

W19. Методы регулирования работы водяных насосов

Для применяемых методов предложены новые показатели эффективности. Преимущества частотного регулирования часто преувеличивают, умалчивая о недостатках. Ступенчатое регулирование может конкурировать с частотным.

Автор – Савенко В.В., к.т.н., доцент.

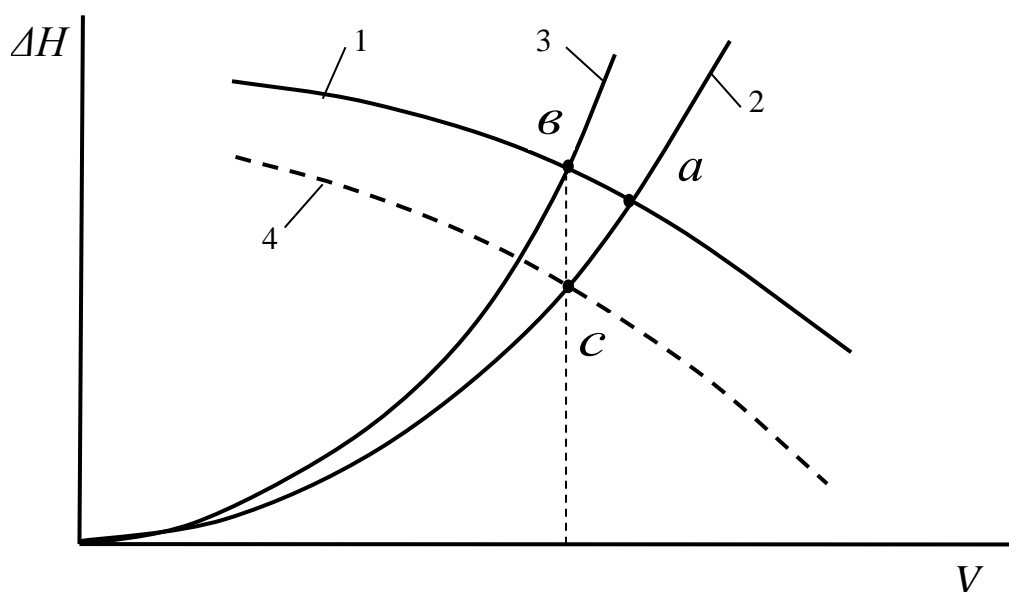
Опубликовано – 22.01.2019.

При эксплуатации систем теплоснабжения необходимо регулировать расход воды в зависимости от влияющих факторов. Даже при качественном регулировании отпуска теплоты, когда расход воды теоретически должен оставаться неизменным, он все равно изменяется по разным причинам. В соответствии с этим требуется регулирование работы водяных насосов. Эта же задача регулирования насосов возникает и в других гидравлических системах с принудительной циркуляцией жидкости.

Применяют различные **методы регулирования работы насосов**.

Одним из распространенных методов является **дросселирование потока жидкости** [1].

При регулировании дросселированием потока в трубопроводе устанавливают управляемое устройство, с помощью которого можно изменять проходное сечение трубопровода. В общем случае это устройство называют регулятором давления [1] или заслонкой. Изменение параметров в процессе регулирования **удобно показывать с помощью графиков гидравлических характеристик насоса и системы**, на которую этот насос работает. Такие графики приведены на рисунке 1.



1 - гидравлическая характеристика насоса;

2,3 - гидравлические характеристики системы соответственно при полностью и частично открытом регуляторе (заслонке);

4 – гидравлическая характеристика насоса с регулятором

Рисунок 1 – Гидравлические характеристики насоса и системы при регулировании дросселированием потока

При полностью открытом регуляторе (заслонке) гидравлические характеристики насоса и системы пересекаются в точке a , насос обеспечивает в системе расход воды V_a . При повышении давления воды регулятор может уменьшить проходное сечение, из-за чего увеличится гидравлическое сопротивление системы и ее характеристика будет соответствовать кривой 3. Теперь характеристики 1 и 3 будут пересекаться в точке B , расход воды в системе уменьшится до величины V_B , что и требовалось получить.

Таким образом, регулятор давления (заслонка) является дополнительным гидравлическим сопротивлением в системе. За счет изменения этого сопротивления точка B пересечения характеристик насоса и системы может перемещаться по кривой 1 от точки a влево до точки с установленным минимальным расходом. Теоретически минимальный расход можно уменьшить до нуля, полностью закрыв проходное сечение, но практически этот расход ограничен наименьшим расходом из рабочей зоны характеристики насоса.

В некоторых источниках **результаты работы системы с дросселированием потока графически представляют иначе**, чем на рисунке 1. Так, в [1] строят характеристику насоса вместе с регулятором (кривая 4 на рисунке 1), по точке пересечения которой с кривой 2 (точка C на рисунке 1) определяют параметры системы. Представляется, что такая интерпретация графиков нелогична. Регулятор является отдельным устройством, не имеет с насосом механических, электрических или иных связей, является частью системы. Кроме того, насос является источником напора, а вся остальная система, включая регулятор, этот напор расходует. Поэтому в объединении насоса с регулятором смысла столько же, сколько в объединении насоса с каким-либо трубопроводом. Но с формальной точки зрения конечный результат должен получаться одинаковым при использовании характеристик 3 и 4. Разница заключается в том, что при использовании характеристик 3 и 1 в точках их пересечения будем получать напоры на выходе из насоса, а при использовании характеристик 4 и 2 в точках их пересечения будем получать напоры на выходе из регулятора. То есть, на рисунке 1 при расходе $V_C = V_B$ на выходе из насоса напор равен H_B , а на выходе из регулятора – H_C .

Основным **недостатком дросселирования потока** является нерациональный расход электроэнергии на привод насоса. Часть создаваемого насосом напора бесполезно расходуется на преодоление сопротивления регулятора. По рисунку 1 при расходе V_C потери на дросселирование составляют

$$\Delta H_{др} = H_B - H_C . \quad (1)$$

Значение $\Delta H_{др}$ тем больше, чем больше параметры работы насоса отличаются от параметров точки a .

Для регулирования работы насосов применяют также **перепуск части жидкости** с выхода насоса на вход [1] (в [1] этот метод регулирования называют рециркуляцией).

