



АЛГОРИТМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Гордейчик А.В.
заместитель директора
по направлению «Электропривод
и автоматизация»

Попов А.В.
заместитель директора,
руководитель
«Центра инжиниринговых услуг»

Усачев А.П.
канд. техн. наук,
технический директор

ООО «Сибирь-мехатроника», г. Новосибирск

Рассматриваются алгоритмы группового управления насосными агрегатами. Основное внимание уделено процессам переключения насосных агрегатов. Выделено два основных алгоритма. На основании проведенного анализа режимов работы предлагается модернизация наиболее распространенного алгоритма управления насосами, обеспечивающая безопасную работу насосов в рабочей зоне.

Ключевые слова: частотное регулирование, групповое управление, центробежный насос.

Все насосные станции водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения имеют в своем составе несколько насосных агрегатов, объединённых по всасу и напору, - группу насосных агрегатов. Число агрегатов определяется возможным диапазоном расхода, перспективой, и необходимым резервом, и составляет от 2 до 8 штук. Соответственно, все устройства управления представляют собой системы группового управления. Сказанное касается и систем частотного управления насосами – станций частотного управления (СЧУ) группой насосных агрегатов. Разновидностей СЧУ – масса. Все их условно можно разделить на три группы:

1. СЧУ с индивидуальными преобразователями частоты (ПЧ) на каждый насосный агрегат.
2. СЧУ с одним ПЧ на группу насосных агрегатов.
3. СЧУ комбинированные (вся группа разбита на подгруппы, например, посекционнно, каждая из которых содержит станцию с одним ПЧ) (рис. 1). С точки зрения алгоритма управления данный тип СЧУ является наиболее универсальным.

Ниже рассматриваются СЧУ с одним ПЧ на группу насосных агрегатов.

Групповое управление предполагает переключения (подключение/отключение) дополнительных насосных агрегатов по определенному

алгоритму. Для формирования команд на переключение требуется:

1. Определение (назначение) приоритетов работы насосных агрегатов внутри группы (например, основной, 1-ый дополнительный, 2-ой дополнительный и т.д.).
2. Определение (назначение) критериев (условий) недостаточной/избыточной производительности.
3. Определение алгоритма группового управления.

Определение приоритетов осуществляется путем непосредственного назначения оператором.

В качестве основного критерия (условия) недостаточной/избыточной производительности обычно принимаются отклонение реального значения технологического параметра от заданного значения – ошибка регулирования технологического процесса.

Оценка ошибки регулирования осуществляется системой управления с частотным регулированием.

При недостаточной производительности отклонение заданного значения процесса от реального формирует положительную ошибку регулирования, что приводит к разгону управляемого от ПЧ агрегата. При достижении максимальных

