

Оценка эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов ВНС и КНС

А.В. Гордейчик¹, А.В. Попов², А.П. Усачев³,

¹ - заместитель директора по направлению "электропривод и автоматизация", ООО «Сибирь-мехатроника», г. Новосибирск, РФ, e-mail: gorden@sibmech.ru, тел.: +7 (383) 399-00-55;

² - заместитель директора - руководитель "Центра инжиниринговых услуг", ООО «Сибирь-мехатроника», г. Новосибирск, РФ, e-mail: popov@sibmech.ru тел.: +7 (383) 399-00-54;

³ - к.т.н., технический директор, ООО «Сибирь-мехатроника»; г. Новосибирск, РФ, e-mail: usachev@sibmech.ru, тел.: +7 (383) 399-00-55,

Аннотация

Рассматривается графическая оценка экономии электроэнергии от использования частотного регулирования производительности насосных агрегатов. Оценка основана на графическом анализе параметров рабочей точки насосов рабочей группы и рассчитана на использование в системах водоснабжения, работа которых осуществляется по давлению, и в системах водоотведения, работа которых осуществляется по уровню в приемном резервуаре.

Ключевые слова

частотное регулирование, оценка эффективности, экономия электроэнергии.

Казалось бы «Методик оценки эффективности...» достаточно много. Одной из последних серьезных работ является методика Б.С. Лезнова [1]. Однако практически ей воспользоваться весьма проблематично. Это связано со следующим:

1. Методике требуется упорядоченная диаграмма подачи воды. Получить данные для ее построения от эксплуатирующего персонала затруднительно.
2. Методика основана на постоянстве КПД насоса, равном номинальному значению, что на практике далеко не всегда реально.
3. В методике 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. На практике это не всегда так.

Методика основана на получении аналитических выражений, что, с одной стороны, является ее большим преимуществом, но, с другой стороны, она требует выполнения вышеприведенных существенных допущений. Кроме того, расчетные выражения получаются довольно громоздкие. Расчет сделан для теоретически возможной экономии, что не является реальным на практике.

Настоящая оценка основана на многолетнем опыте получения исходной информации о работе оборудования от эксплуатирующего персонала (заполнения опросных листов) и предполагает реальную картину (с учетом существующего оборудования и работы насосной либо по постоянному давлению – для ВНС, либо по постоянному уровню – для КНС). Детально методики описаны в работах [2] и [3].

Предполагается:

1. Для ВНС – система замкнута по давлению. Для КНС – система замкнута по уровню в приемном резервуаре. Уровень требуемого давления/уровня определяется эксплуатирующим персоналом (для ВНС это означает, что системой создается некий избыточный напор).
2. Из опыта эксплуатации существующей системы выделяется несколько, относительно стабильных расчетных режимов работы (2...4 режима работы). Критерием режимов работы является: постоянное число насосов, находящихся в работе и относительная стабильность режима (по напору и производительности).

Обычно это режимы по времени года (зима/осень/весна/лето) и по времени суток (день/ночь).

Оценка эффективности производится только из расчета экономии электроэнергии от использования частотного регулирования взамен дросселирования (остальные составляющие экономии не учитываются).

Наиболее трудоемким является вычисление для каждого режима потребляемой мощности из сети всеми насосами, находящимися в работе, при существующей схеме регулирования ($N_{\text{сеть_сущ.}i}$) и при частотном регулировании ($N_{\text{сеть_чр}i}$). Для этого требуется определение параметров рабочей точки каждого насоса в каждом режиме (напор, создаваемый насосом, производительность насоса и КПД насоса в рабочей точке). Кроме того, при расчете параметров рабочей точки насоса необходимо учитывать наличие у насоса рабочей зоны, выходить за пределы которой крайне не рекомендуется [4]. Свои особенности имеются как на ВНС так и на КНС.

1. ВНС

Для определенности, рассмотрим методику оценки для следующих конкретных случаев:

1. Режим №1, количество насосов, находящихся в работе – один.
2. Режим №2, количество насосов, находящихся в работе – два. Частотное регулирование осуществляется одним насосом, второй насос без ЧР (регулирование дросселированием).

Рассмотрение проведем для абстрактной ВНС 2-го подъема (таблица 1).

Режимы работы ВНС (в относительных единицах к номинальным параметрам насоса)					
№ режима ВНС	количество насосов, находящихся в работе	продолжительность режима в году, час	производительность станции, $Q^*_{нс} = Q_{нс} / Q_{нс ном}$	напор на напорном коллекторе, $H^*_{кол} = H_{кол} / H_{нс ном}$	напор на всасе, $H^*_{вх} = H_{вх ср} / H_{нс ном}$
№1	один насос, №1	8760 (круглый год)	0,7	0,85	0,05
№2	два насоса, №1, №2	8760 (круглый год)	1,4	0,85	0,05

Таблица 1.
Усредненные значения параметров рассматриваемых режимов ВНС.

1.1. Режим ВНС №1, количество насосов, находящихся в работе – один.

Упрощенная расчетная технологическая схема режима приведена на рис.1, здесь же приведены значения напоров при регулировании дросселированием и частотном регулировании (все в относительных единицах к номинальным параметрам насоса).

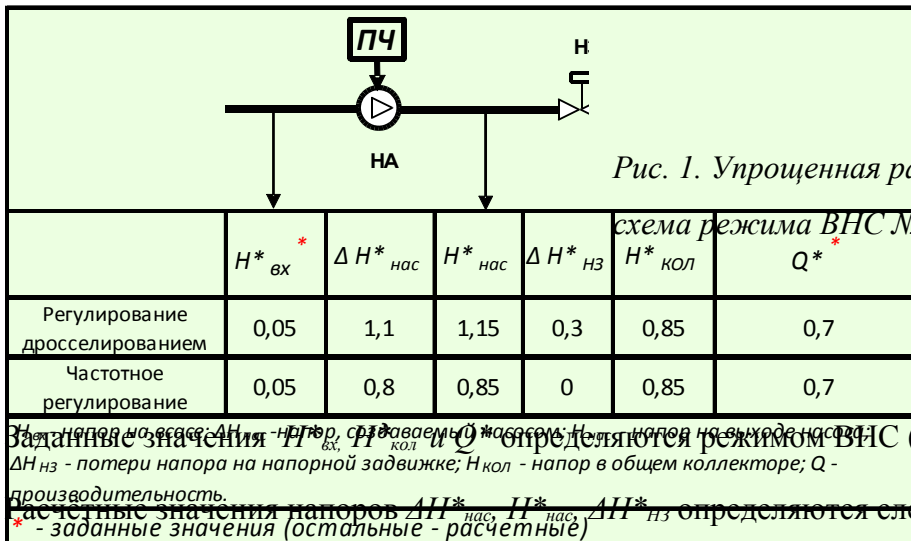


Рис. 1. Упрощенная расчетная технологическая

схема режима ВНС №1 (в работе 1 НА).

Заданные значения $H^*_{вх}$, $H^*_{нас}$ и Q^* определяются режимом ВНС (см. таблицу 1).

Расчетные значения напоров $\Delta H^*_{нас}$, $H^*_{нас}$, $\Delta H^*_{нз}$ определяются следующим образом:
* - заданные значения (остальные - расчетные)

При дросселировании (ДР): $\eta_{нас}$ - параметр р.т. насоса (по графику паспортной характеристике при $Q = Q^*$); $\eta_{пч}$ - коэффициент, учитывающий износ насосов.

При частотном регулировании (ЧР): $\eta_{нас}$ - КПД насоса; $\eta_{пч}$ - КПД преобразователя частоты; k - коэффициент, учитывающий износ насосов.

Мощность, потребляемая из сети насосным агрегатом, определяется выражением:

Здесь: H – в м.в.ст.; Q – в м³/час; $N_{сеть}$ – в кВт.

$H_{НА}$; $Q_{НА}$; $\eta_{НА}$ – координаты рабочей точки насосного агрегата НА.

$\eta_{дв}$ - КПД двигателя; $\eta_{нас}$ - КПД насоса; $\eta_{пч}$ - КПД преобразователя частоты; k - коэффициент, учитывающий износ насосов.