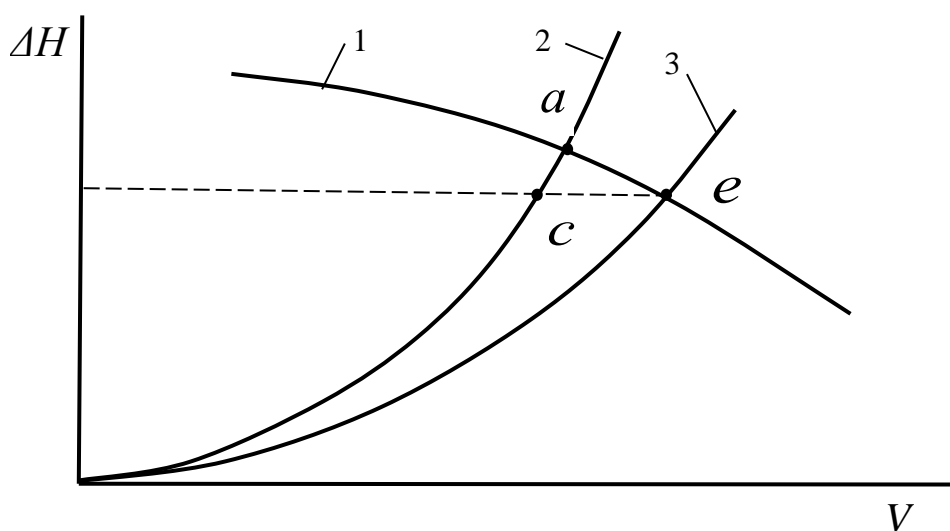
При этом методе регулирования в трубопроводе, соединяющем выход насоса со входом, устанавливают регулятор (регулирующий вентиль), который в зависимости от давления жидкости в нагнетательном трубопроводе может изменять проходное сечение,

перепуская часть жидкости во всасывающий трубопровод. То есть, соединительный трубопровод вместе с регулятором включен параллельно остальной системе. При этом гидравлические характеристики насоса и системы можно представить в виде рисунка 2.

При полностью закрытом регуляторе характеристика системы соответствует кривой 2, параметры работы насоса в системе соответствуют точке *a*. Если открыть регулятор, часть потока будет перетекать на вход насоса, в системе появится дополнительная параллельная ветвь. В результате суммарное гидравлическое сопротивление системы уменьшится, ее характеристика сместится вправо на рисунке 2, например, до кривой 3. Теперь уже параметры работы насоса будут соответствовать точке *e*, но из расхода V_e в систему попадет только расход V_c , а остальной поток с расходом

$$\Delta V_{\text{пер}} = V_e - V_c \quad (2)$$

насосом перекачивается, но к потребителям не подается.



1 - гидравлическая характеристика насоса; 2 - гидравлическая характеристика системы при полностью закрытом регуляторе; 3 - гидравлическая характеристика системы при частично открытом регуляторе

Рисунок 2 – Гидравлические характеристики при регулировании перепуском жидкости

Применение перепуска жидкости также связано с нерациональным расходом электроэнергии на перекачивание насосом избыточного расхода $\Delta V_{\text{пер}}$, который не используется потребителями.

Еще одним методом управления работой насосов является регулирование угловой скорости вала насоса [1, 2].

Для регулирования угловой скорости вала насоса использование механических средств (муфт, редукторов, вариаторов и т.п.), а также электрических средств в виде, например, электромагнитных муфт в настоящее время считается нерациональным, более приемлемым считают изменение угловой скорости вращения ротора приводного электродвигателя. У асинхронных электродвигателей, которые используются для привода водяных насосов, а также многих других машин, устройств и механизмов, скорость вращения ротора можно изменять за счет скольжения, изменения числа пар полюсов и частоты тока [2].

В первом случае из-за потерь на регулировочном реостате снижается КПД двигателя [2]. Различное число пар полюсов должно быть предусмотрено конструкцией, для чего статор должен иметь сложную обмотку, а двигатель в целом становится более громоздким и дорогим, но появляется возможность ступенчатого регулирования угловой скорости вращения ротора [2]. В настоящее время **наиболее рациональным считается частотное регулирование**, при котором за счет изменения частоты питающего тока можно обеспечить бесступенчатое изменение угловой скорости вращения ротора электродвигателя в широком диапазоне [2].

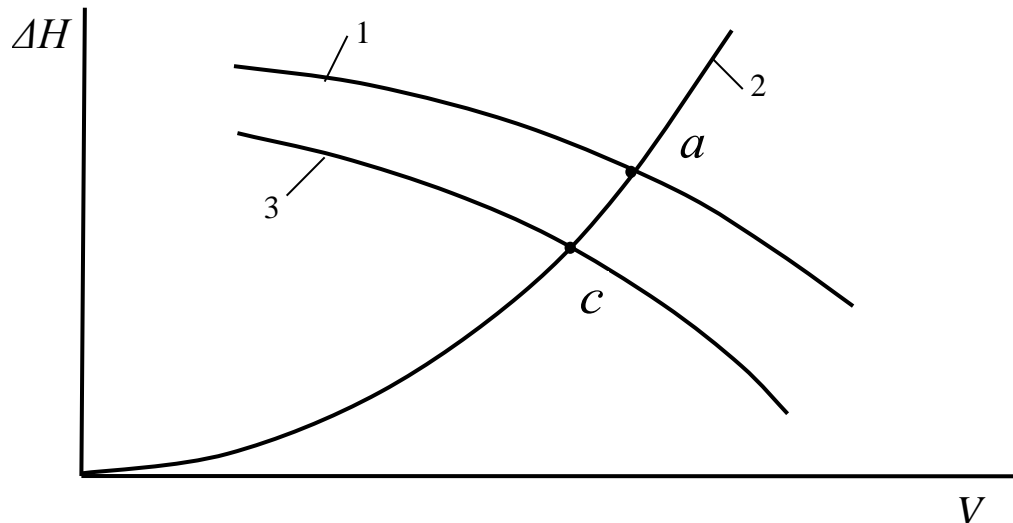
При изменении угловой скорости вращения ω вала центробежного насоса его гидравлические параметры изменяются в соответствии с зависимостями [3]

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} ; \quad (3)$$

$$\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 , \quad (4)$$

где V_1, V_2 – производительность насоса (расходы воды) при разных значениях ω ; $\Delta H_1, \Delta H_2$ – напоры, создаваемые насосом при разных значениях ω .

Из зависимостей (3), (4) следует, что при разных значениях ω кривые гидравлических характеристик насоса будут близкими к эквидистантным (будут примерно повторять конфигурацию исходной кривой при других значениях параметров). В соответствии с этим при изменении величины ω при частотном регулировании графическую иллюстрацию изменения параметров насоса и системы приводят в виде рисунка 3.