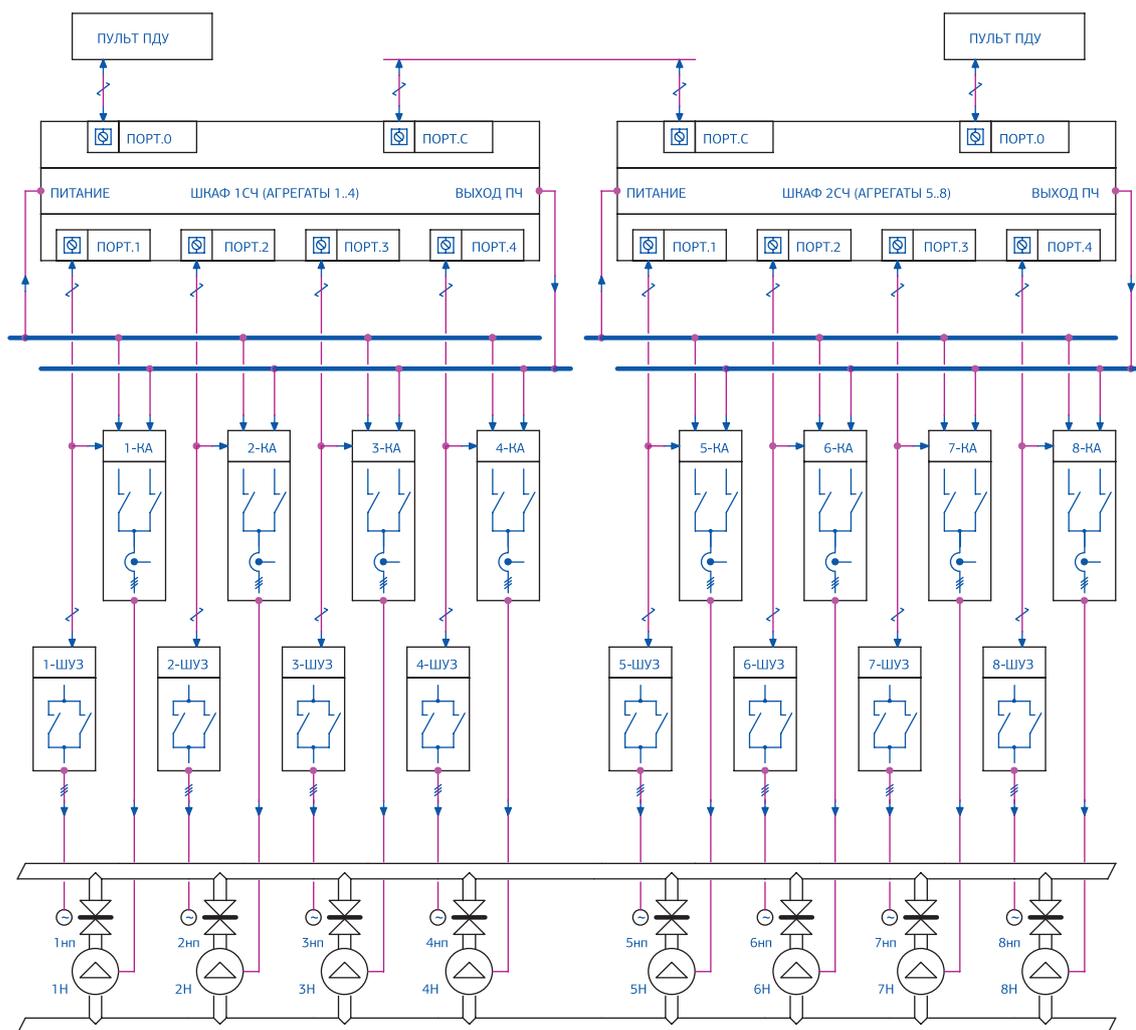


Рисунок 1

Структурная схема аппаратуры группового управления комбинированной СЧУ (две подгруппы, каждая с ПЧ (на схеме шкаф СЧ) и управлением четырьмя насосными агрегатами). Обозначения на схеме: СЧ – шкафы станций с преобразователем частоты (ПЧ); КА – шкафы коммутационной аппаратуры подключения насосных агрегатов непосредственно к сети или к выходу ПЧ; ШУЗ – шкафы управления задвижкой; НП – напорная задвижка; Н – насосный агрегат (схема приведена на базе оборудования «Сибирь-мехатроника»).

оборотов (насыщение системы сверху) происходит рост ошибки регулирования, что является свидетельством недостаточной производительности.

В случае избыточной производительности отклонение заданного значения процесса от реального формирует отрицательную ошибку регулирования, что приводит к снижению оборотов управляемого от ПЧ агрегата. При достижении минимальных оборотов (насыщение системы снизу) ошибка регулирования растет, что является свидетельством избыточной производительности.

Дополнительным критерием является, как правило, величина токовой загрузки агрегатов. Увеличение/снижение токовой нагрузки агрегата

может свидетельствовать о необходимости запуска /останова дополнительного агрегата.

