

УДК 621.65:62-531.3

Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов (в порядке обсуждения)

А. П. УСАЧЕВ*

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

Приведена методика оценки экономии электроэнергии при использовании частотного регулирования производительности насосных агрегатов в системах водоснабжения. Оценка экономической эффективности производительности насосных агрегатов производится только из расчета экономии электроэнергии от использования частотного регулирования взамен дросселирования (остальные составляющие экономии не учитываются). Для оценки экономии электроэнергии необходимо сравнить потребляемую мощность из сети при существующей схеме регулирования дросселированием напорной задвижкой и при схеме с час-

тотным регулированием. Затем следует сопоставить стоимость электроэнергии в денежном выражении с затратами на внедрение системы частотного регулирования. Методика основана на графическом анализе параметров рабочей точки насосов рабочей группы и рассчитана на использование в системах водоснабжения, работа которых осуществляется по давлению.

Ключевые слова: насосный агрегат, производительность, частотное регулирование, дросселирование, оценка эффективности, экономия электроэнергии.

Методик оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов в системах водоснабжения достаточно много. Одной из последних серьезных работ является методика Б. С. Лезнова [1], однако ее практическое применение весьма проблематично. Это связано с тем, что методике требуется **упорядоченная диаграмма подачи воды**, а получить данные для ее построения от эксплуатирующего персонала затруднительно.

Методика Б. С. Лезнова основана на постоянстве КПД насоса, равном номинальному значению, что на практике не всегда реально достижимо. Предполагается, что номинальная подача насоса соответствует наибольшей подаче в данной установке, т. е. насосы выбраны правильно, и их характеристики соответствуют режиму работы системы подачи воды. Но на практике это не всегда так. Методика основана на получении аналитических выражений, что, с одной стороны, является ее большим преимуществом, но, с другой, требует выполнения вышеупомянутых существенных допущений. Кроме того, расчет-

ные выражения получаются довольно громоздкими.

Предлагаемая методика основана на многолетнем опыте получения исходной информации о работе оборудования от эксплуатирующего персонала (заполнение опросных листов). Методика предполагает, что системой автоматического управления осуществляется стабилизация давления на напорном коллекторе водопроводной насосной станции (ВНС), т. е. насосной станцией создается некий избыточный напор. Уровень требуемого (заданного) давления в напорном коллекторе определяется эксплуатирующим персоналом.

Из опыта эксплуатации системы выделяется несколько (два–четыре) относительно стабильных расчетных режимов работы. Критериями режимов работы являются: постоянное число находящихся в работе насосов; относительная стабильность режима (по напору и производительности). Обычно это режимы по времени года (зима/осень/весна/лето) и по времени суток (день/ночь).

Оценка экономической эффективности производительности насосных агрегатов проводится только из расчета экономии электроэнергии от использования частотного регулирования взамен дросселирования (остальные составляющие экономии не учитываются). Для оценки экономии электроэнергии необходимо сравнить потребляемую мощность из сети при существующей схеме регулирования дросселированием (ДР) напорной задвижкой и при схеме с частотным регулированием (ЧР). Затем следует сопоставить экономию электроэнергии в денежном выражении с затратами на внедрение системы частотного регулирования.

Методика

1. Исходные данные:

- 1) паспортные данные насосных агрегатов (НА) должны быть по каждому насосу и двигателю (марка, номинальные параметры);
- 2) существующие режимы работы насосной станции в году должны быть определены в соответствии с обозначенными критериями;
- 3) действующие тарифы на электроэнергию, руб/(кВт·ч).

2. Для каждого режима вычисляется потребляемая мощность из сети всеми насосами, находящимися в работе, при существующей схеме регулирования дросселированием напорной задвижкой ($N_{\text{сеть_др}}_i$) и при частотном регулировании ($N_{\text{сеть_чр}}_i$).

3. Вычисляется снижение потребления мощности для каждого режима ΔN_i :

$$\Delta N_i = N_{\text{сеть_др}}_i - N_{\text{сеть_чр}}_i.$$

4. Вычисляется экономия электроэнергии за год $\Delta E_{\text{год}}$ (с учетом времени работы в году каждого режима):

$$\Delta E_{\text{год}} = \sum_{i=1}^n (\Delta N_i \Delta T_{\text{год},i}),$$

где n – число режимов; $\Delta T_{\text{год},i}$ – время работы в году i -го режима.

