

Анализ технических решений: устройства плавного пуска, частотно-регулируемый привод или параллельная схема управления центробежными насосами

Как достичь оптимального энергосбережения в гидравлических системах с центробежными насосами? Этот вопрос сегодня все чаще возникает у специалистов и руководителей предприятий. Так какие же приборы способны сократить период окупаемости и повысить энергоэффективность – устройства плавного пуска, частотно-регулируемые приводы или использование параллельной схемы управления насосами? Авторы статьи предлагают тщательно проведенный анализ различных технических решений, иллюстрированный примерами внедрения на производстве, схемами и таблицами.

ООО «АББ», г. Москва

Обеспечение энергоэффективности – одна из наиболее актуальных и в то же время сложных задач в настоящее время. Сокращение затрат на потребление электроэнергии – это один из методов повышения рентабельности производства и эффективной эксплуатации технологических линий. Общий анализ предприятий в самых различных областях применения показывает, что затраты, связанные с закупкой оборудования и простоем производства из-за обслуживания и ввода нового оборудования в эксплуатацию, могут быть частично компенсированы за счет экономии на потреблении электроэнергии.

Энергоэффективные технологии – одно из приоритетных направлений компании АББ. Самые современные методы и разработки для обеспечения наиболее эффективной эксплуатации нашли свое применение в современном оборудовании компании АББ – преобразователях частоты и устройствах плавного пуска*, которые широко применяются для управления приводными механизмами насосных установок и позволяют существенно сократить потребление электроэнергии на объектах водоподготовки и водоочистки.

Часто используемый механический способ управления подачей насоса, или метод дросселирования, является крайне неэффективным с точки зрения экономии электроэнергии. В связи с этим возникает вопрос: какое из двух технических решений является самым экономичным методом снижения потребления энергии – частотно-регулируемые приводы или циклическое управление (рис. 1)? По существу, характеристика гидравлической системы, в которой используется центробежный насос, является определяющим фактором при выборе одного или другого метода управления.

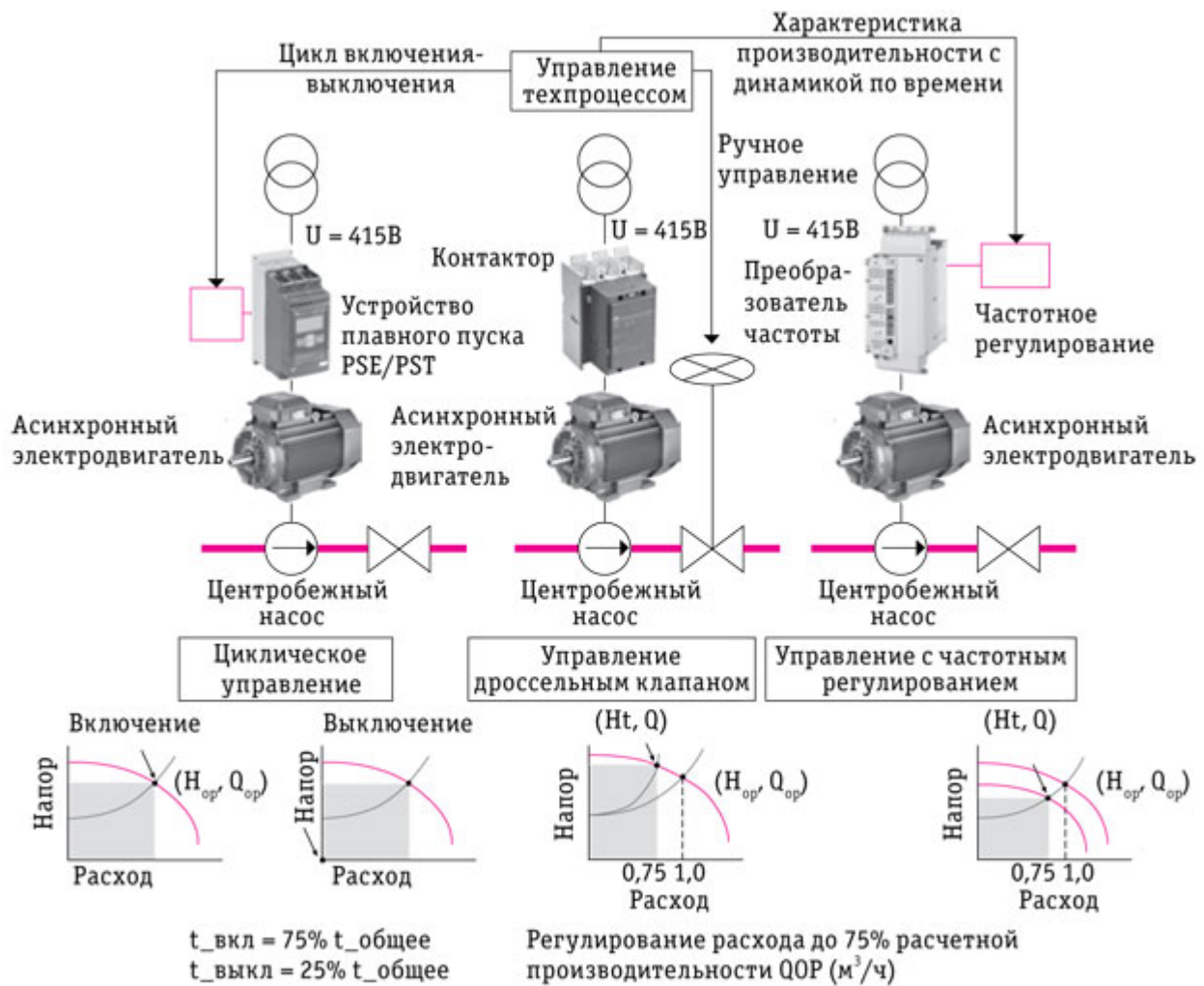


Рис. 1. Регулирование расхода в системе посредством дросселирования, циклического и частотного управления

В сфере обработки сточных вод включение/выключение центробежных насосов, как правило, выполняется под контролем системы управления технологическим процессом. Остаточная вода (то есть вода, поступающая из жилых или коммерческих зданий) обычно собирается в отстойниках или резервуарах для сточных вод до момента ее перекачки с помощью насосов на муниципальные водоочистные станции [1]. С учетом некоторой периодичности, использование устройств плавного пуска значительно снижает риск засорения насосов отходами, содержащимися в воде.