Переключения (подключение/отключение) дополнительных насосных агрегатов осуществляются по определенному алгоритму. Можно выделить следующие типы переключений:

1. «ПЧ+С» – групповое управление в системе с одним ПЧ. В случае недостаточной производительности дополнительный насосный агрегат подключается напрямую к сети. Преобразователь частоты всегда подключен к основному двигателю и не переключается (кроме аварийных режимов). В случае избыточной производительности дополнительный агрегат, имеющий низший приоритет, отключается от сети.



2. «ПЧ–С» – групповое управление в системе с одним ПЧ. В случае недостаточной производительности двигатель насоса, работавший от ПЧ, переводится на работу от сети и преобразователь частоты переключается к следующему насосному агрегату. В случае избыточной производительности агрегат, имеющий низший приоритет, отключается от сети и подключается к преобразователю частоты. Ниже рассматриваются процессы переключений для вышеприведенных алгоритмов и их особенности.

Алгоритм «ПЧ + С»

Это самый распространённый алгоритм. Его часто именуют как каскадное управление.

Эпюры работы алгоритма приведены на рисунке 2. Предполагается, что система замкнута по давлению. Включение дополнительного насосного агрегата «от Сети» при формировании системой сигнала недостаточной производительности приводит к всплеску давления в общем коллекторе (рис. 2). Всплеск напора может достигать значительных величин и продолжительностью до 1 минуты, пока замкнутая система не отработает возмущение. Предполагается, что напорные задвижки дополнительных насосов открыты и они неуправляемы, что характерно для подкачивающих насосных станций, напорные задвижки которых, как правило, не электрифицированы.

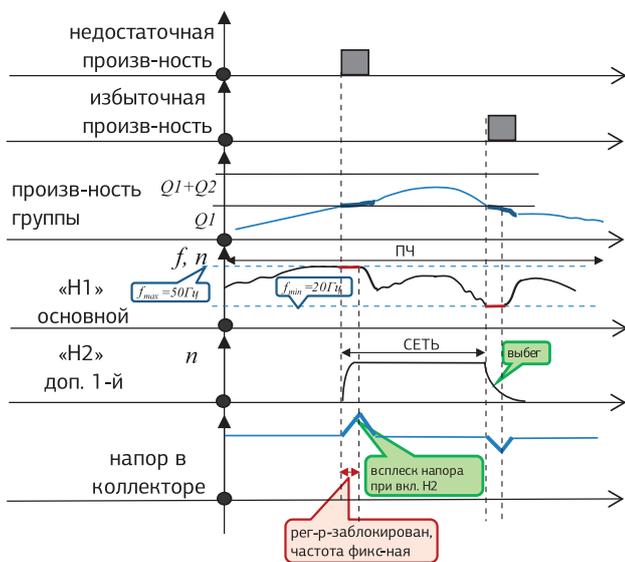


Рисунок 2
Эпюры работы алгоритма «ПЧ+Сеть» (значения f_{max} и f_{min} указаны условно).

Кроме того, на рисунке показан случай, когда на время переключения регулятор технологического параметра блокируется и его выходной сигнал (задание частоты ПЧ) фиксируется на предыдущем значении.

Для уменьшения всплеска напора можно внести «предсказание» - перед включением дополнительного насоса снизить частоту питания насоса Н1. На рисунке 3 приведены эпюры такого алгоритма.

Сказанное поясняется на напорных характеристиках (рис. 4). На рисунке рассматриваются траектории движения рабочих точек насосов со следующими условными номинальными параметрами насоса $Q_{ном} = 2400 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $H_{ном} = 60 \text{ м.в.ст.}$

Рассматривается процесс увеличения расхода с $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ в замкнутой системе по давлению с $H_{зад} = 55 \text{ м.в.ст.}$ Первоначально, при расходе $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$, в работе находится один насосный агрегат Н1 с ПЧ – точки «1» на рисунке 4. При увеличении расхода точка «1» перемещается по горизонтальной линии $H_{зад}$ до момента увеличения частоты ПЧ до 50 Гц. Далее возникает ошибка рассогласования и при $Q=3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ наступает момент выполнения условия недостаточной производительности – формируется соответствующий сигнал на включение дополнительного насоса Н2. Процесс подключения