5. С учетом действующего тарифа на электроэнергию вычисляется экономия в денежном выражении $P_{\Delta E_{\text{год}}}$.

6. Определяется стоимость внедрения частотного регулирования (путем получения коммерческих предложений от соответствующих поставщиков оборудования и всех услуг по внедрению) $C_{\text{реконст}}$.

7. Вычисляется срок окупаемости как отношение стоимости внедрения к цене экономии.

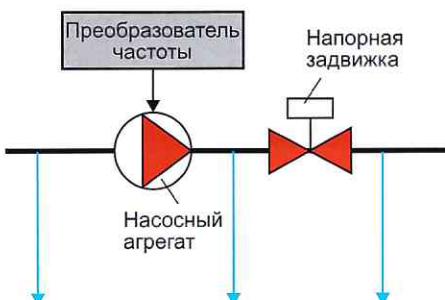
Наиболее трудоемким является пункт № 2. Для расчета мощности, потребляемой из сети, требуется определение параметров рабочей точки каждого насоса в каждом режиме (напор, создаваемый насосом, производительность насоса и КПД насоса в рабочей точке).

Рассмотрим методику в применении к пункту № 2 для следующих конкретных случаев:

режим работы ВНС – один, количество находящихся в работе насосов – один;

режим работы ВНС – один, количество находящихся в работе насосов – два (частотное регулирование осуществляется одним насосом, второй насос без частотного регулирования).

Рассмотрим абстрактную ВНС второго подъема. В таблице приведены параметры режимов работы насосной станции (в относительных единицах к номинальным параметрам насоса).



Режим	$H_{\text{вх}}^{**}$	$\Delta H_{\text{нас}}^{**}$	$H_{\text{нас}}^{**}$	$\Delta H_{\text{из}}^{**}$	$H_{\text{кол}}^{**}$	Q^{**}
Регулирование дросселированием	0,05	1,1	1,15	0,3	0,85	0,7
Частотное регулирование	0,05	0,8	0,85	0	0,85	0,7

Примечание. $H_{\text{вх}}$ – напор на всасе; $\Delta H_{\text{нас}}$ – напор, создаваемый насосом; $H_{\text{нас}}$ – напор на выходе насоса; $\Delta H_{\text{из}}$ – потери напора на напорной задвижке; $H_{\text{кол}}$ – напор в общем коллекторе; Q – производительность.

* Заданные значения, остальные – расчетные.

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

№ режима ВНС	Количество находящихся в работе насосов	Продолжительность режима в году, ч	Производительность станции $Q^*_{\text{нс}} = Q_{\text{нс}} / Q_{\text{нас.ном}}$	Напор в напорном коллекторе $H^*_{\text{кол}} = H_{\text{кол}} / H_{\text{нас.ном}}$	Напор на всасе $H^*_{\text{вх}} = H_{\text{вх.ср}} / H_{\text{нас.ном}}$
1	Один насос № 1	8760 (круглый год)	0,7	0,85	0,05
2	Два насоса № 1 и 2	8760 (круглый год)	1,4	0,85	0,05

Режим № 1, количество находящихся в работе насосов – один

Упрощенная расчетная технологическая схема режима показана на рис. 1. Там же приведены значения напоров при регулировании дросселированием и частотном регулировании (в относи-

тельных единицах к номинальным параметрам насоса).