Циклическое управление является интересной альтернативой частотно-регулируемому приводу, несмотря на утрату гибкости при регулировании расхода. Другими словами, устройство плавного пуска считается подходящей и конкурентоспособной технологией, защищающей асинхронный электродвигатель от электрических перегрузок, механических ударов и вибрации при пуске, а также от гидравлических ударов в трубопроводной системе, возникающих при останове насоса. Кроме того, электродвигатель эксплуатируется в оптимальной рабочей точке и выключается на остальное время.

В следующих разделах приводится анализ энергосбережения и окупаемости решений управления с частотным регулированием и циклического управления для двух центробежных насосов (90 кВт и 350 кВт).

Типовая насосная система

При разработке насосной системы основным условием является обеспечение требуемого расхода Q_{op} [м³/ч]. В идеальной системе выбранный насос имеет характеристику $Q_{бер}$ [м³/ч], совпадающую с характеристикой Q_{op} [м³/ч]. На практике обычно выбирается насос большего типоразмера (рис. 2). В результате чего насос работает со сниженным гидравлическим КПД в большей части диапазона производительности. Сказанное выше проиллюстрировано на рис. 3 для двух центробежных насосов Aurora с номинальной мощностью 90 кВт и 350 кВт.

Таблица 1. Сравнительная характеристика параметров двух насосов

Изготовитель	Мощность (кВт)	H_{max} (м)	$H_{бер}$ (м)	$Q_{бер}$ (м ³ /ч)	η_{max} (%)
Aurora	90	43,6	27,6	575	74,8
Aurora	350	52,7	3,8	2,500	84,5

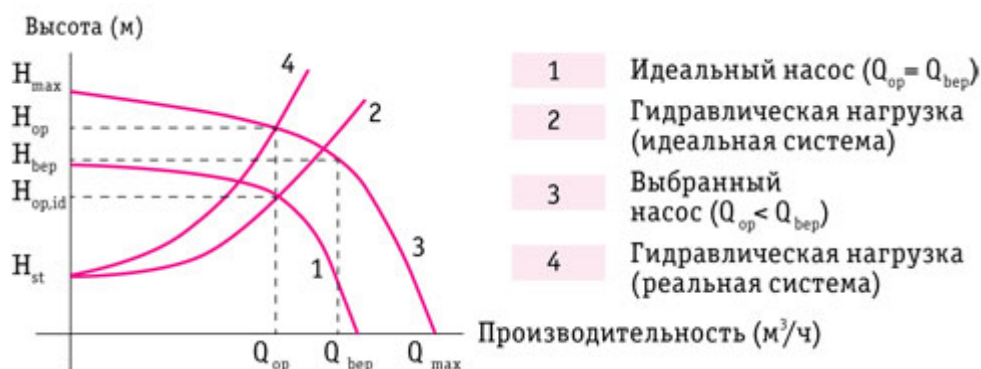


Рис. 2. Выбор насоса для промышленной установки

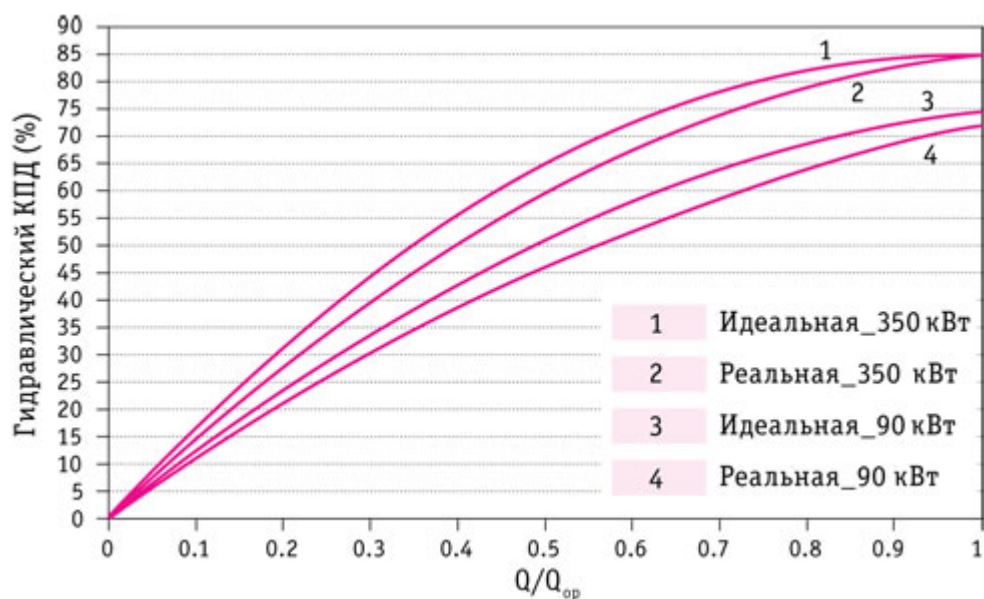


Рис. 3. Уменьшение гидравлического КПД в насосах 90 кВт и 350 кВт вследствие изменения параметров компонентов системы на 15%

Для анализа возможностей по экономии электроэнергии в этих насосах рассматривались три различные гидравлические системы: с преобладанием напора на преодоление трения, то есть отношение (?) статического напора H_{st} [м] к максимальной гидравлической высоте H_{max} [м] составляет 5 %; с преобладанием статического напора (? составляет 50 %); с комбинированным напором (? составляет 25 %) (рис. 4).