Для определения координат рабочей точки НА - на напорной характеристике насоса отмечаются рабочие точки $H_{НА}$ и $Q_{НА}$ существующего режима и режима с частотным регулированием (рис.2). Координаты рабочей точки насоса существующего режима (точка «Д»): $[Q^*]=[1,1; 0,7]$. Координаты рабочей точки насоса при частотном регулировании (точка «А»): $[Q^*] = [0,8; 0,7]$. КПД* насоса существующего режима определяется просто – проекцией

соответствующей координаты рабочей точки на кривую КПД (точка «Г», $KПД_{др}^* = 0,94$). Для определения КПД с частотным регулированием предлагается воспользоваться свойствами подобия напорных характеристик при частотном регулировании [5]. Для этого необходимо построить параболу подобия (О-А-Б), проходящую через рабочую точку насоса при частотном регулировании до пересечения с паспортной напорной характеристикой насоса (точка «Б»). КПД точки пересечения (это, так называемая, сходственная точка) и будет равен $KПД_{чр}$ (в данном случае точка «В», $KПД_{чр}^* = 0,98$). Все сказанное поясняется рис.2.

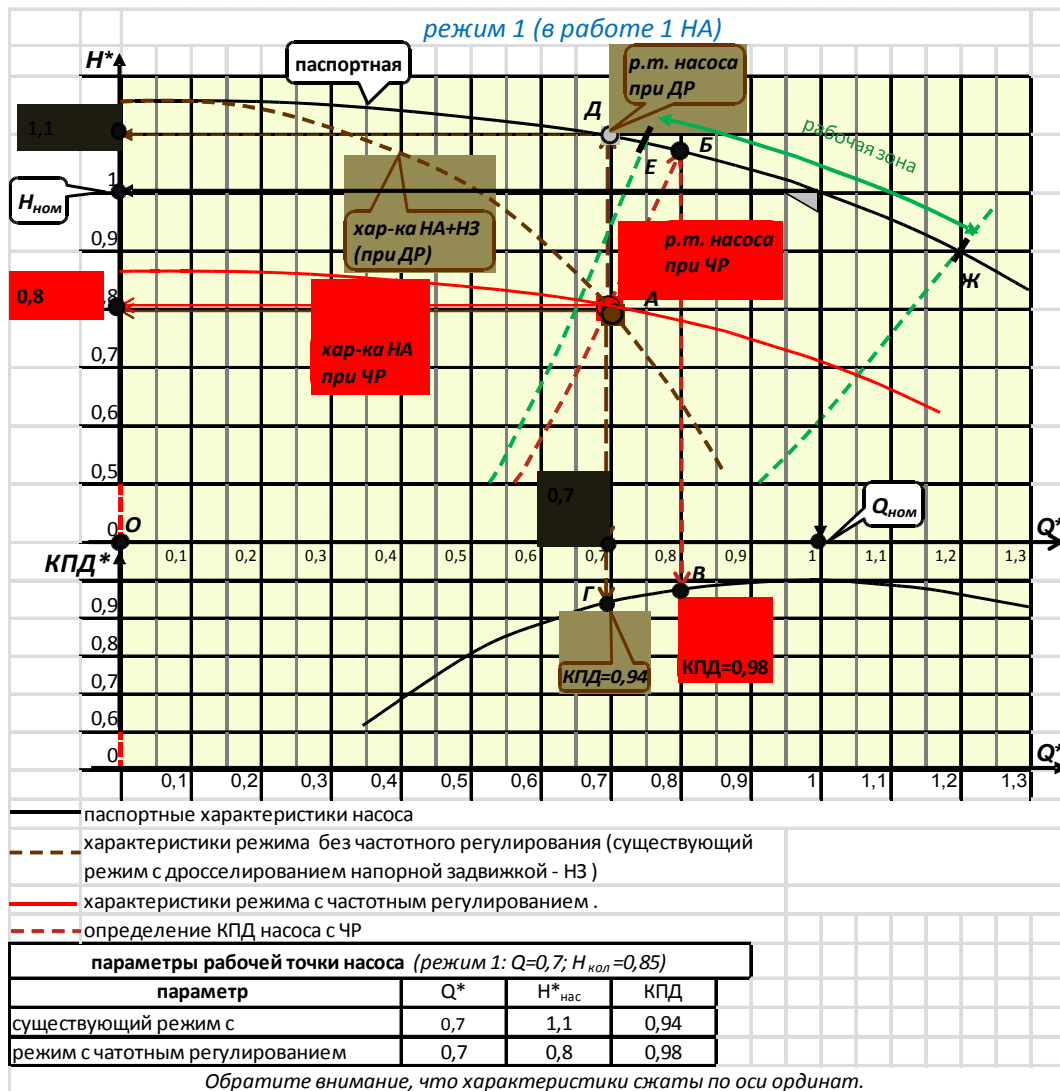


Рис. 2. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме ВНС №1 (в работе 1 НА) при дросселировании и частотном регулировании.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети, будет:

;

;

(что составляет 30% экономии электроэнергии).

Здесь: $H_{НА}^*$; $Q_{НА}^*$; $\eta_{НА}^*$ — координаты рабочей точки насосного агрегата НА.

$\eta_{дв}^*$; $\eta_{пч}^*$; k - приняты равным 1.

Как уже отмечалось, рабочая точка насоса не должна выходить за пределы рабочей зоны насоса (зеленый пунктир на рис. 2, точки *О-Е-Ж-О*) [4]. Границы рабочей зоны изменяются при изменении частоты вращения рабочего колеса по соответствующим параболам [6]. В рассматриваемом случае рабочие точки насоса лежат в рабочей зоне насоса.

1.2. Режим ВНС №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 приведены значения напоров при существующем регулировании дросселированием и частотном регулировании (в соответствии с таблицей исходных данных абстрактной ВНС 2-го подъема).

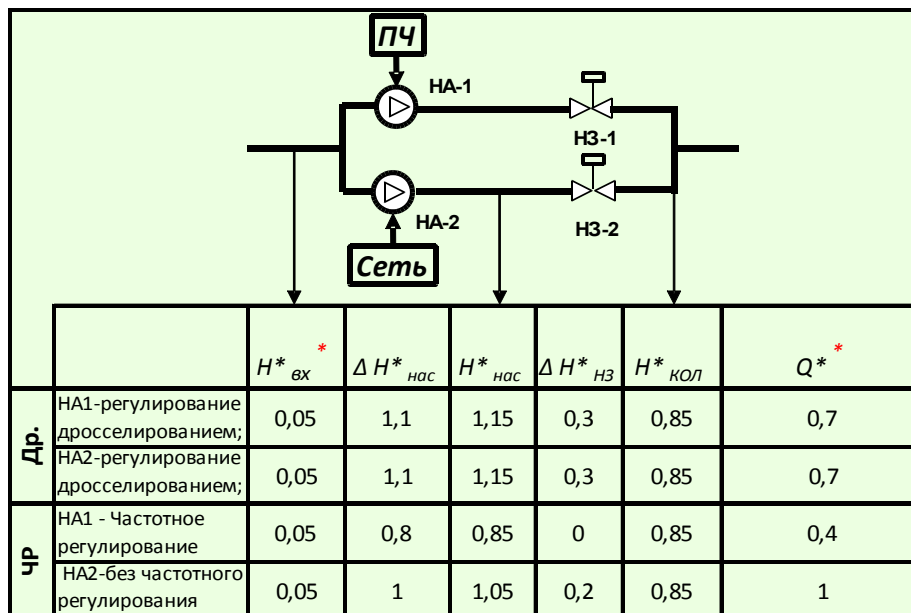


Рис. 3. Упрощенная расчетная технологическая схема режима ВНС №2 (в работе 2 НА, НА1 - с ЧР, НА2 - без ЧР).

В таблице учтено, что при существующем режиме дросселированием, нагрузка насосов выровнена (одинаковая).