Заданные значения $H^*_{\text{вх}}$, $H^*_{\text{кол}}$ и Q^* определяются режимом ВНС (таблица). Расчетные значения напоров $\Delta H^*_{\text{нас}}$, $H^*_{\text{нас}}$, $\Delta H^*_{\text{нз}}$ определяются следующим образом. При дросселировании: $\Delta H^*_{\text{нас}}$ – параметр рабочей точки насоса (по гра-

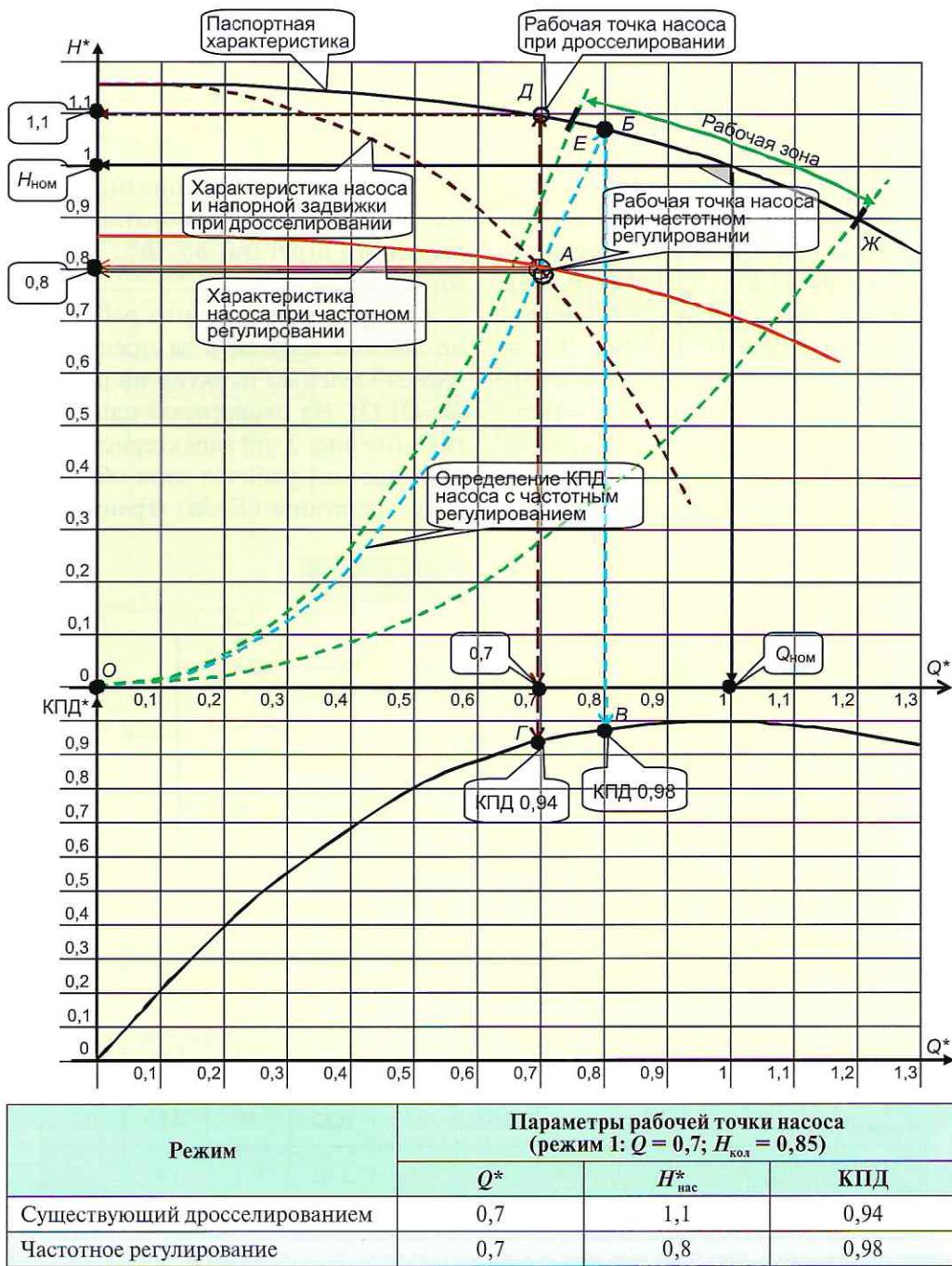


Рис. 2. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме № 1 (в работе один насосный агрегат) при дросселировании и частотном регулировании

фику паспортной характеристики при $Q = Q^*$); $H_{\text{нac}}^* = H_{\text{вх}}^* + \Delta H_{\text{нac}}^*$; $\Delta H_{\text{нз}}^* = H_{\text{нac}}^* - H_{\text{кол}}^*$. При частотном регулировании: $\Delta H_{\text{нз}}^* = 0$; $H_{\text{нac}}^* = H_{\text{кол}}^*$; $\Delta H_{\text{нac}}^* = H_{\text{нac}}^* - H_{\text{вх}}^*$.