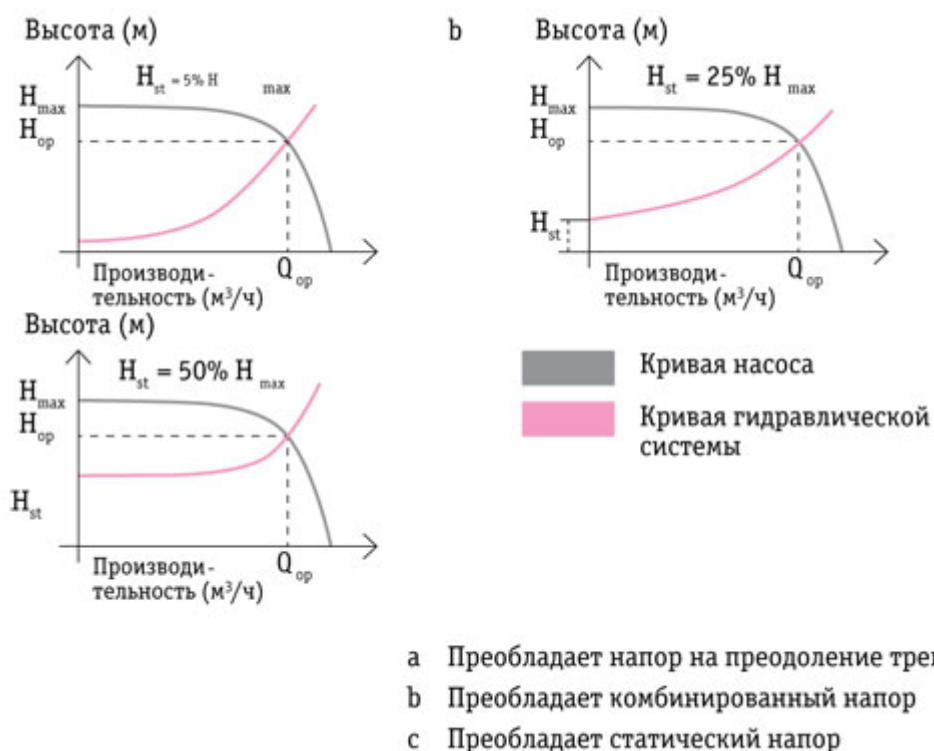
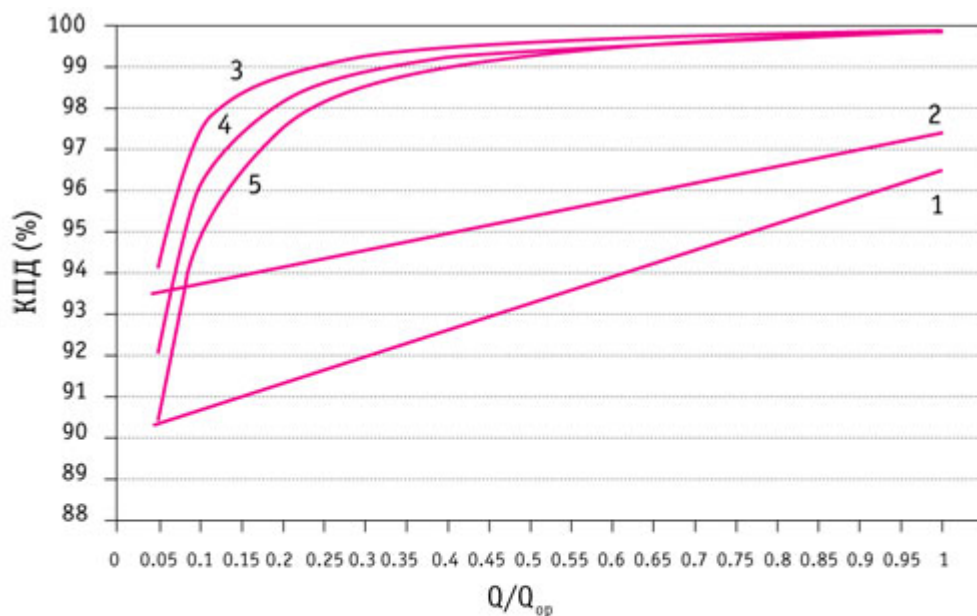


Рис. 4. Гидравлические системы, выбранные для анализа возможного энергосбережения

Рабочие характеристики преобразователя частоты, устройства плавного пуска и электродвигателя

Преобразователи частоты имеют высокий КПД (η_{conv}), который естественным образом уменьшается, когда происходит снижение выходной мощности по отношению к номинальному значению. При работе УПП в установившемся режиме, то есть при активации байпаса, КПД устройств плавного пуска составляет практически 100 %. Следует отметить, что КПД устройств плавного пуска заметно снижается с увеличением количества пусков в час и сокращением интервалов рабочего времени, что обусловлено дополнительными потерями Джоуля при пуске и останове электродвигателя, а также работой тиристорных (рис. 5).



- 1 Преобразователь частоты (90 кВт)
- 2 Преобразователь частоты (350 кВт)
- 3 Устройство плавного пуска (1 пуск в час)
- 4 Устройство плавного пуска (2 пуска в час)
- 5 Устройство плавного пуска (3 пуска в час)

Рис. 5. Изменение электрического КПД (%) устройства плавного пуска и преобразователя частоты с насосной нагрузкой

Принятые недавно более строгие стандарты (классы IE) гарантируют повышенный КПД электродвигателя – при его работе под нагрузкой [3, 4] (рис. 6 и 7). На КПД электродвигателя (в строгой зависимости от класса) влияет использование либо преобразователя частоты, либо устройства плавного пуска: КПД снижается при питании от быстродействующего выходного инвертора ПЧ вследствие наличия гармонических искажений по току и напряжению, но не изменяется при питании от УПП после окончания переходного процесса разгона благодаря синусоидальной форме напряжения на выходе устройства.