При частотном регулировании одним насосом НА1, режим второго насоса НА2 определяется положением его напорной задвижки. При полностью открытой задвижке насос может оказаться в зоне перегрузки (точка «Л» на рис.4). Во избежание этого, напорная задвижка НА2 должна быть прикрыта до состояния не более номинальной нагрузки насосного агрегата [6]. 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 CP200 (<http://www.sibmech.ru/elektroprivod-i-avtomatizaciya/produktsya/oborudovanie-lokalnogo-upravleniya/seriya-SR200/>) – точка «Д» на рис.4. Тогда координаты НА №2 (насос без ЧР) будут $[\Delta H^*_{нас2}; Q_{нас2}^*; КПД^*_{нас2}] = [1; 1; 1]$. НА №1

(насос с ЧР) при этом будет загружен по производительности на $Q_{нас1}^* = 1,4 - 1 = 0,4$ и координаты его рабочей точки будут $[\Delta H_{нас1}^*; Q_{нас1}^*; КПД_{нас1}^*] = [0,8; 0,4; 0,77]$.

Для существующего режима, с учетом, что загрузка насосов выравнена, координаты рабочей точки будут $[Q^*; КПД^*] = [1,1; 0,7; 0,94]$.

Сказанное поясняется рис.4.

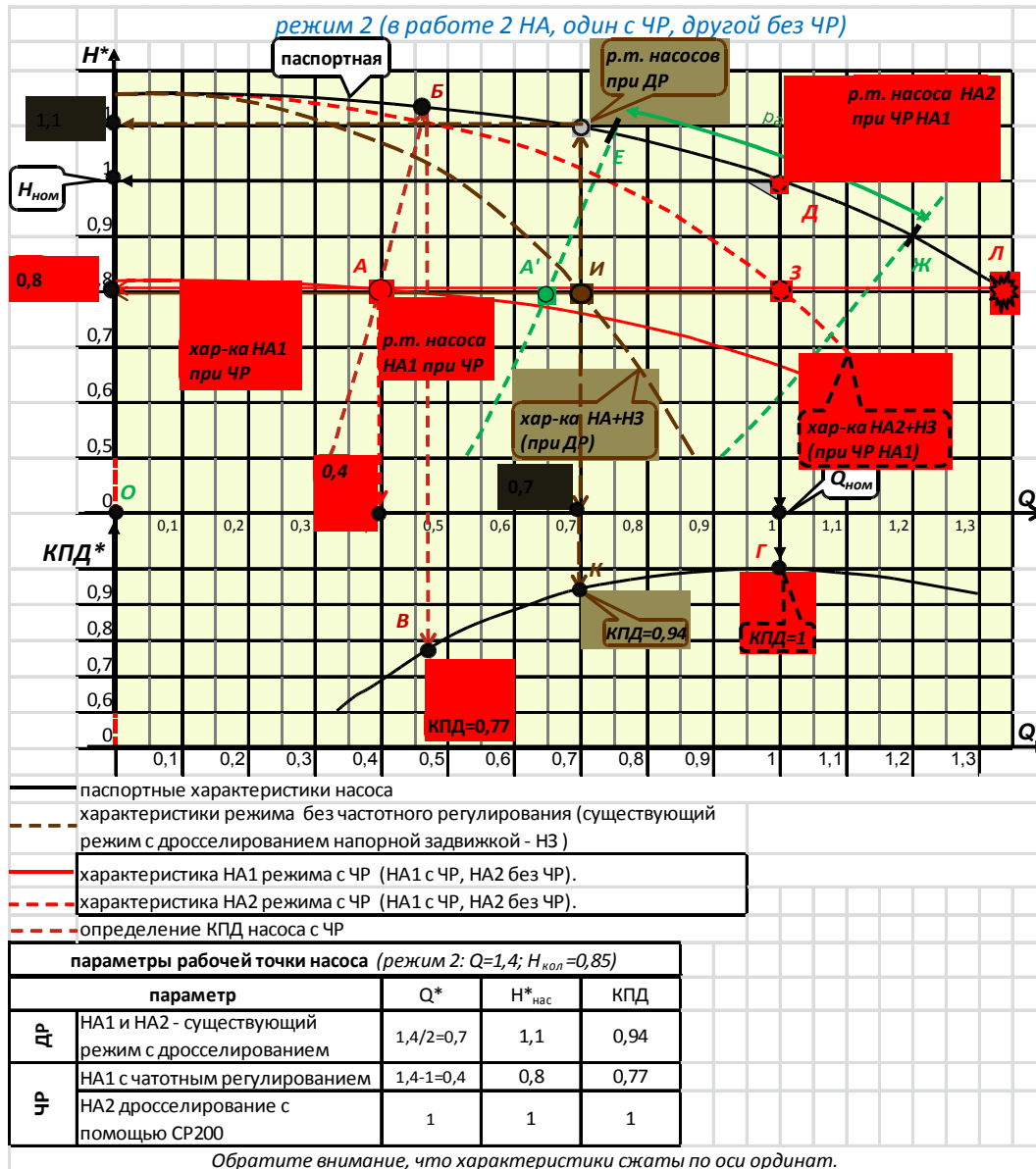


Рис. 4. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме ВНС №2 при дросселировании и частотном регулировании (в работе 2 НА, НА1 - с ЧР, НА2 - без ЧР).

Следует отметить, что рабочая точка насоса НА1 выходит за пределы рабочей зоны насоса (точка «А» на рис.4). 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 [7]. Для ее устранения в работе предлагается специальный алгоритм, суть которого заключается в следующем: «Задвижку насоса НА2 приоткрывают на величину, при

которой рабочая точка насоса с частотным регулированием (насоса НА1) будет находиться в районе левой границы рабочей области (в точке «А» рис. 4)».

Координаты рабочих точек такого алгоритма приведены на рис.5.