Мощность, потребляемая из сети насосным агрегатом, определяется:

$$N_{\text{сеть}} = \frac{H_{\text{нac}} Q_{\text{нac}}}{367 \eta_{\text{нac}} k \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пч}}}.$$

где H – напор, м вод. ст.; Q – производительность насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$; $N_{\text{сеть}}$ – мощность, кВт; $H_{\text{нac}}$, $Q_{\text{нac}}$, $\eta_{\text{нac}}$ – координаты рабочей точки насосного агрегата; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя; $\eta_{\text{нac}}$ – КПД насоса; $\eta_{\text{пч}}$ – КПД преобразователя частоты; k – коэффициент, учитывающий износ насосов.

Для расчета потребления мощности из сети $N_{\text{сеть_др}}^*$ и $N_{\text{сеть_чр}}^*$ необходимо знать координаты рабочих точек насоса $H_{\text{нac}}$, $Q_{\text{нac}}$ и $\eta_{\text{нac}}$. Для этого на напорной характеристике насоса отмечается рабочие точки $H_{\text{нac}}$ и $Q_{\text{нac}}$ существующего режима и режима с частотным регулированием (рис. 2). Координаты рабочей точки насоса существующего режима (точка D): $[\Delta H_{\text{нac}}^*; Q^*] = [1,1; 0,7]$. Координаты рабочей точки насоса при частотном регулировании (точка A): $[\Delta H_{\text{нac}}^*; Q^*] = [0,8; 0,7]$. КПД* насоса существующего режима определяется просто – проекцией соответствующей координаты рабочей точки на кривую КПД (точка I , КПД*_{др} = 0,94). Для определения КПД с частотным регулированием предлагается

воспользоваться свойствами подобия напорных характеристик при частотном регулировании [2]. Для этого необходимо построить параболу подобия ($O-A-B$), проходящую через рабочую точку насоса при частотном регулировании, до пересечения с паспортной напорной характеристикой насоса (точка B). КПД точки пересечения (так называемая сходственная точка) и будет равен КПД_{чр} (в данном случае точка B , КПД*_{чр} = 0,98). Все сказанное поясняется рис. 2.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети, будет:

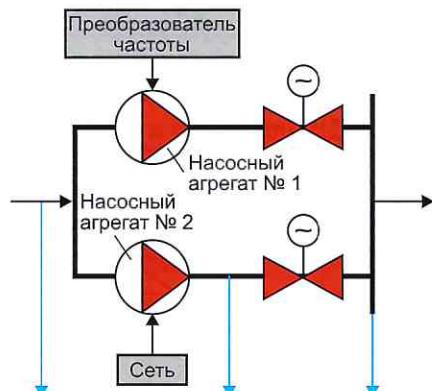
$$N_{\text{сеть_др}}^* = \frac{H_{\text{нac}}^* Q_{\text{нac}}^*}{\eta_{\text{нac}}^* \eta_{\text{дв}}^*} = \frac{1,1 \cdot 0,7}{0,94 \cdot 1} = 0,82;$$

$$N_{\text{сеть_чр}}^* = \frac{H_{\text{нac}}^* Q_{\text{нac}}^*}{\eta_{\text{нac}}^* \eta_{\text{дв}}^* \eta_{\text{пч}}^*} = \frac{0,8 \cdot 0,7}{0,98 \cdot 1} = 0,57;$$

$$\Delta N_i^* = N_{\text{сеть_др}}^* - N_{\text{сеть_чр}}^* = 0,82 - 0,57 = 0,25,$$

что составляет 30% экономии электроэнергии, где $H_{\text{нac}}^*$; $Q_{\text{нac}}^*$; $\eta_{\text{нac}}^*$ – координаты рабочей точки насосного агрегата; $\eta_{\text{дв}}^*$, $\eta_{\text{пч}}^*$, k приняты равными 1.