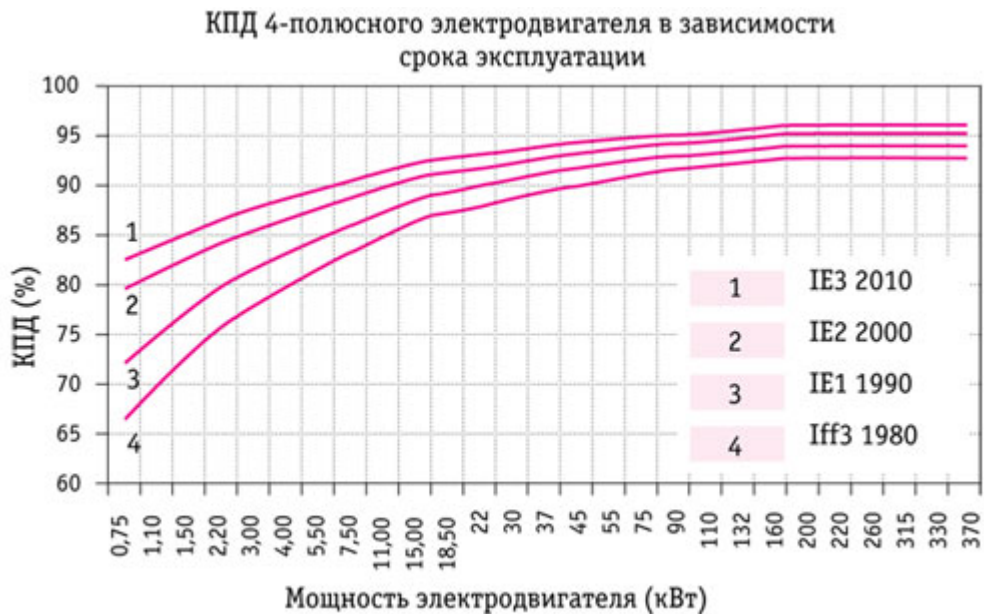


Рис. 6. Влияние класса энергоэффективности электродвигателя на КПД насоса

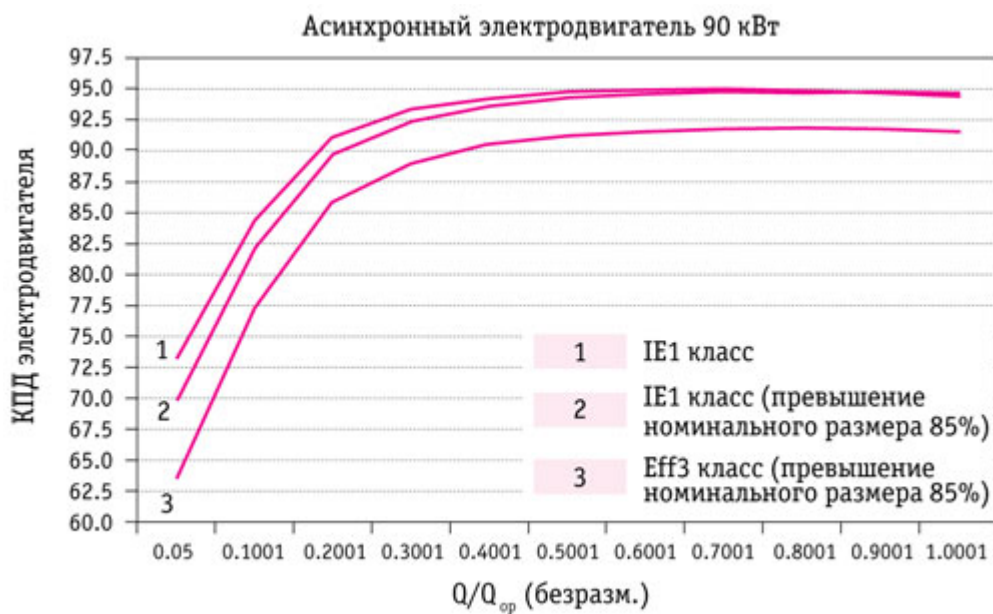


Рис. 7. Изменение КПД электродвигателя с гидравлической нагрузкой

Влияние изменения характеристик компонентов системы, класса энергоэффективности электродвигателя и гармонических потерь в реальной системе приведено в табл. 2.

Таблица 2. Влияние большего типоразмера системы, класса электродвигателя и потерь от гармоник на потребление электроэнергии ($P_n = 90$ кВт – частота коммутации 4 кГц)

	Нагрузка (%)				
	5%	25%	50%	75%	100%
Снижение КПД (%), вызванное:					
1 – насосом большего типоразмера (на 15%)	-1,3	-3,8	-6,0	-4,5	-2,1
2 – электродвигателем увеличенного типоразмера (на 15%)	-3,2	-1,2	-0,4	-3,0	0,2
3 – классом энергоэффективности	-9,5	-3,4	-3,0	-3,0	-3,0
4 – потерями от гармоник	-7,0	-2,1	-2,4	-1,9	-1,3
Увеличение потребления энергии (%)	26,5	11,7	13,3	10,3	6,6

Экономия электроэнергии

Энергосбережение, достигнутое при использовании частотного и циклического управления в насосных системах 90 кВт и 350 кВт, показано на рис. 8 и 9. В системах с преобладанием напора на преодоление трения ($\eta = 5\%$) частотное управление обеспечивает более высокую экономию энергии практически во всем рабочем диапазоне (от 7 до 98 %) для обеих насосных систем. В случае насоса 90 кВт и в системе с преобладанием статического напора ($\eta = 50\%$) циклическое управление является лучшим техническим решением по сравнению с использованием частотного преобразователя для всех рабочих точек. Преобразователь частоты обеспечивает чуть более высокую экономию энергии для насоса мощностью 350 кВт, но только в диапазоне от 75 до 92 % производительности насоса. При рассмотрении комбинированной гидравлической системы ($\eta = 25\%$), управление посредством частотно-регулируемого привода позволяет получить более высокую экономию электроэнергии только для насосов с производительностью выше 28 % (для системы 90 кВт) и 24 % (для системы 350 кВт). В действительности, самая высокая экономия энергии при использовании частотного управления наблюдается в диапазоне производительности насоса от 15 до 20 %.