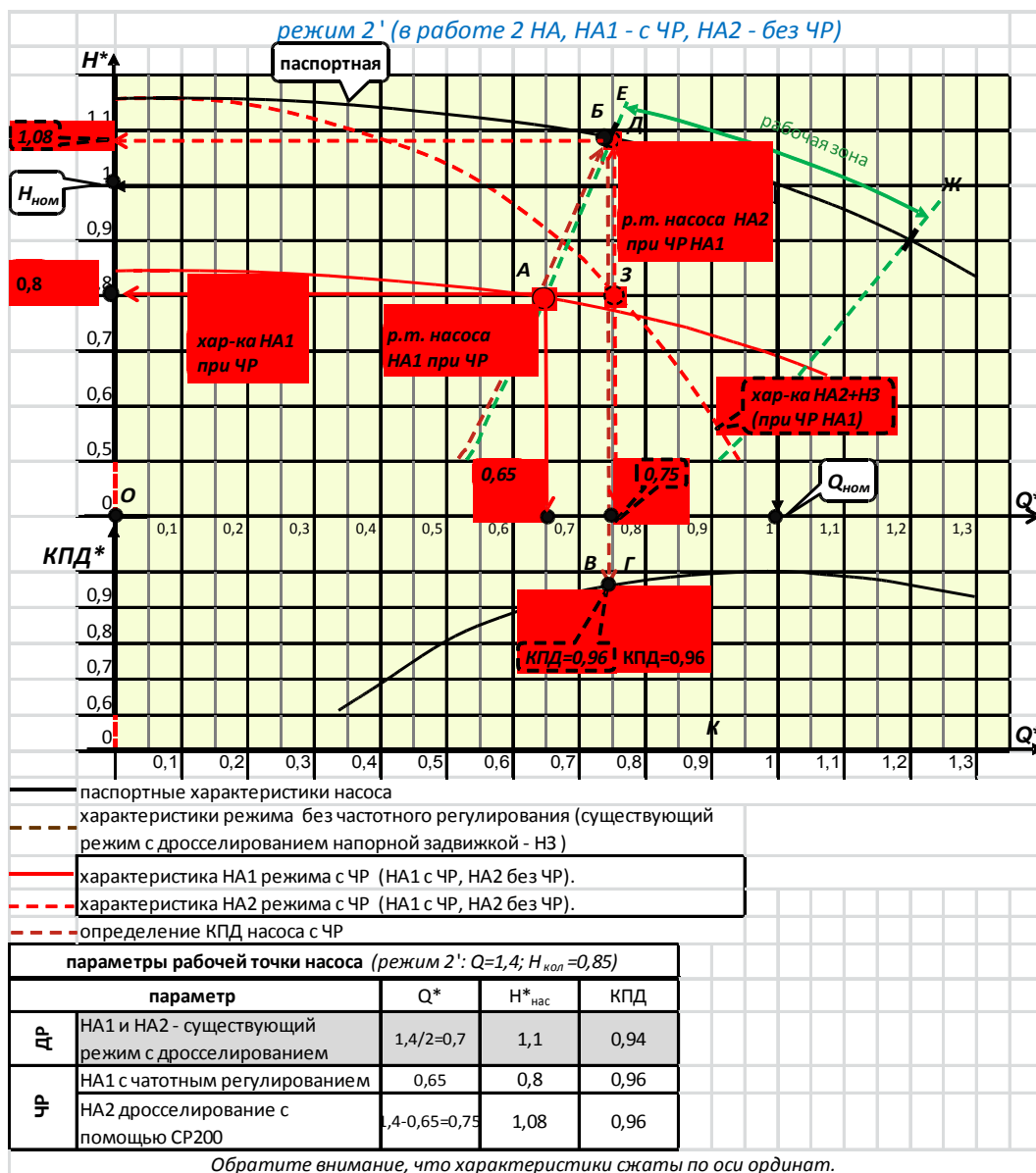


Рис. 5. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме ВНС №2' при частотном регулировании и с контролируемым управлением НЗ насоса №2 (в работе 2 НА, НА1 - с ЧР, НА2 - без ЧР).

При частотном регулировании координаты рабочей точки НА1 (насос с ЧР): [$\Delta H^*_{нас1}$; $Q_{нас1}^*$; $КПД^*_{нас1}$] = [$0,8$; $0,65$; $0,96$]; НА2 (насос без ЧР): [$\Delta H^*_{нас2}$; $Q_{нас2}^*$; $КПД^*_{нас2}$] = [$1,08$; $0,75$; $0,96$].

Следует отметить, что рабочие точки насосов НА1 и НА2 не выходят за пределы рабочей зоны.

2. КНС

Оценка эффективности для КНС является аналогичной, рассмотренной выше для ВНС, и относится к системам, работающим по уровню в резервуаре, это, прежде всего, КНС. С точки зрения управления насосным оборудованием, рассматриваемые системы делятся на:

1. Системы с дросселированием (как правило, с помощью напорной задвижки). Насосные агрегаты в этих системах работают непрерывно, уровень в резервуаре постоянный (это, прежде всего, относительно мощные КНС с высоковольтными двигателями).
2. Системы со «старт-стопным» режимом (насосные агрегаты включаются по верхнему уровню, отключаются по нижнему уровню), уровень в резервуаре переменный (это, прежде всего, КНС с двигателями 0,4 кВ и мощностью до 250-315 кВт).

Системы по уровню, в отличие от систем по давлению, характеризуются тем, что рабочая точка насосов перемещается не по прямой линии заданного давления, а по характеристике сети. Именно поэтому при расчете требуются параметры сети (геодезический подъем (статический напор) сети относительно уровня в приемном резервуаре $H_{стат}$ и потери напора в сети при данной производительности $H_{дин}$). В остальном суть методики остается такой же, что и для систем, работающих по давлению.

Наиболее трудоемким является, как и в системах по давлению, вычисление потребляемой мощности из сети всеми насосами, находящимися в работе, при существующей схеме регулирования ($N_{СЕТЬ_СУЩ}$) и при частотном регулировании (ЧР) - ($N_{СЕТЬ_ЧР}$). Для его расчета требуется определение параметров рабочей точки каждого насоса (напор, создаваемый насосом, производительность насоса и КПД насоса в рабочей точке).

Для определенности, рассмотрим вычисление параметров рабочей точки каждого насоса для следующих конкретных случаев:

1. Режим №1, количество насосов, находящихся в работе – один.
2. Режим №2, количество насосов, находящихся в работе – два. Частотное регулирование осуществляется одним насосом, второй насос без ЧР (регулирование дросселированием).

Рассмотрение проведем для абстрактной КНС (таблица 2).

Режимы работы КНС (в относительных единицах к номинальным параметрам насоса)					
№ режима	количество насосов, находящихся в работе	продолжительность режима в году, час	производительность станции, $Q^*_{ср.нс} = Q_{ср.нс}/Q_{нас ном}$	сеть	
				статический напор (относительно уровня в приемном резервуаре), $H^*_{стат} = H_{стат}/H_{нас ном}$	потери напора в трубопроводе (при $Q^*_{ср.нс}$), $H^*_{дин} = H_{дин}/H_{нас ном}$
№1	один насос, №1	8760 (круглый год)	0,7	0,87	0,03
№2	два насоса, №1, №2	8760 (круглый год)	1,4	0,87	0,16

Таблица 2.
Усредненные значения параметров

рассматриваемых режимов КНС.

Следует отметить, что статический напор сети приведен относительно уровня в приемном резервуаре. Данное обстоятельство позволяет не учитывать напор на всасе насосов, создаваемый уровнем в приемном резервуаре. Режим №2 соответствует реконструкции по схеме каскадного управления (частотное управление одним насосным агрегатом, остальные – без ЧР).

Рассмотрение проведем для систем с дросселированием и для систем, работающих в «старт-стопном» режиме.

2.1. Системы КНС с дросселированием.

В системе с дросселированием (др) 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 есть величина постоянная.

2.1.1. Режим КНСдр №1 (количество насосов, находящихся в работе – один).

Упрощенная расчетная технологическая схема режима №1 приведена на рис.1, здесь же приведены значения напоров при регулировании дросселированием и частотном регулировании (все в относительных единицах к номинальным параметрам насоса).

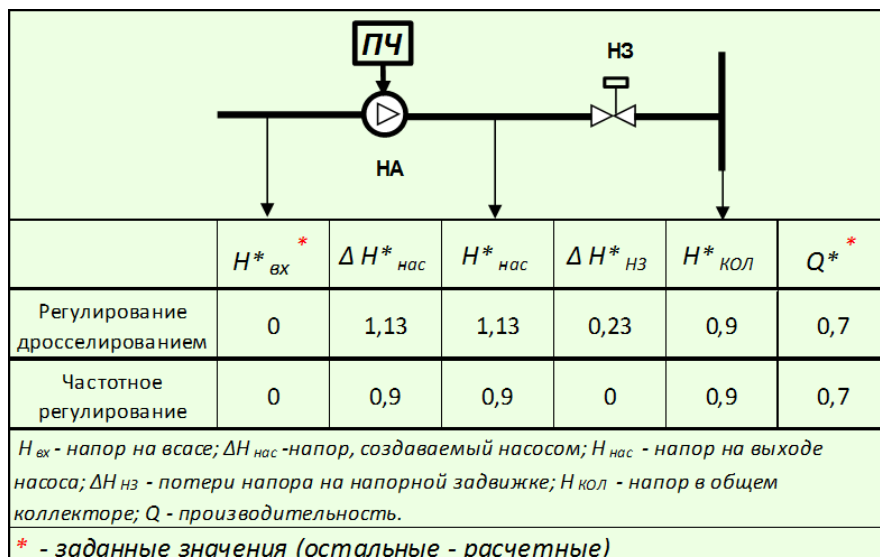


Рис. 6. Упрощенная расчетная технологическая схема режима КНС_{др} №1 (в работе 1 НА).

Здесь учтено вышеотмеченное допущение, что напор на всасе, создаваемый уровнем в приемном резервуаре, учтен в характеристике сети (поэтому $H_{вх}^* = 0$).

Значение Q^* определяются режимом КНС и числом насосных агрегатов, находящихся в работе.

Расчётные значения напоров $\Delta H_{нас}^*$, $H_{нас}^*$, $\Delta H_{нз}^*$ и $H_{кол}^*$ определяются следующим образом.

При дросселировании (ДР): - параметр р.т. насоса (по графику паспортной характеристике при $Q = Q^*$, точка «Д» на рис. 2); $H_{кол}^*$ - параметр р.т. сети при $Q = Q^*$ (точка «Л» на рис. 2); .

При частотном регулировании (ЧР): - параметр р.т. насоса при частотном регулировании (точка «А» на рис. 2); = , так как $H_{вх}^*$ и $\Delta H_{нз}^* = 0$.

Мощность, потребляемая из сети насосным агрегатом, определяется выражением:

$$(1)$$

Здесь: H – в м.в.ст.; Q – в м³/час; $N_{сеть}$ – в кВт.