Следует отметить, что рабочая точка насоса не должна выходить за пределы рабочей зоны насоса (зеленый пунктир на рис. 2, точки $O-E-J-O$) [3]. На паспортной напорной характеристике (на рис. 2 эта характеристика выделена черным цветом) рабочая зона обычно отмечается в виде диапазона ($E-J$). Границы рабочей зоны



Режим	$H_{\text{вх}}^*$	$\Delta H_{\text{нac}}^*$	$H_{\text{нac}}^*$	$\Delta H_{\text{нз}}^*$	$H_{\text{кол}}^*$	Q^*
Регулирование дросселированием (насос № 1)	0,05	1,1	1,15	0,3	0,85	0,7
Регулирование дросселированием (насос № 2)	0,05	1,1	1,15	0,3	0,85	0,7
Частотное регулирование (насос № 1)	0,05	0,8	0,85	0	0,85	0,4
Регулирование дросселированием с помощью СР200 (насос № 2)	0,05	1	1,05	0,2	0,85	1

* Заданные значения, остальные – расчетные.

Рис. 3. Упрощенная расчетная технологическая схема режима № 2 (в работе два насосных агрегата, первый – с частотным регулированием, второй – без частотного регулирования)

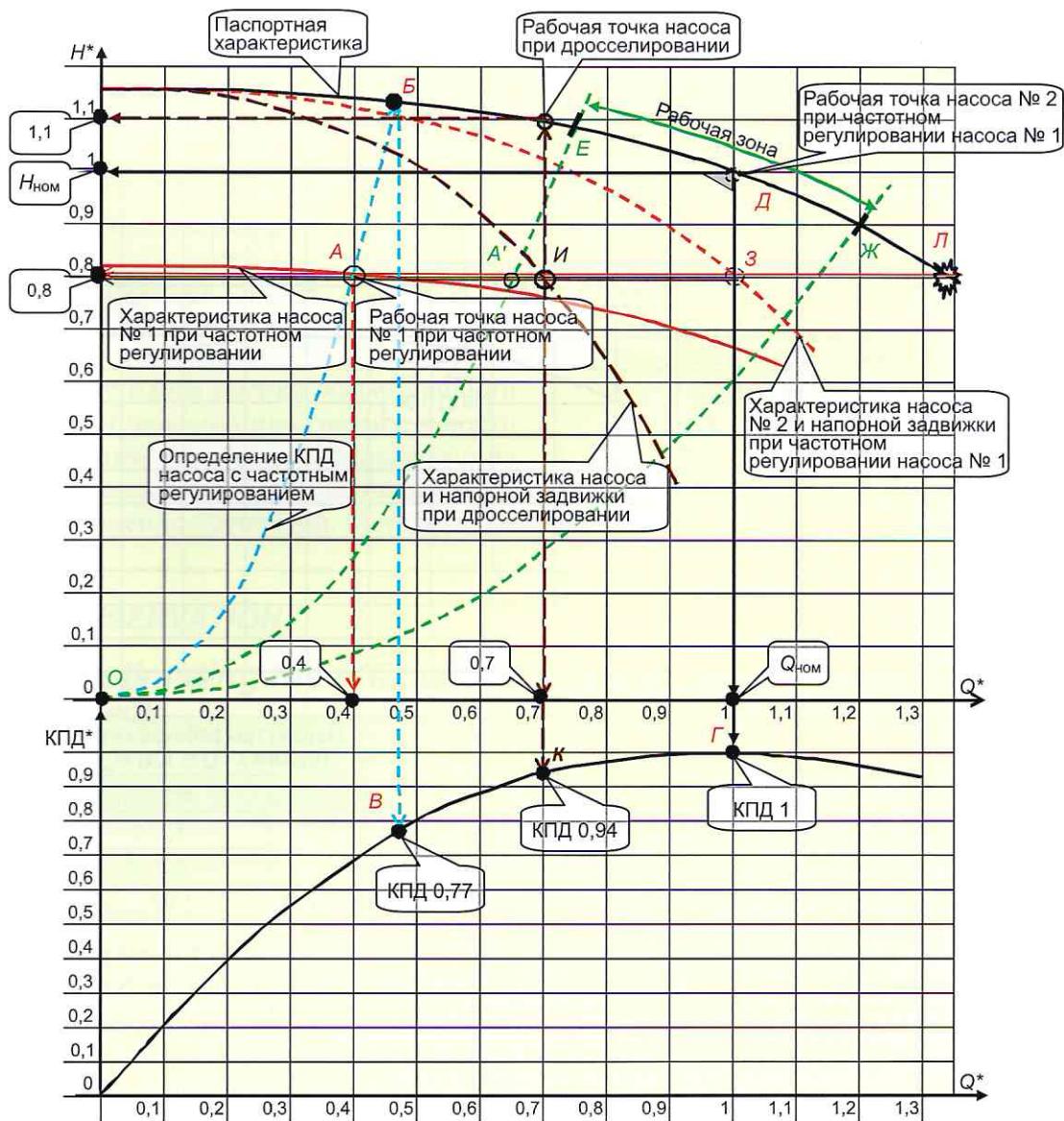
изменяются при изменении частоты вращения рабочего колеса по соответствующим параболам [3]. В рассматриваемом случае рабочие точки насоса лежат в рабочей зоне насоса.