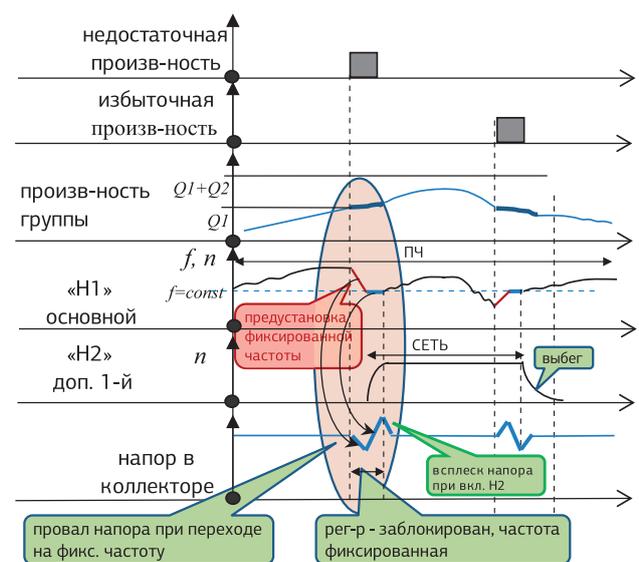


Рисунок 3
Эпюры работы алгоритма «ПЧ+Сеть» с предсказанием.