- 1 - гидравлическая характеристика насоса;
- 2 - гидравлическая характеристика системы; 3 – гидравлическая характеристика насоса при уменьшенной угловой скорости вала

Рисунок 3 – Гидравлические характеристики при регулировании угловой скорости вала (частотном регулировании)

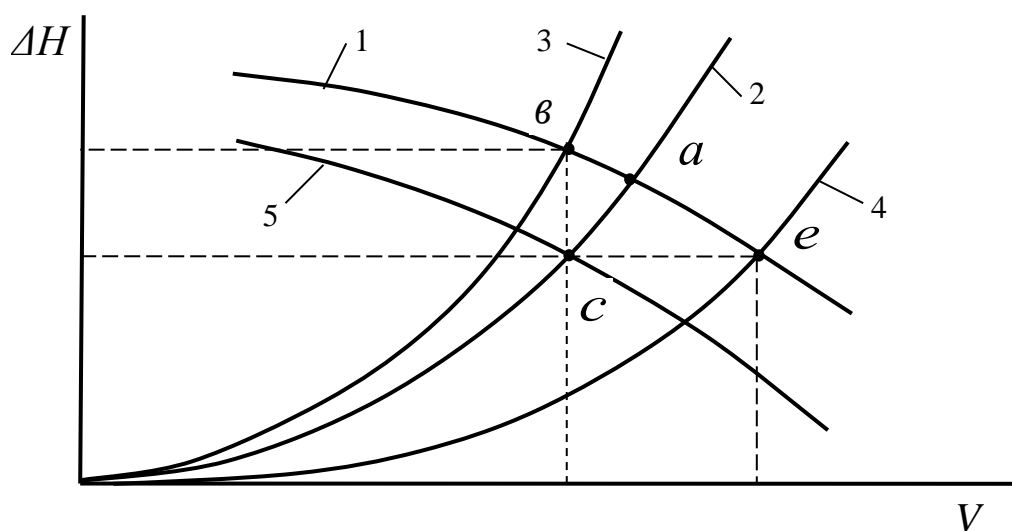
При номинальной величине ω гидравлическая характеристика насоса (кривая 1 на рисунке 3) пересекается с гидравлической характеристикой системы в точке a . Если с помощью частотного преобразователя уменьшить величину ω , то характеристика насоса

будет соответствовать, например, кривой 3, и насос обеспечит в данной системе меньший, чем в точке a , расход жидкости V_c . При этом электроэнергия расходуется только на обеспечение нужных в данный момент в системе величин расхода V_c и напора ΔH_c . **Непроизводительные потери напора и электроэнергии при этом отсутствуют.**

Сравнение рассмотренных методов регулирования работы насосов показывает, что по расходу электроэнергии на привод насосов наиболее рациональным из них является частотное регулирование. Разницу в расходах электроэнергии при разных методах показывают с помощью различных графиков, представляющих собой, например, зависимости мощности электропривода от расхода воды.

В некоторых случаях для таких графиков применяют безразмерные относительные параметры насосов [4, 5], которые взяты неизвестно откуда. По этому поводу следует заметить, что аналогичные графики могут быть построены для конкретного насоса и только для условий его работы в конкретной системе, как это сделано, например, в [6, 7]. Строить такие графики без привязки к конкретному насосу можно лишь для иллюстрации процессов, как это сделано на рисунках 1 – 3, но из таких графиков нельзя получить величины экономии электроэнергии. Точно так же этого нельзя сделать по графикам из [4], где на одной оси отложена мощность насоса в кВт, а на другой – относительный расход воды, неизвестно к какому насосу и к каким условиям его работы относящийся.

Качественную **оценку преимуществ частотного регулирования** по расходу электроэнергии удобно сделать по графикам гидравлических характеристик. Для этого на рисунке 4 приведены графики параметров для рассмотренных методов регулирования в условиях одной и той же гидравлической системы, в которой при каждом методе обеспечиваются одинаковые параметры (V_c , ΔH_c).



1 - гидравлическая характеристика насоса при номинальной угловой скорости вала; 2,3,4 - гидравлические характеристики соответственно исходной системы, при дросселировании и перепуске воды; 5 - гидравлическая характеристика насоса при уменьшенной угловой скорости вала

Рисунок 4 – Гидравлические характеристики при разных способах регулирования

Потребляемая насосом мощность определяется по известной зависимости

$$P_H = \frac{\Delta p_H V_H}{\eta_H} = \frac{\rho g \Delta H_H V_H}{\eta_H}, \quad (5)$$

где V_H – объемная производительность насоса; ΔH_H – напор, создаваемый насосом; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; η_H – КПД насоса.

На рисунке 4 при дроссельном регулировании параметры насоса соответствуют точке B , при перепуске воды – точке e , при частотном регулировании – точке C . По координатам этих точек можно оценить мощность, потребляемую насосом.

Если пренебречь разницей в величинах ρ и η_H при разных методах регулирования, то в соответствии с формулой (5) потребляемая мощность будет эквивалентна площадям прямоугольников на рисунке 4 со сторонами: при дроссельном регулировании – $V_B, \Delta H_B$; при перепуске воды – $V_e, \Delta H_e$; при частотном регулировании – $V_C, \Delta H_C$. Сравнивая площади указанных прямоугольников, в [1] делают общий вывод о том, что при дросселировании потока и перепуске воды затраты электроэнергии всегда больше, чем при частотном регулировании. Для количественной оценки затрат электроэнергии в [1] предлагают также аналитические зависимости. Например, для разницы затрат электроэнергии зависимости имеют вид

$$P_B - P_C = \frac{\rho g \Delta H_{др} V_C}{\eta_{др}}; \quad (6)$$

$$P_e - P_C = \frac{\rho g \Delta H_C \Delta V_{пер}}{\eta_{пер}}, \quad (7)$$

где $\Delta H_{др}, \Delta V_{пер}$ – определяются по формулам (1), (2).

Однако зависимости вида (6), (7) не дают дополнительной информации по сравнению с тем, что можно получить из рисунка 4. **Более полезными могут быть другие зависимости**, которые получены следующим образом.

Найдем отношение мощностей, потребляемых насосом при дросселировании потока и частотном регулировании. Если считать величины ρ, η_H одинаковыми при сравниваемых методах регулирования, то, определяя мощность по формуле (5), получим

$$\frac{P_B}{P_C} = \frac{\Delta H_B V_B}{\Delta H_C V_C} = \frac{\Delta H_B}{\Delta H_C} = \frac{\Delta H_B}{\Delta H_A} \cdot \frac{\Delta H_A}{\Delta H_C} = \left(1 + \frac{\Delta H_{aB}}{\Delta H_A}\right) \left(\frac{\omega_a}{\omega_c}\right)^2, \quad (8)$$

где ΔH_{aB} – разность напоров в точках a и B .