$H_{НА}$; $Q_{НА}$; $\eta_{НА}$ – координаты рабочей точки насосного агрегата НА. $\eta_{дв}$ – КПД двигателя; $\eta_{НА}$ – КПД насоса; $\eta_{пч}$ – КПД преобразователя частоты; k - коэффициент, учитывающий износ насосов. Для расчета потребления мощности из сети (в относительных единицах - в обозначениях везде надстрочная звездочка) $N_{сеть_др}^*$ и $N_{сеть_чр}^*$ необходимо знать соответствующие координаты рабочих точек насоса $H_{НА}^*$, $Q_{НА}^*$ и $\eta_{НА}^*$.

Для этого на напорной характеристике насоса отмечаются рабочие точки $\Delta H_{нас}^*$ и $Q_{нас}^*$ существующего режима и режима с частотным регулированием (рис.2 – точки «Д» и «А» соответственно). Координаты рабочей точки насоса существующего режима (точка «Д»): $[Q^*]=[1,13; 0,7]$. Координаты рабочей точки насоса при частотном регулировании (точка «А»):

$[Q^*] = [0,9; 0,7]$. КПД* насоса (в относительных единицах) существующего режима определяется просто – проекцией соответствующей координаты рабочей точки на паспортную кривую КПД (точка «К», $КПД_{др}^* = 0,94$). Для определения КПД с частотным регулированием предлагается воспользоваться свойствами подобия напорных характеристик при частотном регулировании [5]. Для этого необходимо построить параболу подобия (О-А-Б), проходящую через рабочую точку насоса при частотном регулировании до пересечения с паспортной напорной характеристикой насоса (точка «Б»). КПД точки пересечения (это, так называемая, сходственная точка) и будет равен $КПД_{чр}$ (в данном случае точка «В», $КПД_{чр}^* = 0,96$). Все сказанное поясняется рис.7.

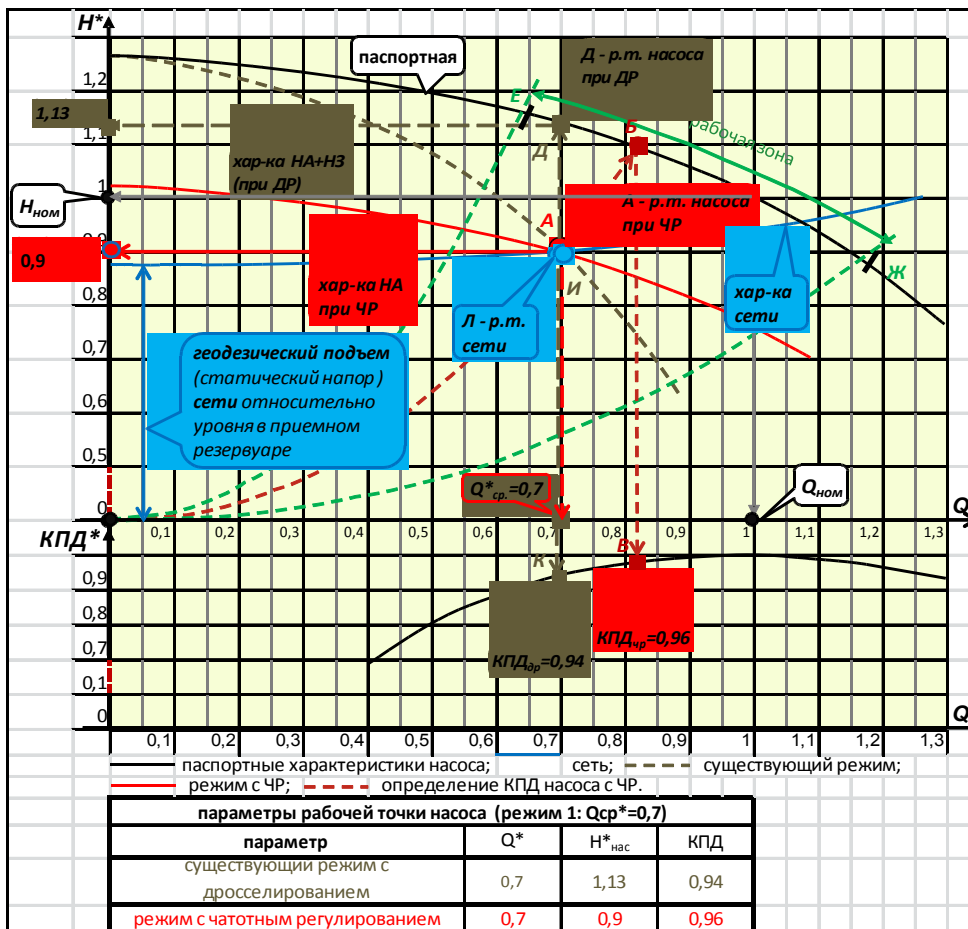


Рис. 7. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме КНСдр №1 (в работе 1 НА) при дросселировании и частотном регулировании.

Обратите внимание, что характеристики сжаты по оси ординат.

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

;

;

(что составляет 22% экономии электроэнергии).

Здесь:

$H_{НА}^*$; $Q_{НА}^*$; $\eta_{НА}^*$ – координаты рабочей точки насосного агрегата НА в относительных единицах.
 $\eta_{ДВ}^*$; $\eta_{ПЧ}^*$; k - приняты равным 1.

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

2.1.2. Режим КНСдр №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 приведены значения напоров при существующем регулировании дросселированием и частотном регулировании (при частотном регулировании напорные задвижки обоих насосов полностью открыты).

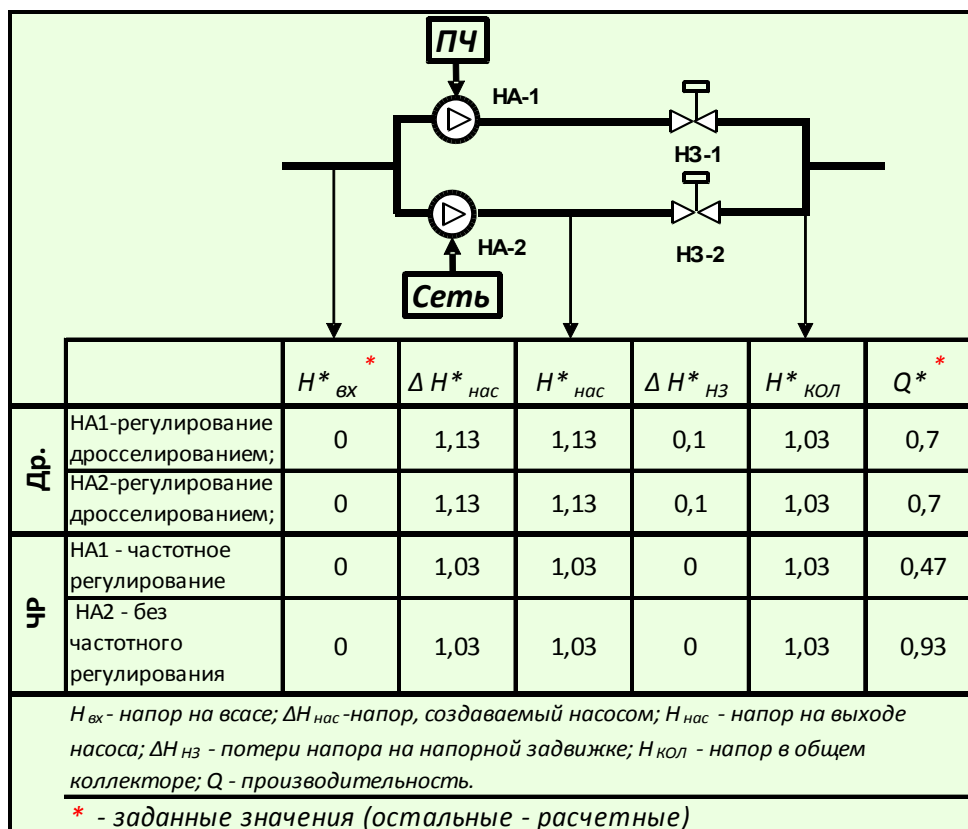


Рис. 8. Упрощенная расчетная технологическая схема режима КНСдр №2 (в работе 2 НА, НА1 - с ЧР, НА2 - без ЧР; напорные задвижки полностью открыты).