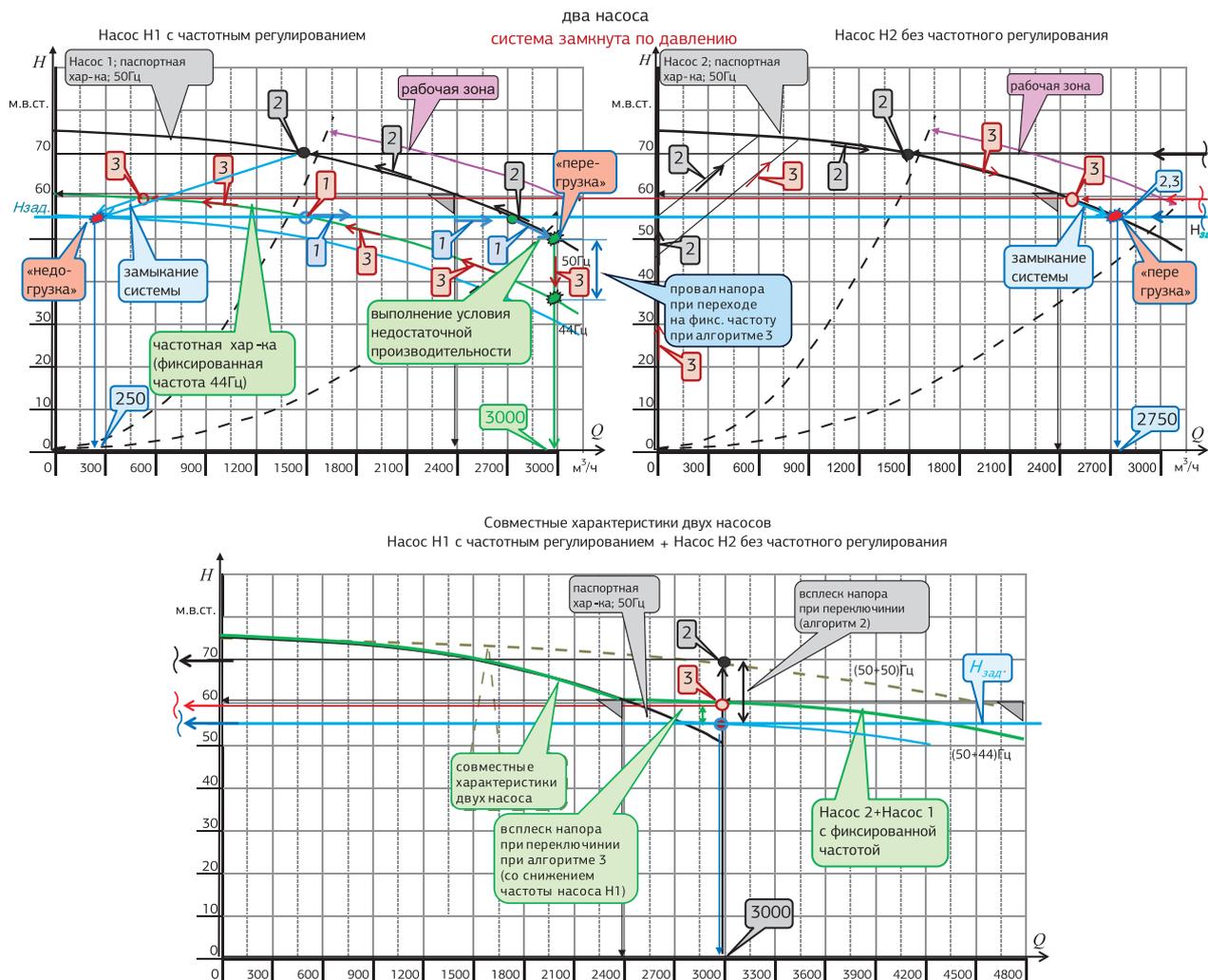


Рисунок 4

Групповое управление с одним преобразователем частоты, алгоритм работы ПЧ+Сеть (увеличение производительности с 1500 до 3000 м³/ч - включение насоса N2 от Сети): «1» – в работе насос N1 с частотным регулированием (увеличение расхода с 1500 до 3000 м³/ч); «2» – подключение насоса N2 без снижения частоты насоса N1 (на время переключения технологический регулятор заблокирован); «3» – подключение насоса N2 со снижением частоты насоса N1 с 50Гц до 44Гц (на время переключения технологический регулятор заблокирован).

дополнительного насоса на рисунке 4 отражен траекториями движения рабочих точек насосов «2» и «3». Рабочие точки «2» относятся к случаю «простого» включения дополнительного насосного агрегата, точки «3» – к предлагаемому алгоритму (со снижением частоты ПЧ). Во всех случаях предполагается, что на время переключений технологический регулятор блокируется и его выходное значение фиксируется. На совместной характеристике двух насосов (третья характеристика на рисунке 4) показана величина всплеска напора при переключении по «случаю 2 – переключение без предсказания». Алгоритм «предсказания» предполагает перед включением дополнительного насоса снижение частоты питания насоса N1. На рисунке 4 это рабочие точки

«3». На рисунке снижение частоты показано до 44 Гц. По траекториям движения рабочих точек «3» видно, что всплеск напора при введении «предсказания» значительно уменьшается.

Следует отметить, что независимо от способа переключения после окончания переходных процессов производительности насосов N1 и N2 устанавливаются следующие: $Q_1=250$ м³/ч, $Q_2=2750$ м³/ч. Рабочая точка насоса N1 находится в левой недопустимой зоне (левая граница рабочей зоны при $H=55$ м.в.ст. равна 1400 м³/ч) [1, 2].

Как отмечалось, рассмотренный алгоритм наиболее распространен и в совокупности с «предсказанием» находит широкое применение.