Аналогично для регулирования перепуском воды получим

$$\frac{P_e}{P_C} = \frac{\Delta H_e V_e}{\Delta H_C V_C} = \frac{V_e}{V_C} = \frac{V_e}{V_a} \cdot \frac{V_a}{V_C} = \left(1 + \frac{\Delta V_{ea}}{V_a}\right) \frac{\omega_a}{\omega_c}, \quad (9)$$

где ΔV_{ea} – разность расходов воды в точках e и a .

Из полученных зависимостей видно, что отношения мощностей по формулам

(8) и (9) больше единицы, то есть потребляемая насосом мощность при частотном регулировании меньше, чем при дросселировании или перепуске. Для количественной оценки отношения мощностей появляется несколько вариантов, каждый из которых может использоваться в зависимости от имеющихся исходных данных. При этом вместо абсолютных значений величин, как в формулах (6), (7), достаточно знать их отношение.

Полученные зависимости (8), (9) позволяют также сравнить между собой дросселирование потока и перепуск жидкости по затратам энергии. Разделив (8) на (9), получим

$$\frac{P_B}{P_e} = \frac{\omega_a}{\omega_c} \left(1 + \frac{\Delta H_{ав}}{\Delta H_a}\right) / \left(1 + \frac{\Delta V_{ea}}{V_a}\right) . \quad (10)$$

Из составляющих формулы (10) имеется ясность по первому сомножителю: отношение величин ω_a/ω_c больше единицы. Другие отношения оценить по величине в общем случае не удастся. Величины отношений $\Delta H_{ав}/\Delta H_a$ и $\Delta V_{ea}/V_a$ зависят от пологости графиков гидравлических характеристик насоса и системы. Если бы графики на рисунке 4 были выполнены в масштабе, то из рисунка следовало бы, что отношение $\Delta H_{ав}/\Delta H_a$ меньше отношения $\Delta V_{ea}/V_a$, и второй сомножитель в формуле (10) меньше 1. Но первый сомножитель больше 1, поэтому окончательный результат был бы и в этом случае неясен. То есть, **из полученных зависимостей следует, что в одних случаях потребляемая насосом мощность может быть меньше при дросселировании потока, а в других случаях – при перепуске воды.** Однако в [1] утверждают, что при перепуске воды потребляемая насосом мощность всегда больше, чем при дросселировании.

Утверждение основано на простых зависимостях. Считают, что изменение мощности насоса в зависимости от влияющих факторов можно приблизительно представить в виде линейной зависимости

$$P_H = P_x + \alpha V_H , \quad ? \quad (11)$$

где P_x – мощность холостого хода; α – коэффициент пропорциональности.

Применяя формулу (11) к дросселированию потока, получают (в обозначениях рисунка 4)

$$P_B = P_x + \alpha V_c . \quad ? \quad (12)$$

Соответственно для перепуска воды при тех же параметрах в системе мощность равна

$$P_e = P_x + \alpha(V_c + \Delta V_{ce}) . \quad ? \quad (13)$$

Тогда разность мощностей будет равна

$$\Delta P = P_e - P_B = \alpha \Delta V_{ce} . \quad ? \quad (14)$$

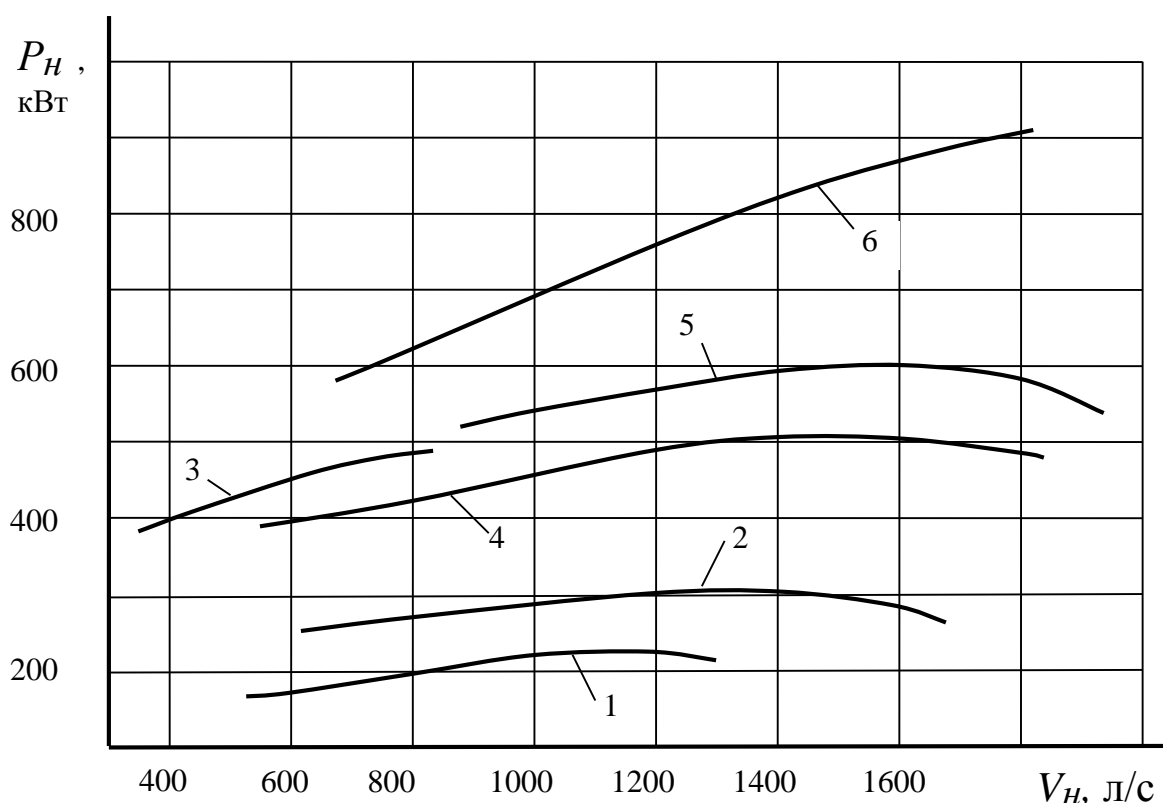
По формуле (14) разность мощностей ΔP всегда положительна, откуда в [1] делают вывод, что потребляемая насосом мощность при регулировании перепуском воды всегда больше, чем при регулировании дросселированием.

Приведенное обоснование является ошибочным. Мощность насоса определяется по формуле (5), в которую кроме расхода V_H входят еще напор и КПД насоса. В отличие от этого, в зависимости (11) произвольно приняли, что мощность насоса

зависит только от расхода V_H . На основании этой произвольной зависимости и вывод получится произвольный. Если, например, в зависимости (11) вместо расхода V_H использовать напор ΔH_H , то конечный вывод будет противоположный полученному в [1].