На рис.8 и 9а учтено, что при существующем режиме дросселированием, нагрузка насосов выровнена (одинаковая).

При частотном регулировании одним насосом НА1 режим второго насоса НА2 определяется положением его напорной задвижки НЗ. В приведенном примере напорная задвижка НА2 полностью открыта (рис. 4б).

Следует отметить, что в определенных случаях при полностью открытой задвижке насос может оказаться в зоне перегрузки (если точка «Л» на рис.4б окажется ниже номинального напора насоса). Во избежание этого, напорная задвижка НА2 должна быть 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/produktsya/oborudovanie-lokalnogo-upravleniya/seriya-SR200/>).

В рассматриваемом примере при частотном регулировании координаты рабочей точки НА2 (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 выравнена, координаты рабочей точки будут $[Q^*; КПД^*] = [1,13; 0,7; 0,92]$. Сказанное поясняется рис.9а и 9б.

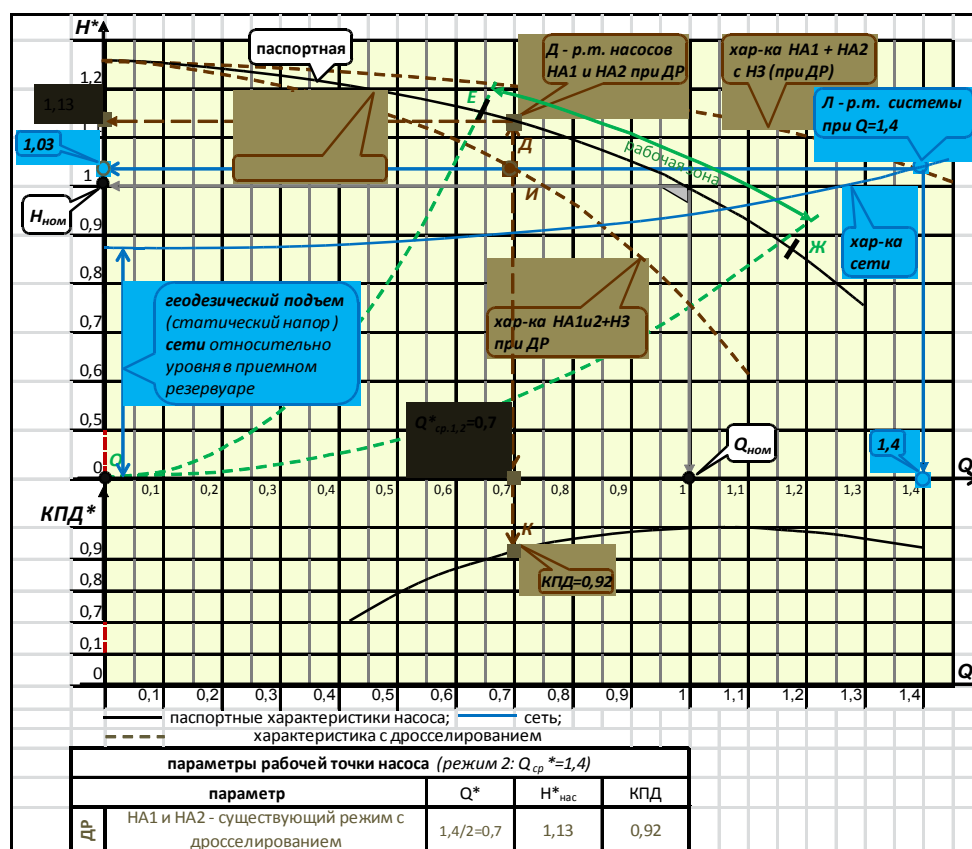


Рис. 9а. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме КНС_{др} №2 при существующем режиме дросселированием (в работе 2 НА, оба выравнены). Обратите внимание, что характеристики сжаты по оси ординат.

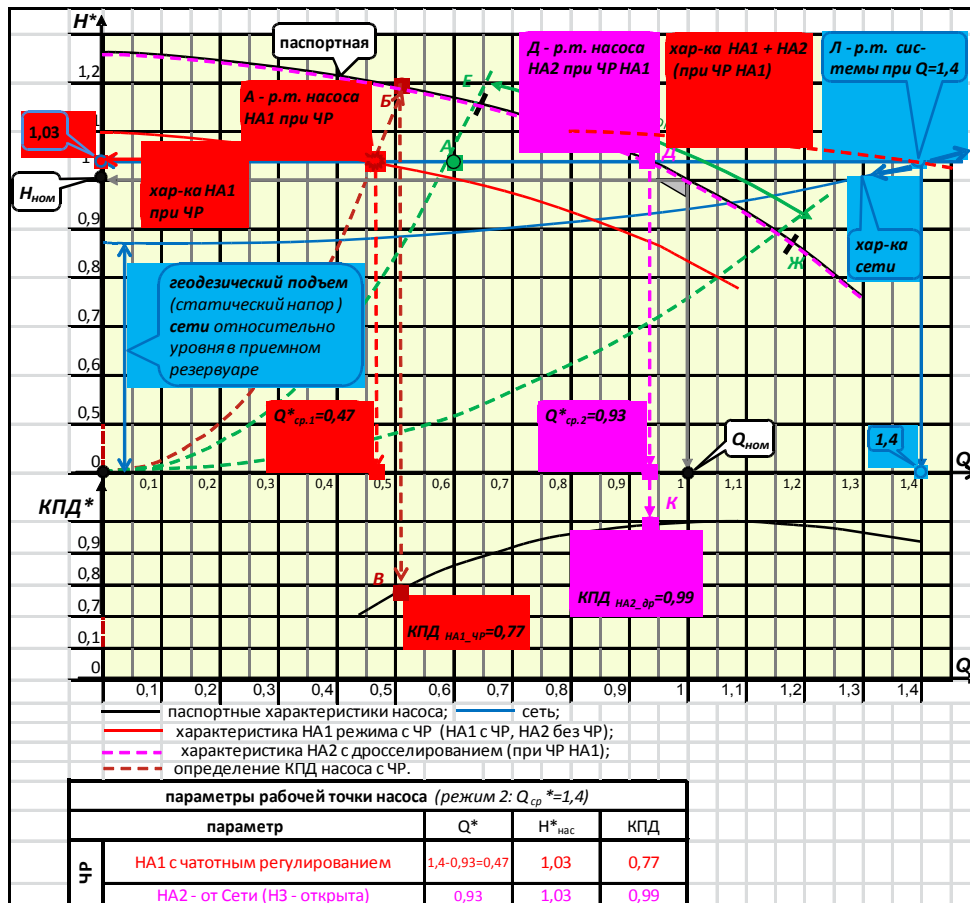


Рис. 9б. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме КНС_{ор} №2 при частотном регулировании НА1 (в работе 2 НА, НА1 - с ЧР, НА2 - без ЧР; напорные задвижки полностью открыты). Обратите внимание, что характеристики сжаты по оси ординат.

Для рассматриваемого случая мощность,

потребляемая из сети будет:

;

;

(что составляет 7% экономии).

Следует отметить, что рабочая точка насоса НА1 выходит за пределы рабочей зоны насоса (точка «А» на рис.9б). 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 [7]. Для ее устранения в работе предлагается специальный алгоритм, суть которого заключается в следующем: «Задвижку насоса НА2 приоткрывают на величину, при которой рабочая точка насоса с частотным регулированием (насоса НА1) будет находиться в районе левой границы рабочей области (в точке «А'» рис. 9б)».

2.2. Системы КНС со «Старт-стопным» режимом.

Предполагается, что в системе со «Старт-стопным» (сс) режимом 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 2.

2.2.1. Режим КНСсс №1 (количество насосов, находящихся в работе – один).

Упрощенная расчетная технологическая схема режима приведена на рис.10, здесь же приведены значения напоров при старт-стопном регулировании и частотном регулировании (все в относительных единицах к номинальным параметрам насоса).

Для старт-стопного режима все значения в таблице приведены при среднем уровне в резервуаре. Для ЧР режима все значения в таблице приведены при верхнем уровне в резервуаре.