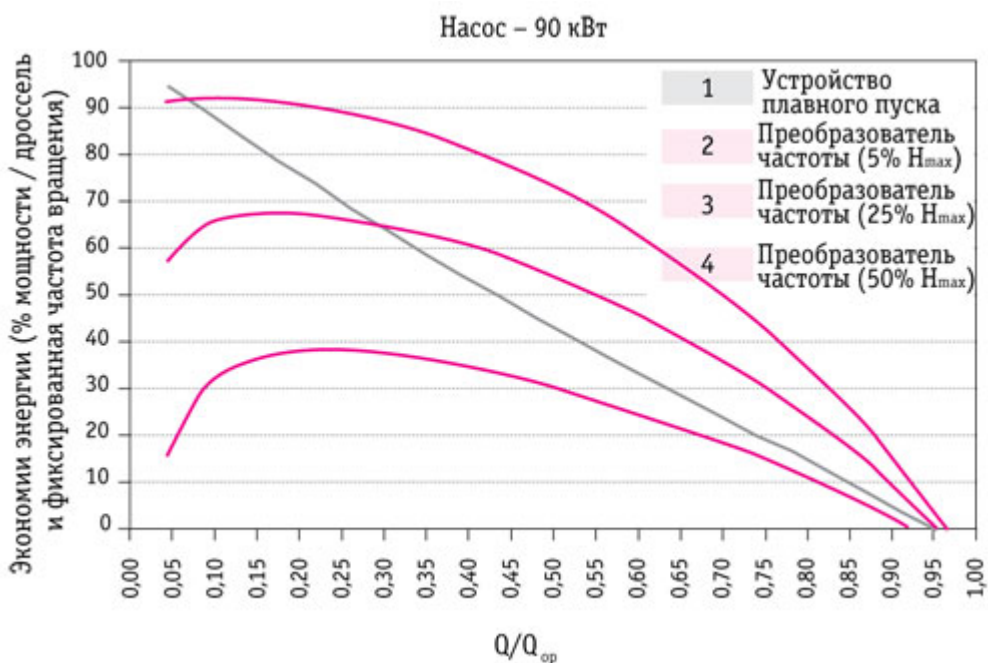


Рис. 8. Экономия энергии [%] при частотном и циклическом управлении для насоса 90 кВт

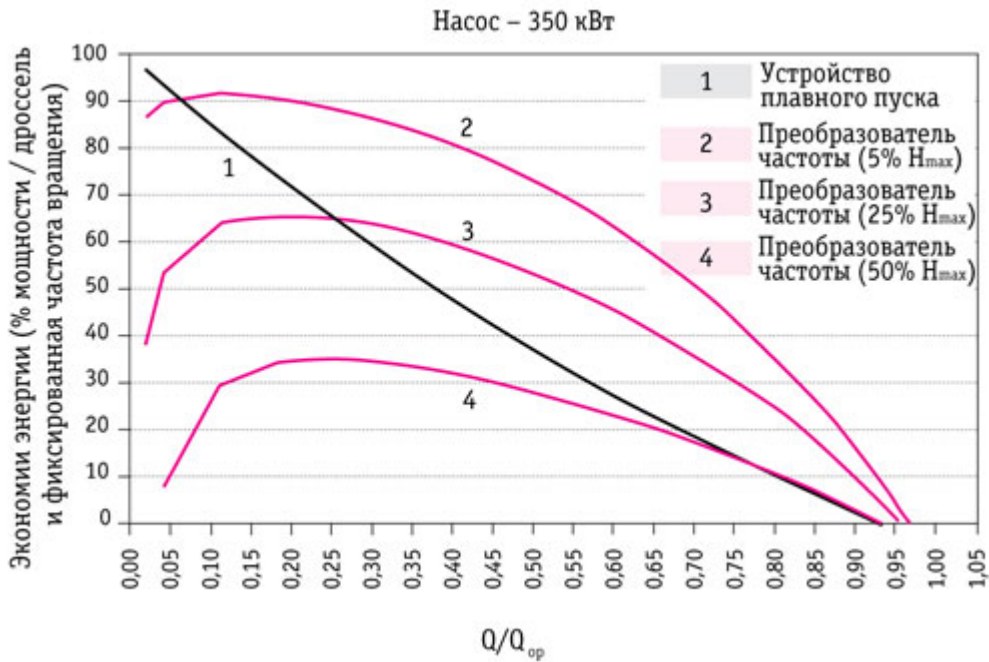


Рис. 9. Экономия энергии [%] при частотном и циклическом управлении для насоса 350 кВт

В отличие от преобразователей частоты, в которых присутствуют потери на полупроводниковых компонентах при номинальном режиме работы, устройства плавного пуска, в этом случае, работают через байпасный контактор, таким образом тиристоры не задействованы (рис. 10). И следовательно, нет дополнительных тепловых потерь. Эксплуатационные и системные характеристики, при которых предпочтителен выбор того или иного способа управления для регулирования производительности насоса, приведены на рис. 11**.