На самом деле из формулы (5) следует, что в зависимости от соотношения показателей ($V_H, \Delta H_H, \eta_H$) результаты работы насоса могут быть разными. В соответствии с этим **обоснованное сравнение по расходу энергии** при разных методах регулирования можно сделать следующим образом.

Возьмем за основу паспортные данные зависимости потребляемой насосом мощности от расхода воды через насос. Графики таких зависимостей для некоторых водяных насосов типа Д по данным [8] приведены на рисунке 5.



1 – насос Д3200-20; 2 – Д4000-22; 3 – Д2500-62;
4 – Д5000-32; 5 – Д6300-27; 6 – Д5000-50

Рисунок 5 – Паспортные графики изменения потребляемой мощности для некоторых насосов типа Д

Как видно из рисунка 5, для разных насосов одного и того же типа приведенные графики имеют существенное отличие. Имеются насосы, для которых потребляемая мощность монотонно возрастает с увеличением расхода воды V_H в пределах возможных режимов работы. Для таких насосов использование перепуска, при котором увеличивается расход воды через насос, неизбежно приведет к увеличению потребляемой мощности по сравнению с дросселированием потока.

Однако из рисунка 5 видно также, что имеются насосы с явно выраженным максимумом мощности P_H , не совпадающим с максимумом расхода V_H (кривые 1, 2, 4, 5). Аналогичное отличие характеристик наблюдается и для насосов других типов. Поэтому на некоторых режимах работы таких насосов потребляемая мощность

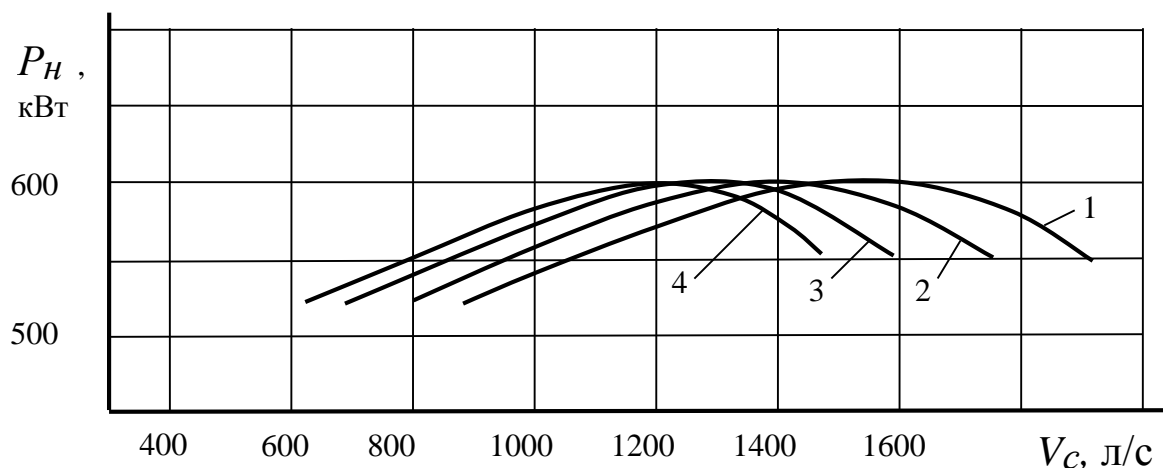
при повышенных расходах воды может быть меньше, чем на режимах с меньшими расходами.

На основе паспортных характеристик проведем сравнение потребляемой мощности одним из насосов (Д 6300-27) при регулировании дросселированием потока и перепуском воды.

Проводить сравнение нужно при одинаковом полезном результате, которым в данном случае является расход воды V_C в системе (обозначения соответствуют рисунку 4). На паспортных характеристиках насосов, в том числе на графиках рисунка 5, под расходом V_H понимают расход воды через насос. При дросселировании потока расход V_H совпадает с расходом воды V_C в системе (рисунок 4). Но при перепуске воды расходы V_H и V_C разные, количественная связь между ними соответствует зависимости (рисунок 4)

$$V_H = V_e = V_C + \Delta V_{\text{пер}} = V_C \left(1 + \frac{\Delta V_{\text{пер}}}{V_C} \right) . \quad (15)$$

Таким образом, при дросселировании потока параметры насоса при произвольном режиме будут соответствовать паспортным значениям, взятым при расходе воды $V_H = V_C$. При перепуске воды тот же расход воды V_C в системе будет обеспечиваться при параметрах насоса, найденных из тех же паспортных характеристик, но при расходе воды $V_H = V_e$. На основе этого с помощью формулы (15) легко построить сравнительные графики потребляемой насосом мощности в зависимости от расхода воды V_C в системе при разных методах регулирования. Такие графики для насоса Д 6300-27 приведены на рисунке 6. Для перепуска воды графики построены при одинаковых значениях отношения $\Delta V_{\text{пер}}/V_C$.



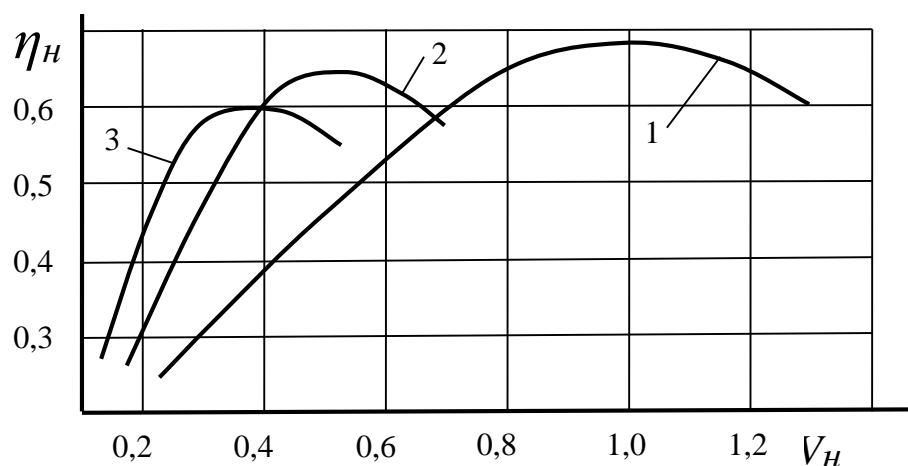
1 – дросселирование потока; 2, 3, 4 – перепуск воды соответственно при $\Delta V_{\text{пер}}/V_C = 0,1; 0,2; 0,3$

Рисунок 6 – Графики изменения потребляемой мощности насоса Д6300-27 при дросселировании потока и перепуске воды

Как видно из рисунка 6, в большей части интервала изменения расхода V_C мощность насоса при перепуске воды больше, чем при дросселировании потока. Но в остальной части интервала все наоборот, поэтому **утверждение о том, что при**

перепуске воды расход электроэнергии всегда больше, чем при дросселировании не соответствует действительности. Имеются насосы, для которых в соответствующих условиях эксплуатации результат будет противоположным.