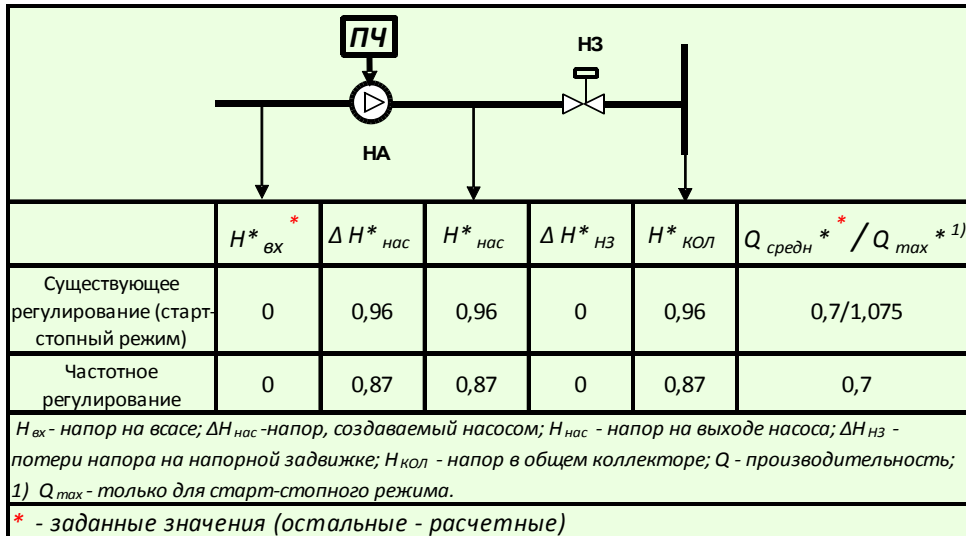


Рис. 10. Упрощенная расчетная технологическая схема режима КНСсс №1 (в работе 1 НА).

Значение Q^* определяются режимом КНС и числом насосных агрегатов, находящихся в работе (см. таблицу 2).

Расчётные значения $Q^*_{мах}$, $\Delta H^*_{нас}$, $H^*_{нас}$, $\Delta H^*_{нз}$ и $H^*_{кол}$ определяются следующим образом.

При старт-стопном режиме (СС): $Q^*_{мах}$ - точка пересечения характеристики сети (при среднем уровне в резервуаре) и суммарной напорной характеристики работающих насосов, - параметр p.m. насоса (по графику паспортной характеристике при $Q = Q^*_{мах}$ с учетом числа насосов, находящихся в работе), $H^*_{кол}$ - параметр p.m. сети при $Q = Q^*_{мах}$, , .

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

При старт-стопном режиме 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 выполнение расчетов

производить по средним значениям – по параметрам точки пересечения характеристики сети (при среднем уровне в резервуаре) и напорной характеристики насоса.

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

Для расчета потребления мощности из сети $N_{СЕТЬ_СС}^*$ 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.6).

Координаты рабочей точки насоса существующего режима (точка «Л»): $[Q_{max}^*] = [0,96; 1,075]$.

Координаты рабочей точки насоса при частотном регулировании (точка «А»): $[Q^*] = [0,87; 0,7]$.

$KПД^*$ насоса существующего режима (в импульсе) определяется просто – проекцией соответствующей координаты рабочей точки на кривую $KПД$ (точка «К», $KПД_{СС}^* = 0,99$).

Определение $KПД$ с частотным регулированием осуществляется по сходственной точке «Б» (аналогично вышерассмотренным образом) и равен (в данном случае точка «В») $KПД_{ЧР}^* = 0,975$.

Все сказанное поясняется рис.11.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети, будет:

;

;

(что составляет 8% экономии электроэнергии).

Здесь: $H_{НА}^*$; $Q_{НА}^*$; $\eta_{НА}^*$ – координаты рабочей точки насосного агрегата НА. $\eta_{дв}^*$; $\eta_{пч}^*$; k – приняты равным 1.

Следует отметить, что рабочая точка насоса не должна выходить за пределы рабочей зоны насоса. В рассматриваемом случае рабочие точки насоса лежат в рабочей зоне насоса.

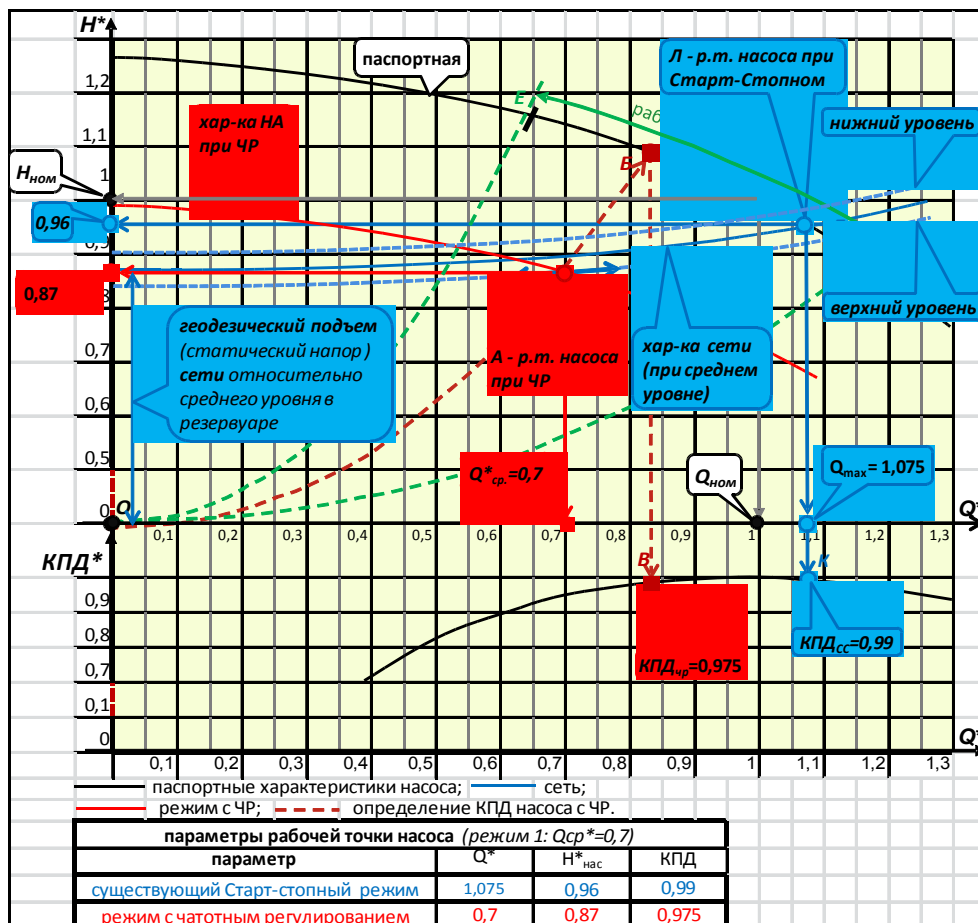


Рис. 11. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме КНСсс №1 (в работе 1 НА) при старт-стопном режиме и частотном регулировании. Обратите внимание, что характеристики сжаты по оси ординат.

2.2.2.

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

Упрощенная расчетная технологическая схема режима приведена на рис.12, здесь же приведены значения напоров при старт-стопном регулировании и частотном регулировании.

В таблице учтено, что при существующем старт-стопном режиме, загрузка насосов выровнена (одинаковая).