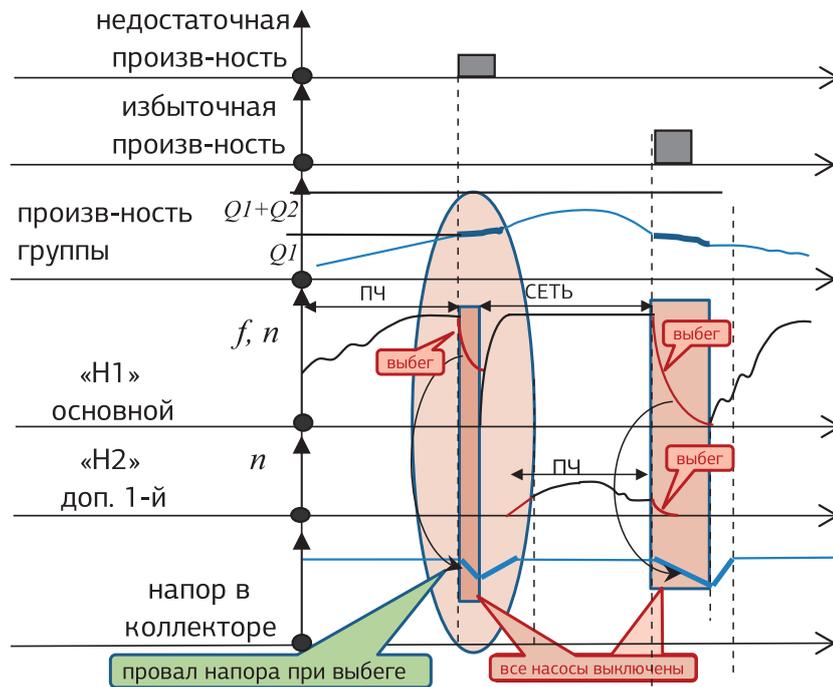


Рисунок 5
Эпюры работы алгоритма «ПЧ-Сеть».

Алгоритм «ПЧ – С»

Алгоритм встречается под названием каскадно-частотный. Алгоритм имел широкое распространение в начале двухтысячных годов. Потом постепенно от него практически все отошли. Все дело в том, что он имеет один крупный недостаток.

Эпюры работы алгоритма приведены на рисунке 5.

Данный алгоритм предполагает, что при увеличении производительности производится переключение двигателя насосного агрегата, работающего от ПЧ, на сеть и наоборот, при уменьшении производительности – переключение двигателя насосного агрегата, работающего от сети, на работу от ПЧ (рис. 5). Переключение двигателя насосного агрегата, работающего от ПЧ, на сеть возможно двумя путями:

- с синхронизацией выходного напряжения ПЧ с сетью (по амплитуде, частоте и фазе);
- без синхронизации.

Первый способ не находит практического применения, так как он требует дополнительных аппаратных и финансовых затрат.

Для второго способа характерен другой недостаток – после отключения ПЧ требуется выдержка времени до момента подключения двигателя к сети. Выдержка необходима для спада ЭДС статора. В противном случае, в момент включения двигателя на сеть, возможен двойной пусковой ток (когда ЭДС сети будет в противофазе с ЭДС двигателя). Как известно, ЭДС двигателя спадает с постоянной времени ротора, поэтому необходимая выдержка времени, в зависимости от мощности, составляет 1-3 сек. В течение этого времени, зачастую, поток жидкости в трубопроводе меняет направление и происходит срабатывание обратного клапана. Данное явление для большинства ВНС недопустимо. Более того, при подключении первого дополнительного насоса, в течение этого времени, происходит прерывание циркуляции, что также для многих насосных станций недопустимо. Именно по этим причинам данный алгоритм имеет весьма ограниченное применение.

Кроме того, при избыточной производительности производится отключение агрегата от сети и его подключение к преобразователю частоты. Включение преобразователя частоты возможно после ожидания выбега двигателя (останова по инерции), либо путем «подхвата на лету». То и другое предполагает существенную паузу, что ведет к тем же последствиям.