Однако и дросселирование потока, и перепуск воды по расходу электроэнергии уступают частотному регулированию, в результате чего можно получить экономию энергии по сравнению с двумя другими методами регулирования. Как рассмотрено выше, это происходит потому, что при частотном регулировании мощность электропривода расходуется на создание напора и расхода воды, действительно необходимых в данный момент в системе. Но кроме этого при частотном регулировании удастся сохранять на различных режимах работы высокий КПД насоса. Для иллюстрации этого на рисунке 7 приведены взятые из [6] графики, показывающие характер изменения КПД при различной угловой скорости вала насоса (расходы воды приведены в долях от номинального расхода).



1, 2, 3 – угловая скорость вала насоса составляет соответственно 1500, 1400, 1300 об/мин

Рисунок 7 – Характер изменения КПД насоса при различной угловой скорости вала

Из рисунка 7 видно, что с уменьшением угловой скорости величины КПД насоса несколько уменьшаются, оставаясь высокими, а зона максимумов КПД смещается в сторону меньших значений расходов воды. Из-за этого при меньшей угловой скорости вала величины КПД могут быть существенно выше, чем при тех же расходах воды с неизменной угловой скоростью. Например, при $V_H = 0,5$ в условиях дросселирования потока, когда насос будет работать по характеристике 1 на рисунке 7, КПД насоса будет составлять 0,47, а при частотном регулировании по кривой 2 величина КПД может достигать 0,65.

Сохранение высокого КПД насоса при частотном регулировании дополнительно способствует экономии электроэнергии. Эти данные по КПД насоса являются ориентировочными, поскольку не относятся к конкретному насосу и условиям его работы. Конкретные данные по экономии электроэнергии приводят на основе имеющегося опыта применения частотного регулирования различных приводных электродвигателей.

Например, в системах водоснабжения применение частотного регулирования приводит к уменьшению потребляемой мощности на отдельных режимах на 32 %

[9], потребление энергии может снижаться на 5-15 %, а в отдельных случаях на 20-25 % [10]. По данным [4] при использовании частотного регулирования в электроприводах для различных техпроцессов экономия электроэнергии может составить 15-50 %, для водяных насосов – в среднем 35-45 %. По опыту использования частотного регулирования в Великобритании и Германии для различных электроприводов (смеситель в химпроизводстве, привод вязальной машины, ткацкий станок, упаковочный пресс, вентиляторы приточной и вытяжной системы, линия по разливу напитков, насос станции водоочистки и др.) снижение мощности составляет 6-27 % [11]. Учитывая большое число областей применения асинхронных электродвигателей для привода разнообразных машин и механизмов, использование для них частотного регулирования рассматривается в западных странах как одно из направлений существенной экономии энергоресурсов.

Кроме снижения затрат электроэнергии отмечаются и **другие преимущества использования частотного регулирования**. Например, в [7] отмечают, что при дросселировании потока возможен повышенный уровень шума на дроссельном устройстве. При применении частотного регулирования дроссельное устройство отсутствует, угловая скорость вала насоса изменяется плавно, поэтому считают, что повышение уровня шума исключается. По мнению [2, 7], при частотном регулировании исключаются гидравлические удары в системе, что **уменьшает опасность аварий и ремонтные затраты, но с этим нельзя согласиться**.

Появление гидроударов в системе зависит не от метода регулирования, а от скорости изменения давления. При быстром изменении угловой скорости вала возможно появление гидроудара, а плавное изменение проходного сечения при дросселировании потока к гидроудару не приведет. То есть, это зависит от режимов работы применяемых устройств и их правильной настройки и преимуществом частотного регулирования являться не может.

К преимуществам частотного регулирования относят также уменьшение потерь воды из системы через имеющиеся неплотности [3, 7, 10]. Однако **такого преимущества в действительности не существует**.

Считают, что при частотном регулировании насосы работают при более низких давлениях, чем при дросселировании потока [3, 7]. А в системах водоснабжения, например, при повышении напора воды на 10 м потери воды из системы за счет утечек увеличиваются на 2-7 % [3]. По данным [7] при использовании частотного регулирования электропривода насосов в системах водоснабжения за счет уменьшения утечек можно уменьшить расход воды на 2-5 %.

Утечки воды через неплотности действительно должны уменьшаться при снижении давления в гидросистеме, но ничего подобного при применении частотного регулирования не происходит. В системе, на которую работает насос, должны поддерживаться определенные величины давлений. Эти величины установлены для данной системы и должны обеспечиваться при любом методе регулирования. Например, на рисунке 4 при любом методе регулирования напор на входе в систему должен составлять ΔH_c . При дросселировании для обеспечения напора ΔH_c насос должен создавать больший напор ΔH_B , но действие этого напора распространяется только на трубопровод между насосом

и дроссельным устройством. То есть, уменьшение давления (напора) при частотном регулировании по сравнению с дросселированием действительно есть, иначе не было бы уменьшения мощности электропривода, но в самой системе гидравлические параметры остаются прежними. По этой причине разницы в утечках при названных методах регулирования быть не может. Поэтому указанное преимущество частотного регулирования является надуманным.

Вместе с преимуществами частотного регулирования электропривода в некоторых источниках отмечают **недостатки этого метода и не до конца решенные проблемы** его использования. К ним относят генерирование устройствами частотного регулирования электромагнитных помех, искажение напряжения питающей сети, из-за чего возможно снижение КПД и срока службы электродвигателей, снижение надежности электроснабжения из-за нарушений в питающей сети и отрицательное влияние на работу других устройств, подключенных к той же сети [12].

Существенным недостатком считают образование частичных разрядов в изоляции обмоток двигателя [12]. Работа устройств частотного регулирования связана с высокими скоростями изменения напряжения (до 2,5 – 9 кВ/мкс). При определенных сочетаниях параметров это может порождать эффект отраженных волн, что может приводить к 2 – 5-кратным перенапряжениям на клеммах электродвигателя. Это вызывает частичные разряды в изоляции обмоток, постепенно приводя к ее разрушению. Кроме того, в замкнутом контуре, образованном валом, подшипниками и корпусом, возникают высокочастотные токи, что приводит к ускоренному износу шариков и поверхностей качения, увеличенному расходу смазки [12].