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

Упрощенная расчетная технологическая схема режима показана на рис. 3, там же приведены значения напоров при существующем регулиров-

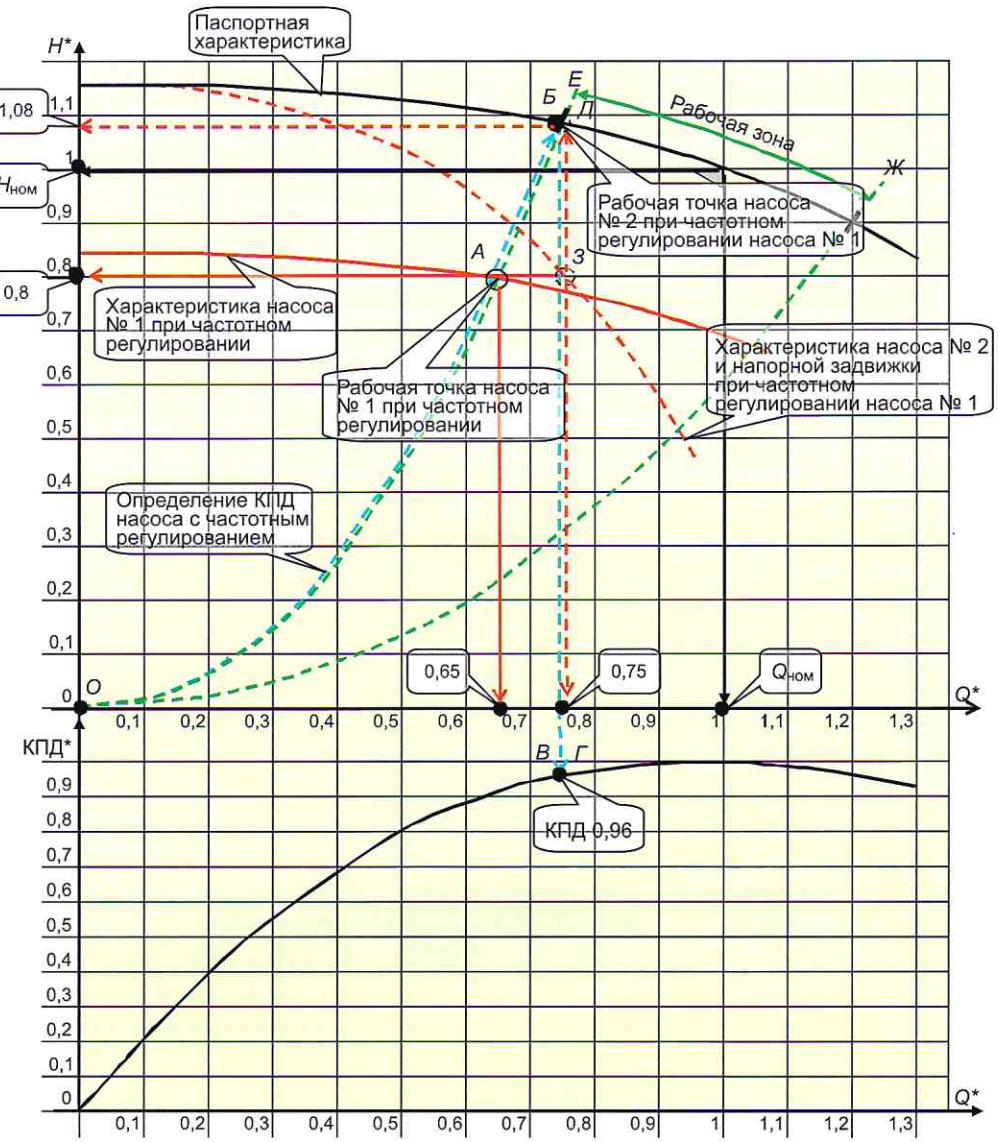
вании дросселированием и частотном регулировании (в соответствии с исходными данными абстрактной ВНС второго подъема). Учтено, что при существующем режиме дросселирования загрузка насосов выровнена (одинаковая).