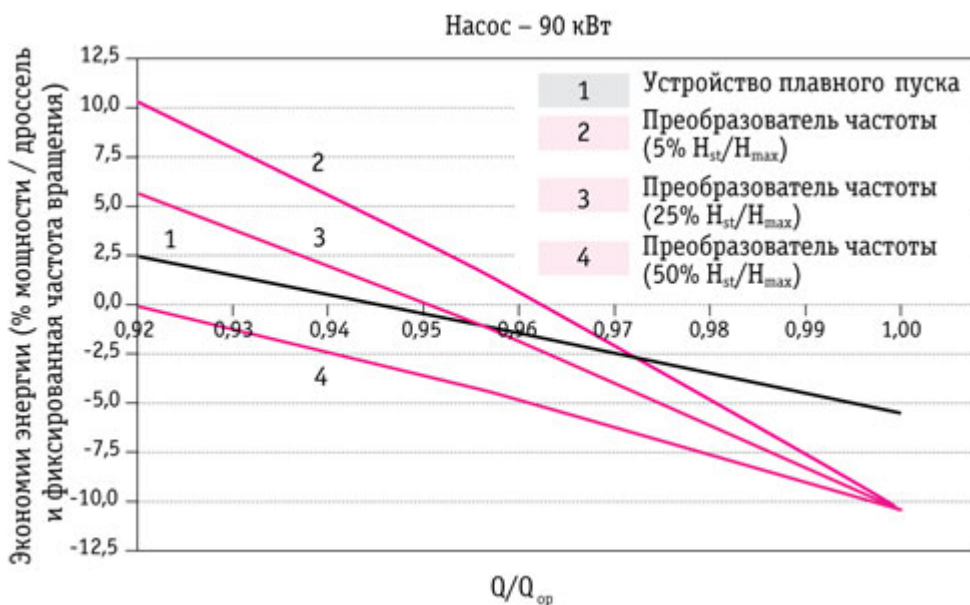


Рис. 10. Оптимальный КПД для насоса 90 кВт при байпасировании через устройство плавного пуска при высоких нагрузках (90–100 % расчетной производительности)

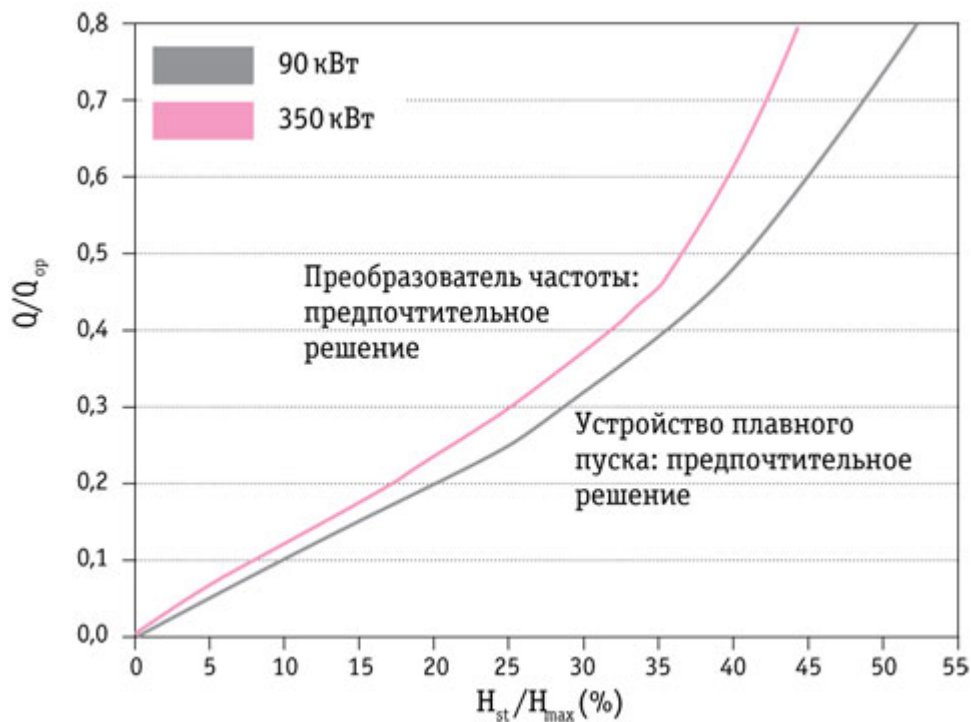


Рис. 11. Контрольная точка, в которой экономия при использовании циклического управления становится выше, чем при использовании решения с частотно-регулируемым приводом

Окупаемость инвестиций

Одним из важнейших факторов для заказчиков является расчет окупаемости инвестиций, в которые входят дополнительные расходы в связи с простоем оборудования во время монтажа и ввода в эксплуатацию устройства плавного пуска.

Стоимость преобразователя частоты в три раза выше стоимости устройства плавного пуска для насосов с номинальной мощностью до 25 кВт, а для насосов 350 кВт – в пять раз [6]. Общие начальные инвестиции при частотном регулировании или циклическом управлении рассчитываются как сумма стоимости частотного преобразователя или устройства плавного пуска и плюс процентная доля расходов, связанных с простоем оборудования, по отношению к расходам, затраченным на протяжении всего жизненного цикла работы технологической линии [7].

Для частотных преобразователей и устройств плавного пуска эта доля составляет 7,5 %.

Стоимость индивидуальных компонентов может различаться по нескольким причинам. Прежде всего, следует отметить, что низковольтные частотные преобразователи чаще применяются при продолжительном режиме включения электродвигателя, а не в режиме пуска/останова, и обеспечивают более точное управление. Однако биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), применяемые в частотных преобразователях, требуют поддержания определенного температурного режима и охлаждения, что делает их достаточно дорогостоящими элементами и соответственно повышает стоимость частотных преобразователей по сравнению с устройствами плавного пуска такой же номинальной мощности. В устройствах плавного пуска полупроводниковые силовые элементы – тиристоры – отработывают только режимы пуска и останова со средним временем каждого режима около 15 секунд. Стоит отметить, что недорогие и надежные тиристоры не требуют постоянного охлаждения.