Еще одной серьезной проблемой считают обеспечение электронных преобразователей способностью выдерживать кратковременные перерывы в электропитании. Проведенные в США исследования качества электроэнергии в низковольтных электросетях показывают, что 92 % нарушений качества представляют собой провалы напряжения до 50 % по величине с длительностью до 0,5 с [12]. По аналогичным исследованиям в Западной Европе продолжительность более 90 % нарушений качества не превышает 1 с [12]. Таким образом, электропривод должен выдерживать провалы напряжения длительностью до 1 с, иначе возможное прерывание техпроцесса или недопустимо, или может дорого обходиться производству. Имеются различные технические решения, позволяющие обеспечить это требование. К их числу относятся [12] использование в схемах преобразователей блоков повышения напряжения, активных выпрямителей, различных накопителей энергии, в частности, аккумуляторных батарей, конденсаторов, что усложняет установку, увеличивает габариты и стоимость.

Высокая стоимость частотных преобразователей является еще одним их недостатком и связана с наличием многочисленного сложного оборудования. Например, в состав тиристорного преобразователя частоты производства “Ансальдо-ВЭИ” для частотного регулирования привода водяных насосов типа ЦНС (номинальная мощность 1600 кВт) входят: высоковольтное тиристорное устройство, сглаживающий реактор, два линейных токоограничивающих реактора или столько же трансформаторов, шкаф управления, система водяного охлаждения, теплообменник водо-воздушный, два шкафа высоковольтных контакторов, три устройства сопряжения, центральный пункт управления (общая масса составляет около 3500 кг) [7].

Стоимость преобразователей частоты в странах ЕС характеризуется такими данными [13]: для установок малой мощности (0,75 – 4 кВт) средние затраты вместе с установкой составляют около 280 Евро/кВт, с увеличением мощности установки затраты уменьшаются и для интервала мощностей 30 – 500 кВт становятся примерно одинаковыми и составляют около 110 Евро/кВт. Из-за высокой стоимости и небольшого потенциала энергосбережения применение маломощных установок может быть экономически неоправданным [13]. По этой же причине на насосных станциях, где установлены несколько насосов, предпочитают использовать частотное регулирование на ограниченном числе насосов (на одном-двух), а остальные насосы при необходимости просто отключают или подключают [1, 6, 9]. В результате на станции в целом будет использоваться **ступенчатое регулирование расхода воды**, которое дополняется частотным регулированием одного-двух насосов.

Ступенчатое регулирование используется и при одном насосе [14], для привода которого применяются “двух- или четырехскоростные электродвигатели” (электродвигатели с несколькими вариантами обмоток, позволяющих изменять угловую скорость вала). Например, маломощные насосы Wilo-TOP-S (Германия) для систем отопления имеют три позиции ручного переключения на разную угловую скорость [15].

Ступенчатое регулирование работы насосов требует намного меньше затрат на оборудование, чем частотное регулирование. Но асинхронным электродвигателям при их прямом подключении требуется повышенный пусковой ток [2, 6, 7], который по данным [6] может в 6-7 раз превышать номинальное значение. Из-за этого нужно увеличивать сечение подводящего кабеля [6], увеличиваются нагрузки на обмотки электродвигателя, вал и подшипники [7]. При частых включениях это приводит к повышенным затратам на ремонт и снижению ресурса насосной установки. Для исключения этих недостатков применяют устройства “мягкого пуска” насоса [16]. Если такие устройства эффективно решают задачу ограничения пусковых токов, то тогда у частотного регулирования по сравнению со ступенчатым регулированием остаются фактически два взаимосвязанных преимущества, а именно: возможность плавного изменения угловой скорости вала и снижения потребляемой насосом мощности. Однако **при рациональной организации ступенчатого регулирования оба эти преимущества могут быть в значительной степени нивелированы**.

Допустим, насос можно переключать на разные режимы работы (ступени), отличающиеся угловой скоростью вала. На каждой из ступеней дополнительное регулирование осуществляется, например, дросселированием потока. Алгоритм управления работой насоса при этом можно построить таким образом, что одновременно с переходом на другую ступень изменять соответствующим образом положение дроссельного устройства. Тогда за счет выбора рационального алгоритма можно получить плавное, практически бесступенчатое изменение гидравлических параметров насоса. Кроме того, потери энергии на дросселирование потока при наличии нескольких ступеней работы значительно уменьшаются по сравнению с отсутствием ступеней, поскольку дополнительное дросселирование можно заменить переходом на другую ступень. Это относится не только к одному насосу, имеющему несколько ступеней регулирования, но и к насосной станции с несколькими насосами. Здесь вместо изменения угловой скорости вала насоса может использоваться их отключение или подключение поочередное или в нужной комбинации.

Таким образом, **ступенчатое регулирование может конкурировать с частотным регулированием**. По затратам электроэнергии на привод насосов выигрывает частотное регулирование, но его применение намного дороже. Итоговый результат неясен, имеющиеся данные по экономическим показателям не позволяют этот результат прогнозировать.

Однако складывается впечатление, что в последнее время частотное регулирование “стало модным”, возможно, это как-то связано с лоббированием чьих-то интересов. Во всяком случае, эффективность использования частотного регулирования преподносится в большинстве случаев однобоко, без серьезного анализа, учета различных условий.

Так, о рассмотренных выше и других недостатках применения частотного регулирования в большинстве случаев даже не упоминается. Применяемое при частотном регулировании оборудование является источником мощного высокочастотного электромагнитного излучения, которое не может не влиять на окружающую среду, но о наличии такого излучения и его влиянии тоже не упоминается.

Многие примеры по эффективности применения частотного регулирования не могут служить подтверждением эффективности из-за некорректного сравнения. Например, сравниваются затраты энергии на привод вентилятора или насоса для перекачивания пульпы [11] без всякого регулирования расхода и с частотным регулированием. Конечно, в таких условиях введение регулирования любым способом приведет к снижению затрат энергии по сравнению с отсутствием регулирования. В другом примере по линии разлива напитков [11] экономию энергии получили в результате замены всего электропривода (с более совершенным электродвигателем), частотное регулирование тут ни при чем.

Имеющиеся расчеты возможной эффективности использования частотного регулирования отличаются примитивной методикой, которая не выдерживает критики ни с технической, ни с экономической точки зрения. Например, для электропривода насоса мощностью 75 кВт эту мощность умножают на время работы насоса в год и берут от произведения 35 % как минимальную величину возможной экономии энергии. Полученный результат считают экономией электроэнергии за год [4]. Как видим, для исходного варианта считают, что насос непрерывно в течение года потребляет из сети номинальную мощность, чего в жизни не бывает. В другом варианте расчетов используют типовой упрощенный график нагрузки насоса за сутки, по которому определяют экономию энергии за сутки, и умножают ее на 365 для определения экономии за год [7]. В итоге можно получить только нереальные результаты, поскольку не существует потребителей, требующих 365 дней в году одинаковую производительность насоса.