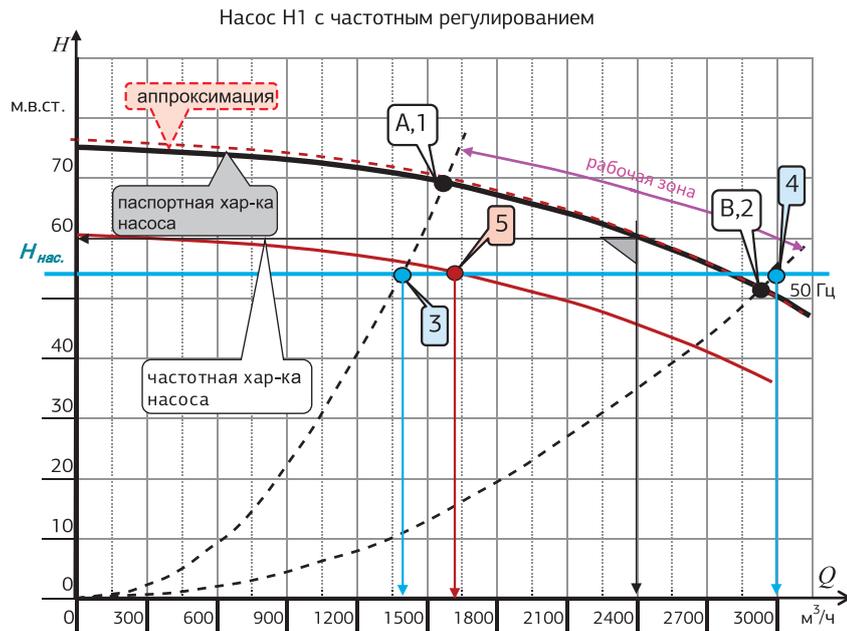


Рисунок 7

Алгоритм вычисления рабочей точки насоса №1,

A, B – паспортные границы рабочей зоны; 1, 2 – точки аппроксимации; 3, 4 – границы рабочей зоны при $H_{нас}$ (вычисление); 5 – текущее положение рабочей точки при $H_{нас}$ и $n_{нас}$ (вычисление).

Для реализации данного алгоритма необходимо знать текущую производительность насоса №1 и производительность на левой границе рабочего диапазона при текущем напоре насоса (минимально допустимая производительность насоса).

Текущий напор насоса вычисляется как разность показаний датчиков давления на всасе насоса и его выходе (напоре).

Производительность на левой границе рабочего диапазона вычисляется по соответствующей параболе левой границы рабочего диапазона (исходная информация – из паспортных данных).

Текущая производительность насоса с частотным регулированием может быть либо измерена, либо косвенно вычислена.

1. Непосредственное измерение производительности насоса путем установки расходомера в его цепь реально не реализуемо, так как практически нет возможности установки в цепь насоса индивидуального расходомера.

2. Вычисление производительности насоса с частотным регулированием осуществляется по напорной характеристике насоса, информации от преобразователя частоты и дополнительных

датчиков давления [3, 4, 5]. Процедура вычисления поясняется рисунком 7:

а) по паспортной напорной характеристике насоса вычисляются коэффициенты аппроксимирующего уравнения H_ϕ и S_ϕ [3, 4, 5]

$$H = H_\phi \frac{n^2}{n_{ном}^2} - S_\phi Q^2.$$

Для этого, как правило, берутся точки 1 и 2, близкие к границам рабочей области насоса (рис. 7):

$$H_\phi = H_1 + S_\phi Q_1^2 \quad S_\phi = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2}$$

б) Уравнения парабол рабочей зоны будут:

левая парабола $H = K_A * Q^2$, где $K_A = \frac{H_A}{Q_A^2}$;

правая парабола $H = K_B * Q^2$, где $K_B = \frac{H_B}{Q_B^2}$.

в) Границы левой и правой рабочей зоны при $H_{нас}$:

граница левой зоны – $Q_3 = \sqrt{\frac{H_{нас}}{K_A}}$;

граница правой зоны – $Q_4 = \sqrt{\frac{H_{нас}}{K_B}}$;

