2}}^*; Q_{\text{нас2}}^*; \text{КПД}_{\text{нас2}}^*] = [1; 1; 1]$. НА-1 (насос с ЧР) при этом будет загружен по производительности на $Q_{\text{нас1}}^* = 1,4 - 1 = 0,4$, и координаты его рабочей точки будут $[\Delta H_{\text{нас1}}^*; Q_{\text{нас1}}^*; \text{КПД}_{\text{нас1}}^*] = [1; 0,4; 0,75]$.

Для существующего режима с учетом, что загрузка насосов выровнена, координаты рабочей точки будут $[\Delta H_{\text{нас}}^*; Q^*; \text{КПД}^*] = [1,1; 0,8; 0,975]$. Сказанное поясняется рис. 9.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети, составит:

$$N_{\text{сеть_С-С}}^* = 2\gamma \frac{H_{\text{HA}}^* Q_{\text{HA}}^*}{\eta_{\text{HA}}^* k \eta_{\text{дв}}^*} = 2 \cdot \frac{0,7}{0,8} \cdot \frac{1,1 \cdot 0,87}{0,975 \cdot 1} = 1,579; \quad (8)$$

$$N_{\text{сеть_ЧР}}^* = \frac{H_{\text{HA1}}^* Q_{\text{HA1}}^*}{\eta_{\text{HA1}}^* k \eta_{\text{дв}}^* \eta_{\text{пч}}^*} + \frac{H_{\text{HA2}}^* Q_{\text{HA2}}^*}{\eta_{\text{HA2}}^* k \eta_{\text{дв2}}^*} = \frac{1 \cdot 0,4}{0,75 \cdot 1} + \frac{1 \cdot 1}{1} = 1,533; \quad (9)$$

$$\Delta N_i^* = N_{\text{сеть_С-С}}^* - N_{\text{сеть_ЧР}}^* = 1,579 - 1,533 = 0,046$$

(2,9% экономии электроэнергии).

Следует отметить, что рабочая точка насоса НА-1 выходит за пределы рабочей зоны насоса (точка «А» на рис. 9). Здесь может быть использован такой же алгоритм, как и в разделе «Режим № 2».

Выводы

Предлагаемая методика оценки эффективности частотного регулирования на канализационных насосных станциях проверена многолетним опытом ее использования и является именно оценочной. Методика наглядна и вполне применима на практике. Получение исходной информации от эксплуатирующего персонала не вызывает затруднений. Экономия электроэнергии на канализационных насосных станциях существенно ниже, чем на водопроводных [1]. Это относится прежде всего к системам с регулированием в режиме «старт-стоп». Данное обстоятельство связано с тем, что эффект от частотного регулирования заключается в снижении скорости движения жидкости в напорном трубопроводе. В результа-

те эффект проявляется тем сильнее, чем больше динамическая составляющая характеристики сети относительно ее статической составляющей (в диапазоне изменения производительности КНС). Практически это встречается крайне редко. Экономия электроэнергии в приведенных примерах с режимом «старт-стоп» не превышает 10% (причем без учета потерь в преобразователе частоты).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усачев А. П. Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 7. С. 57–63.
2. Лезнов Б. С., Воробьев С. В. Работа центробежных насосов с переменной частотой вращения // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 11. С. 44–49.
3. Усачев А. П., Гордейчик А. В. Особенности частотного регулирования насосами с учетом рабочего диапазона: Материалы международной конференции «Водоснабжение и водоотведение населенных мест». Международный форум «Вода: экология и технология» «ЭКВАТЭК–2014». М., 2014.
4. Усачев А. П. Об использовании уравнений подобия в технико-экономических расчетах при частотном регулировании насосными агрегатами: Материалы VI международной научно-производственной конференции «Решение проблем экологической безопасности в водохозяйственной отрасли». Новосибирск, 2010.
5. Усачев А. П. Управление параллельной работой центробежных насосов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 2. С. 55–60.

REFERENCES

1. Usachev A. P. [Method of estimating the efficiency of pumping unit frequency regulation]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2018, no. 7, pp. 57–63. (In Russian).
2. Leznov B. S., Vorob'ev S. V. [The operation of centrifugal pumps with variable speed]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2012, no. 11, pp. 44–49. (In Russian).
3. Usachev A. P., Gordeichik A. V. [Specific features of frequency regulation of pumps taking into account the operating range]. Proceedings of «Water supply and wastewater disposal of settlements» International Conference. International Forum «Water: Ecology and Technology» «ECWATECH–2014». Moscow, 2014.
4. Usachev A. P. [On the use of similarity equations in technical and economic calculations in the frequency regulation of pumping units]. Proceedings of «Solving environmental safety issues in the water sector» VI International Scientific-Production Conference. Novosibirsk, 2010.
5. Usachev A. P. [Control of centrifugal pump parallel operation]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2018, no. 2, pp. 55–60. (In Russian).