Период окупаемости для преобразователей частоты и циклического управления расходом показан на рис. 12 и 13 для электродвигателей 90 кВт и 350 кВт для трех гидравлических систем: $\eta = 5\%$, 25% и 50% .

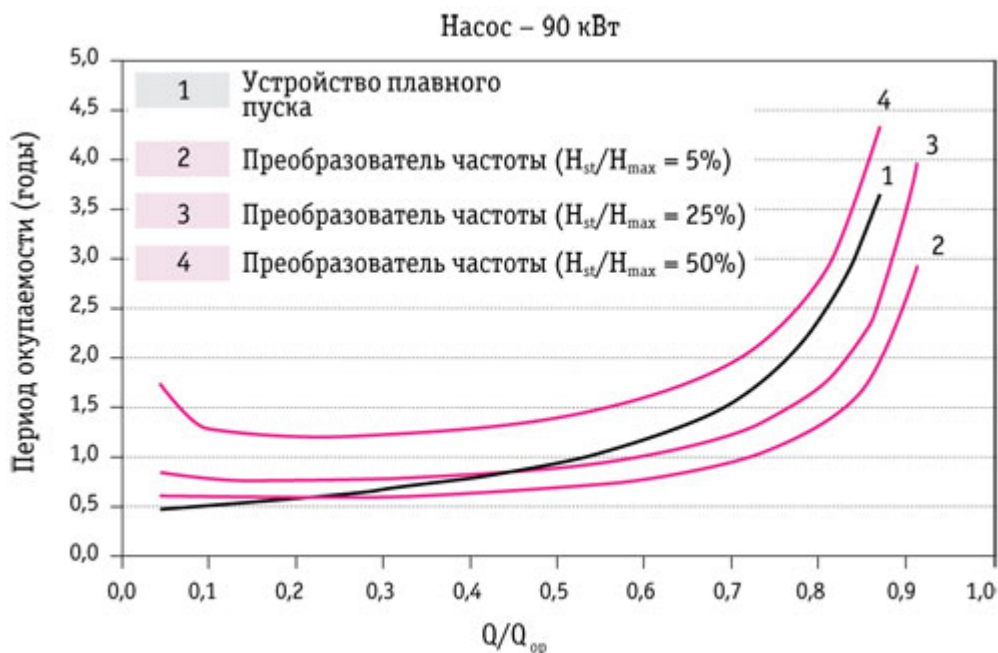


Рис. 12. Период окупаемости решений с частотным и циклическим управлением (устройство плавного пуска) для насоса 90 кВт

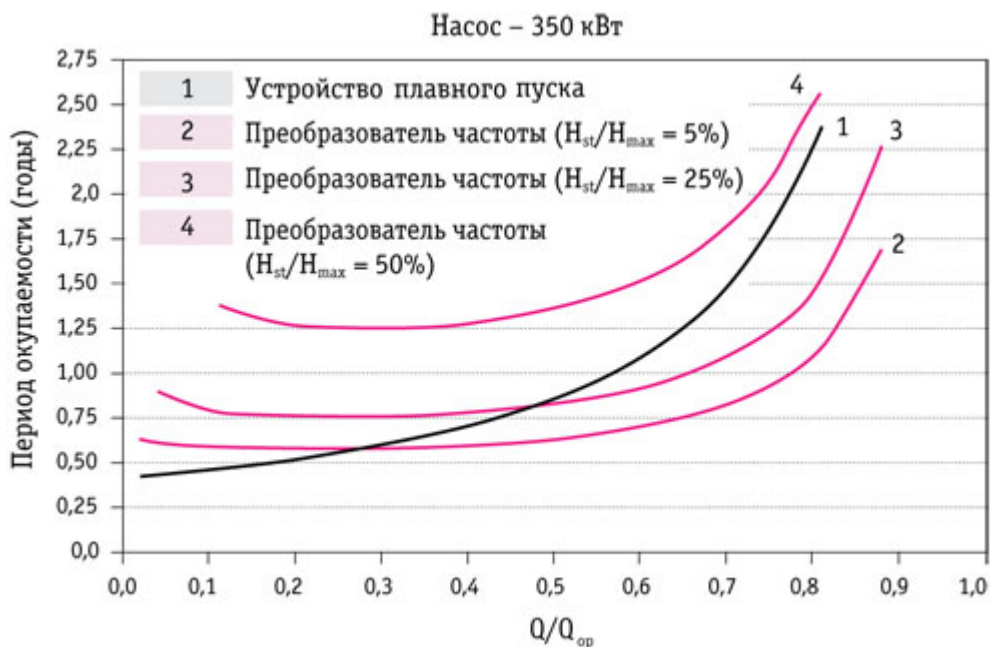


Рис. 13. Период окупаемости для решений с частотным и циклическим управлением (устройство плавного пуска) для насоса 350 кВт

Решения для параллельной схемы управления насосами

Во многих гидравлических системах оптимальную экономию электроэнергии с хорошей окупаемостью капиталовложений можно получить путем применения параллельной схемы управления насосами***, в которой используются как преобразователи частоты, так и устройства плавного пуска.