При определении срока окупаемости преобразователей частоты в тех же расчетах не учитывают амортизации оборудования, затрат на обслуживание и ремонт, фактор времени и инфляцию, что уменьшает расчетный срок окупаемости. Например, по расчетам из [4] срок окупаемости составляет 5 месяцев, по расчетам из [7] – 2 года для одного исполнения преобразователя и 3 года для другого. Последние цифры представляются более реальными, но стоит в этих расчетах учесть дополнительно только фактор времени, как срок окупаемости становится неприемлемым.

Перечисленное приводит к сомнениям в однозначности экономической эффективности применения частотного регулирования. Скорее всего, во многих случаях показатели эффективности близки к границе между приемлемым и неприемлемым. Это подтверждается и практикой применения частотного регулирования на насосных станциях, о которой уже было сказано выше.

На насосных станциях с несколькими насосами при внедрении частотного регулирования применяют его не для всех имеющихся насосов, а только для одного-двух [1, 6, 9, 10, 16]. Остальные насосы не могут остаться совсем без регулирования, поскольку их

параметры должны быть согласованы с параметрами регулируемых насосов. Следовательно, на остальных насосах должны использоваться другие способы регулирования, например дросселирование потока. Если бы частотное регулирование было экономически выгодным без оговорок, то его следовало бы применить для всех насосов на станции для получения наибольшей экономии энергии, но такой вариант считают неприемлемым из-за большой стоимости оборудования.

Стоит отметить также, что при использовании частотного регулирования на одном-двух насосах работу станции в целом рассчитывают регулировать за счет включения или отключения остальных насосов. То есть, регулирование за счет изменения количества работающих насосов (ступенчатое регулирование) считается вполне приемлемым, связанные с этим недостатки (смотри выше) или относительно легко устранимы, или незначительны.

Таким образом, имеются **сомнения в однозначной экономической эффективности применения частотного регулирования водяных насосов**, которые частично подтверждаются зарубежным опытом. Вместе с тем при наличии нескольких насосов регулирование их работы можно производить путем изменения числа работающих насосов. При этом будет уменьшен расход энергии на их привод по сравнению с отсутствием отключения насосов, а оборудование для этого гораздо дешевле, чем для частотного регулирования. В итоге в этом случае из-за низкой стоимости оборудования можно рассчитывать на гарантированную экономическую эффективность. В целом есть основания рассматривать ступенчатое регулирование как рациональный способ регулирования работы водяных насосов, который **вполне может конкурировать с частотным регулированием**.

Основные выводы по результатам изложенного состоят в следующем:

1) рассмотрены применяемые методы регулирования работы водяных насосов, их особенности, определение параметров работы насоса и системы при разных методах;

2) предложены новые показатели для сравнения эффективности применяемых методов по затратам электроэнергии;

3) уточнены существующие оценки эффективности дросселирования потока и перепуска жидкости. Показано, что в одних условиях затраты электроэнергии будут меньше при использовании дросселирования, а в других условиях – при применении перепуска;

4) частотное регулирование электропривода насосов имеет неоспоримые преимущества по затратам электроэнергии по сравнению с дросселированием и перепуском. Вместе с тем частотному регулированию приписывают преимущества, которыми этот метод не обладает, и стараются не говорить о серьезных недостатках этого метода, из-за чего о нем может складываться необъективное представление;

5) одним из основных недостатков частотного регулирования является сложность и высокая стоимость оборудования. При небольшом потенциале энергосбережения, как следует из зарубежного опыта, применение такого оборудования становится неоправданным и вынуждает применять ступенчатое регулирование или вместо частотного, или одновременно с ним;

6) ступенчатое регулирование из-за низкой стоимости оборудования может конкурировать с частотным, но это требует тщательной проработки и обоснования.

Библиография

1. Байбаков С.А., Субботина Е.А. Частотно-регулируемый привод. Регулирование центробежных насосов и методы регулирования отпуска тепла в тепловых сетях. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: – [new/assets/files/publ-vti/к_0351-Методы ...](http://new/assets/files/publ-vti/к_0351-Методы...) (доступ свободный) - Загл. с экрана.
2. Все о частотных преобразователях. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: - <http://gme.in.ua/> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
3. Использование частотно-регулируемого электропривода в насосных станциях. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://www.privod-news.ru/february/nasos.htm> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
4. Расчет экономической эффективности внедрения преобразователей частоты для насосных агрегатов. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://inv.t.kz/> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
5. Экономичные методы регулирования в насосных установках. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - http://www.masters.donntu.edu.ua/2001/fema/lavrinenko/diss/1_3.htm (доступ свободный) - Загл. с экрана.
6. Экономическая эффективность применения частотного электропривода переменного тока. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://wodozabor.narod.ru/chastota.doc> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
7. Техничко-экономическое обоснование применения тиристорного преобразователя частоты типа ТПЧ-6/1600-3 УХЛ4.2 для привода насосов типа ЦНС-240×1900 2ТМ на КНС ОАО “Газпромнефть ННГ”. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://nidec-asi-vei.ru/uploads/file/teotpchgazprom.pdf> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
8. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж и др.-М.: Стройиздат, 1988.- 432 с.
9. Повышение энергоэффективности насосных установок. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - http://www.agrovodcom.ru/infos1/energo_nasos.php (доступ свободный) - Загл. с экрана.
10. Регулируемый электропривод насосов. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://engineeringsystems.ru/r/reguliruemyy-elektroprivod-nasosov.php> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
11. Примеры энергосбережения средствами электропривода в различных установках. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://powergroup.com.ua/> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
12. Особенности применения современных регулируемых электроприводов. Зарубежный опыт. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://powergroup.com.ua/> (доступ свободный) - Загл. с экрана.
13. Потенциал энергосбережения средствами электропривода и европейский рынок энергосберегающих устройств. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://powergroup.com.ua/> (доступ свободный) - Загл. с экрана.

14. Регулирование подачи центробежных насосов. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://www.nasosinfo.ru/node/19> (доступ свободный) - Загл. с экрана.

15. Насосная азбука WILO. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - <http://yandex.ua/clck/jsredir?from=yandex.ua%3Byandsearch%3Bweb%3B%3B&text=&etext=493.w99jEtg3w7tRT8RcOWfa> (доступ свободный) - Загл. с экрана.

16. Управление режимами оборудования на тепловых станциях средствами электропривода. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: - http://powergroup.com.ua/5_3_upravlenie_rezhimami_oborudovaniya_na_teplovich_stantsiyach_sredstvami_elektroprivoda (доступ свободный) - Загл. с экрана.

[На главную](#)

[Комментарии](#)