При частотном регулировании одним насосом НА1, режим второго насоса

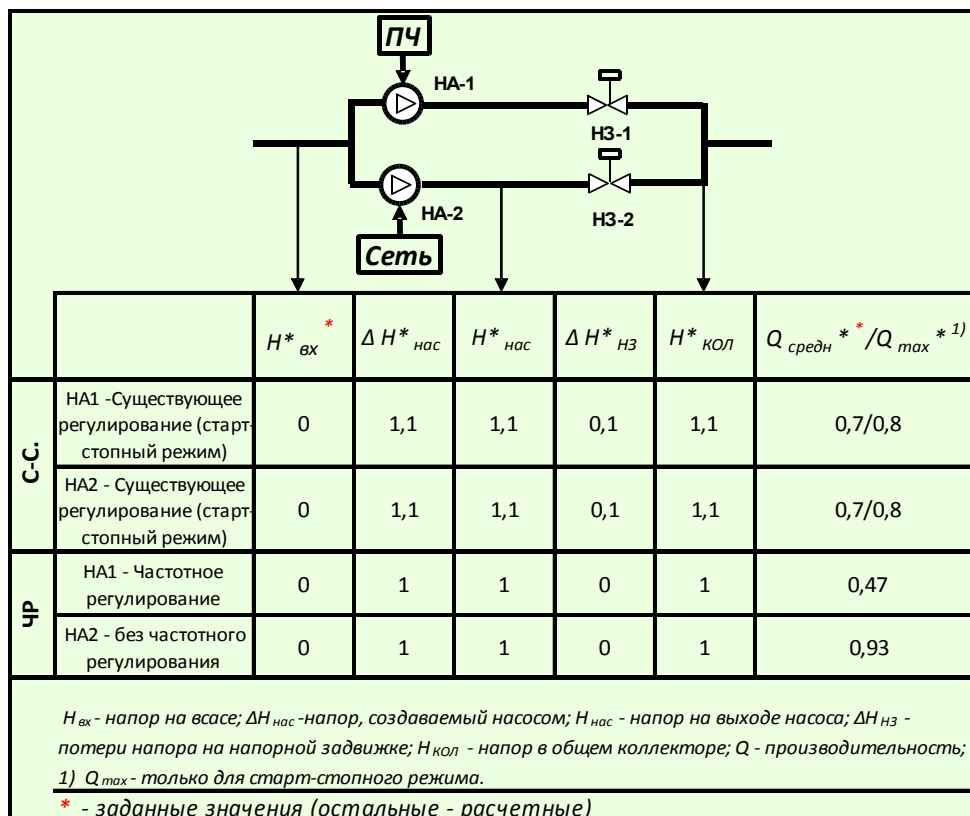


Рис. 12. Упрощенная расчетная технологическая схема режима КНСсс №2 (в работе 2 НА, HA1 - с ЧР, HA2 - без ЧР).

НА2 определяется положением его напорной задвижки. В приведенном примере напорная задвижка полностью открыта. Следует отметить, что в определенных случаях при полностью открытой задвижке насос может оказаться в зоне перегрузки (если точка «М» на рис.8 окажется ниже номинального давления насоса). Во избежание этого, напорная задвижка НА2 должна быть прикрыта до состояния не более номинальной нагрузки насосного агрегата [7].

В рассматриваемом примере координаты НА №2 (насос без ЧР) будут $[\Delta H_{нас2}^*; Q_{нас2}^*; КПД_{нас2}^*] = [1,0; 1,0; 1,0]$. НА №1 (насос с ЧР) при этом будет загружен по производительности на $Q_{нас1}^* = 1,4 - 1,0 = 0,4$ и координаты его рабочей точки будут $[\Delta H_{нас1}^*; Q_{нас1}^*; КПД_{нас1}^*] = [1,0; 0,4; 0,75]$.

Для существующего режима, с учетом, что нагрузка насосов выравнена, координаты рабочей точки будут $[Q^*; КПД^*] = [1,1; 0,8; 0,975]$.

Сказанное поясняется рис.8.

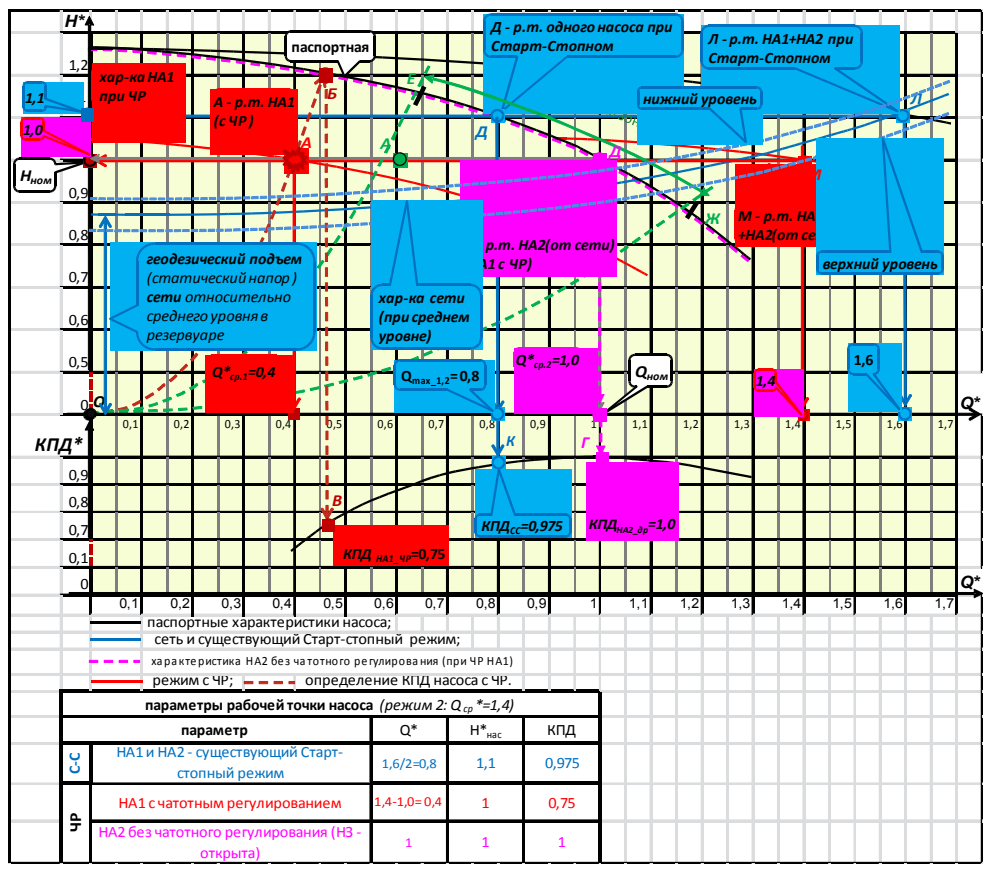


Рис.13. Рабочие точки насоса на напорной характеристике в режиме КНС_{сс} №2 при существующем старт-стопном режиме и частотном регулировании (в работе 2 НА, НА1 - с ЧР, НА2 - без ЧР).
Обратите внимание, что характеристики сжаты по оси ординат.

Для рассматриваемого случая мощность, потребляемая из сети, будет:

;

;

(что составляет 2,9% экономии КПД электроэнергии).

Следует отметить, что рабочая точка насоса НА1 выходит за пределы рабочей зоны насоса (точка «А» на рис.8). Здесь может быть использован такой же алгоритм, как и в разделе 1.2.

Заключение

Предлагаемая оценка эффективности частотного регулирования на ВНС и КНС 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.

Следует отметить, что экономия электроэнергии на КНС существенно ниже, чем на ВНС [1]. Это относится, прежде всего, к системам со старт-стопным режимом. Данное обстоятельство связано, прежде всего, с тем что эффект от частотного регулирования заключается в снижении скорости движения жидкости в напорном трубопроводе. В результате, 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 со старт-стопным режимом на КНС не превышает 10% (причем это без учета потерь в преобразователе частоты).

Литература

1. Лезнов Б.С. «Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках». – М., Машиностроение, 2011,-88 с.
2. Усачев А.П. Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов. // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. №7.
3. Усачев А.П. Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов КНС. // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. №11 (план).
4. Лезнов Б.С., Воробьев С.В. Работа центробежных насосов с переменной частотой вращения. // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. №11.
5. Усачев А.П. Об использовании уравнений подобия в технико-экономических расчетах при частотном регулировании насосными агрегатами. // VI международная научно-производственная конференция: «Решение проблем экологической безопасности в водохозяйственной отрасли». Новосибирск. 2010.
6. Усачев А.П., Гордейчик А.В. Особенности частотного регулирования насосами с учетом рабочего диапазона. // Международная конференция «Водоснабжение и водоотведение населенных мест», Москва, МВЦ “Крокус Экспо”. Международный форум «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК-2014.
7. Усачев А.П. Управление параллельной работой центробежных насосов. // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. №2.