При частотном регулировании одним насосом режим второго насоса определяется положением его напорной задвижки. При полностью открытой задвижке насос может оказаться в зоне перегрузки (точка L на рис. 4). Во избежание этого напорная задвижка второго насоса должна быть



Режим		Параметры рабочей точки насоса (режим 2: $Q = 1,4$; $H_{\text{кол}} = 0,85$)		
		Q^*	$H_{\text{нас}}^*$	КПД
ДР	Существующий с дросселированием (насосы № 1 и 2)	$1,4/2 = 0,7$	1,1	0,94
ЧР	Частотное регулирование (насос № 1)	$1,4 - 1 = 0,4$	0,8	0,77
	Дросселирование с помощью СР200 (насос № 2)	1	1	1

Рис. 4. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме № 2 при дросселировании и частотном регулировании (в работе два насосных агрегата, первый – с частотным регулированием, второй – без частотного регулирования)



Режим		Параметры рабочей точки насоса (режим 2': $Q = 1,4$; $H_{\text{кол}} = 0,85$)		
		Q^*	$H_{\text{нас}}^*$	КПД
ДР	Существующий с дросселированием (насосы № 1 и 2)	$1,4/2 = 0,7$	1,1	0,94
ЧР	Частотное регулирование (насос № 1)	0,65	0,8	0,96
	Дросселирование с помощью СР200 (насос № 2)	$1,4 - 0,65 = 0,75$	1,08	0,96

Рис. 5. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме № 2' при частотном регулировании и с контролируемым управлением напорной задвижкой второго насоса (в работе два насосных агрегата, первый – с частотным регулированием, второй – без частотного регулирования)

прикрыта до состояния не более номинальной нагрузки насосного агрегата [4; 5]. Это может быть сделано либо ручным способом с помощью оператора (ориентируясь по токовой загрузке приводного электродвигателя), либо автоматически с помощью блока управления запорно-регулирующей арматуры серии СР200 (<http://www.sibmech.ru/elektroprivod-i-avtomatizaciya/produktsiya/oborudovanie-lokalnogo-upravleniya/seriya-SR200/>) – точка Δ на рис. 4. Тогда координаты второго насоса (без частотного регулирования) будут: $[\Delta H_{\text{нас}2}; Q_{\text{нас}2}^*; \text{КПД}_{\text{нас}2}^*] = [1; 1; 1]$.

Первый насос (с частотным регулированием) при этом будет загружен по производительности на $Q_{\text{нас}1}^* = 1,4 - 1 = 0,4$, и координаты его рабочей точки будут: $[\Delta H_{\text{нас}1}^*; Q_{\text{нас}1}^*; \text{КПД}_{\text{нас}1}^*] = [0,8; 0,4; 0,77]$.