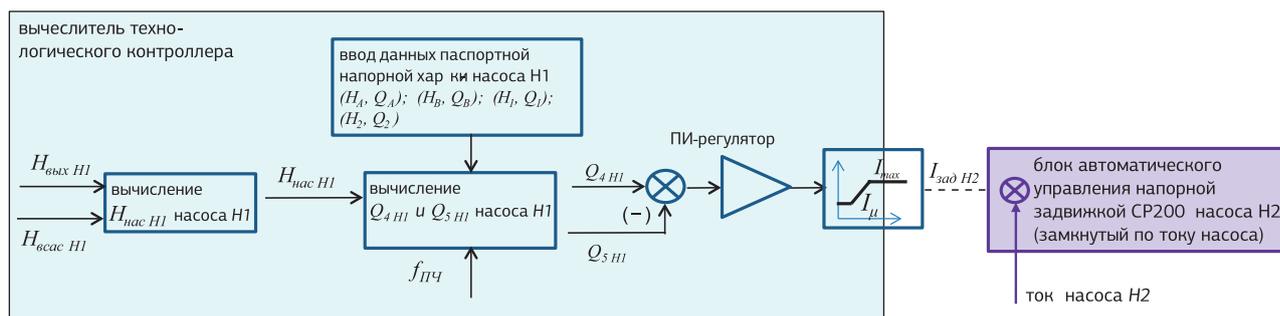


Рисунок 8

Функциональная схема регулирования рабочей точки насоса Н1 с частотным регулированием путем управления напорной задвижкой насоса Н2.

- d) Вычисление текущей производительности насоса (из аппроксимирующего уравнения напорной характеристики насоса №1):

$$Q_5 = \sqrt{\left(\frac{H_\phi}{S_\phi} \frac{n^2}{n_{НОМ}^2} - \frac{H_{нас}}{S_\phi} \right)}$$

Далее при включении насоса №2 необходимо вести сопоставление текущей производительности насоса №1 Q_5 и его минимально допустимого значения (граница левой зоны – Q_3). При уменьшении производительности насоса №1 до значения минимально допустимого ($Q_5=Q_3$) необходимо прекратить открывание напорной задвижки насоса №2. При дальнейшем увеличении суммарного расхода напорная задвижка насоса №2 должна продолжить процесс открывания до максимальной производительности насоса (при этом рабочая точка насоса №1 должна удерживаться на границе рабочей зоны). И только при дальнейшем увеличении расхода производительность насоса №1 может увеличиваться.

Для реализации вышеописанного алгоритма необходимо использование специализированного технологического контроллера с достаточной вычислительной мощностью типа СТК500 (<http://www.sibmech.ru/elektroprivod-i-avtomatizaciya/produktsya/oborudovanie-dlya-avtomatizacii-i-telemetrii/technologicheskii-kontroller-STK500/>).

Функциональная схема регулирования рабочей точки насоса Н1 с частотным регулированием путем управления напорной задвижкой насоса Н2 без частотного регулирования на базе СТК500 и СР200 приведена на рисунке 8.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее удовлетворительным является алгоритм группового управления с каскадным управлением и «предискажением» по частоте.
2. Всем алгоритмам группового управления с одним ПЧ присущ общий недостаток – при включении дополнительного насоса частотно-регулируемый насос оказывается вне рабочей зоны.
3. Предлагается модернизированный алгоритм – производить контролируемое дросселирование насоса без частотного регулирования путем контроля положения рабочей точки насоса с частотным регулированием на границе рабочей зоны.
4. Для реализации данного алгоритма предлагается использование специализированного технологического контроллера с достаточной вычислительной мощностью типа СТК500 и блоки серии СР200.

Литература:

1. Ю.Г. Багаев, Н.В. Карпов, А.П. Усачев. Проблема параллельной работы насоса с частотным регулированием. // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. №4.
2. А.П. Усачев, А.В. Гордейчик. Особенности частотного регулирования насосами с учетом рабочего диапазона: международный форум «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК-2014, Международная конференция «Водоснабжение и водоотведение населенных мест», 4-5 июня 2014, Москва. - М., МВЦ «Крокус Экспо».
3. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. М.: Энергоатомиздат, 2006.
4. Б.С. Лезнов, С.В. Воробьев. Работа центробежных насосов с переменной частотой вращения. // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. №9.
5. А.П. Усачев. Управление параллельной работой центробежных насосов. // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. №2.