Для существующего режима с учетом, что загрузка насосов выровнена, координаты рабочей точки будут: $[\Delta H_{\text{нас}}^*; Q^*; \text{КПД}^*] = [1,1; 0,7; 0,94]$. Сказанное поясняется рис. 4.

Следует отметить, что рабочая точка первого насоса выходит за пределы рабочей зоны (точка A на рис. 4). Такая ситуация встречается до-

вольно часто на практике, когда от насосной станции требуется расход 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 в работе предлагается специальный алгоритм, суть которого заключается в следующем. Задвижку второго насоса приоткрывают на величину, при которой рабочая точка первого насоса с частотным регулированием будет находиться в районе левой границы рабочей области (в точке A' на рис. 4). Координаты рабочих точек такого алгоритма приведены на рис. 5.

При частотном регулировании координаты рабочей точки первого насоса с частотным регулированием: $[\Delta H_{\text{нac1}}^*, Q_{\text{нac1}}^*; \text{КПД}_{\text{нac1}}^*] = [0,8; 0,65; 0,96]$; второго насоса без частотного регулирования: $[\Delta H_{\text{нac2}}^*, Q_{\text{нac2}}^*; \text{КПД}_{\text{нac2}}^*] = [1,08; 0,75; 0,96]$. Следует отметить, что рабочие точки первого и второго насосов не выходят за пределы рабочей зоны.

Выводы

Предлагаемая методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов в системах водоснабжения проверена многолетним опытом ее использования и является именно оценочной. Методика на-

глядна и вполне применима на практике. Получение исходной информации от эксплуатирующего персонала не вызывает затруднений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лезнов Б. С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках. — М.: Машиностроение, 2011. 88 с.
- 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.
- Лезнов Б. С., Воробьев С. В. Работа центробежных насосов с переменной частотой вращения // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 11. С. 44–49.
- 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» «ЭКВАТЕК–2014». — М., 2014.
- Усачев А. П. Управление параллельной работой центробежных насосов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 2. С. 55–60.

ENERGY CONSERVATION

Method of estimating the efficiency of pumping unit frequency regulation (to be discussed)

A. P. USACHEV*

* Usachev Aleksei Pavlovich, 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 estimating energy saving from using frequency regulation of the pumping unit capacity in water supply systems is presented. The estimation of the capacity efficiency of pumping units is carried out only from the energy saving resulting from the use of frequency regulation instead of throttling (other saving components are not considered). To estimate energy saving it is required to compare the power consumed from the grid in the existing scheme of the regulation by penstock gate throttling and in the frequency regulation scheme. Then the energy saving in monetary form shall be compared with the expenses for retrofitting the frequency regulation system. The method is based on the graphical analysis of the pump operation point parameters in the operating group and optimized for the use in water supply systems operating by the pressure.

Key words: pumping unit, capacity, frequency regulation, throttling, efficiency estimation, energy saving.

REFERENCES

- Leznov B. S. Metodika otsenki effektivnosti primeneniia reguliruemogo elektroprivoda v vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh na-sosnykh ustavokakh [Method of estimating the use of variable speed drive in water and wastewater pumping units]. Moscow, sosnykh ustavokakh [Method of estimating the use of variable speed drive in water and wastewater pumping units]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011, 88 p.].
- Usachev A. P. [On the use of similarity equations in technical and economic calculations of frequency regulation of pumping units]. Proceedings of «Addressing the Problems of Environmental Safety in Water Industry» VI International Scientific-Technical Conference. Novosibirsk, 2010. (In Russian).
- Leznov B. S., Vorob'ev S. V. [The operation of centrifugal pumps with variable speed]. Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika, 2012, no. 11, pp. 44–49. (In Russian).
- Usachev A. P., Gordeichik A. V. [Specific features of frequency regulation of pumps with account of the operating range]. Proceedings of «Water Supply and Wastewater Disposal of Communities» International Conference. «Water: Ecology and Technology» «ECWATECH–2014» International Forum. Moscow, 2014. (In Russian).
- Usachev A. P. [Control of centrifugal pump parallel operation]. Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika, 2018, no. 2, pp. 55–60. (In Russian).