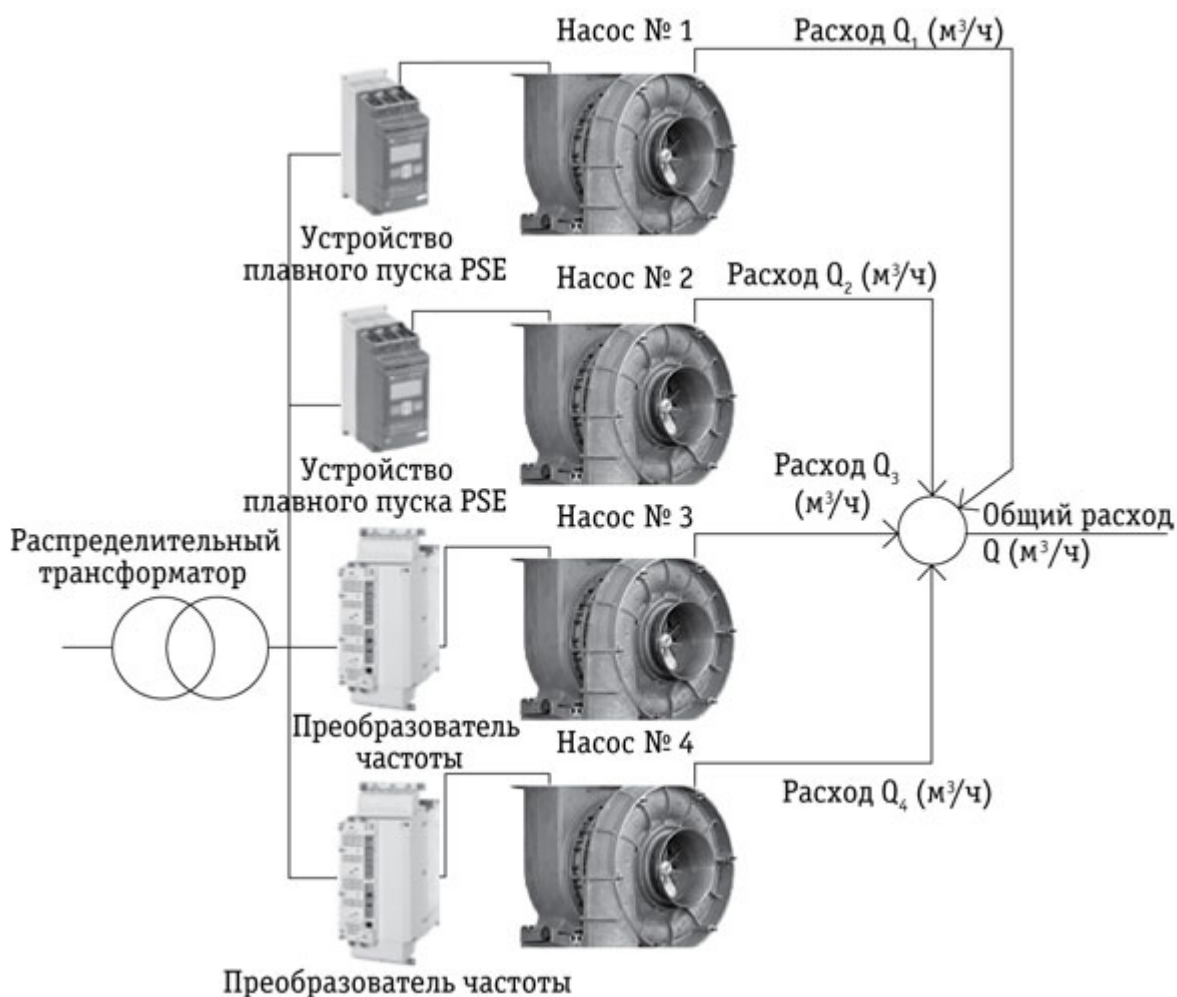


Рис. 14. Решение для системы с четырьмя параллельными насосами (гидравлическая система с преобладанием напора на преодоление трения)

Таблица 3. Схема управления в системе с четырьмя параллельными насосами

	Насос 1	Насос 2	Насос 3	Насос 4
Силовая электроника	Плавный пуск	Плавный пуск	Частотный преобразователь	Частотный преобразователь
Управление расходом	Циклическое	Циклическое	Частотное регулирование	Частотное регулирование
Расход Q (м³/ч)				
0–1,130	Вкл.– Выкл. (0–22,5%)	Вкл.– Выкл. (0–22,5%)	Выкл.	Выкл.
1,130–2,500	Выкл.	Выкл.	Вкл. (22,5–50% Pn)	Вкл. (22,5–50% Pn)
2,500–4,740	Вкл.– Выкл. (27,5–45%)	Вкл.– Выкл. (27,5–45%)	Вкл. (22,5–50% Pn)	Вкл. (22,5–50% Pn)
4,740–5,790	Вкл.– Выкл. (60%)	Вкл.– Выкл. (60%)	Вкл. (35–85% Pn)	Вкл. (35–85% Pn)
5,790–8,000	Вкл.– Выкл. (75%)	Вкл.– Выкл. (75%)	Вкл. (70–85% Pn)	Вкл. (70–85% Pn)
8,000–10,000	Байпас	Байпас	Вкл. (60–100% Pn)	Вкл. (60–100% Pn)
>10,000	Байпас	Байпас	Вкл. (> 100% Pn)	Вкл. (> 100% Pn)

В гидравлических системах с преобладанием напора на преодоление трения ($\gamma = 5\%$) и с четырьмя параллельными насосами – каждый насос с номинальной мощностью 350 кВт (2500 м³/ч) – оптимально использовать два преобразователя частоты и два устройства плавного пуска (рис. 14). В схеме, обеспечивающей наилучшее решение по окупаемости и гибкости управления, два насоса, 1 и 2, управляются устройствами плавного пуска, а насосы 3 и 4 – преобразователями частоты (см. табл. 3). Насосы с устройством плавного пуска работают с максимальной производительностью. Увеличив частоту вращения насосов, управляемых преобразователями частоты, до номинальной можно обеспечить максимальную производительность системы. В смешанной гидравлической системе (гидравлическая система со статическим напором/с преобладанием напора для преодоления трения) ($\gamma = 25\%$), схема, позволяющая получить оптимальное решение с точки зрения окупаемости инвестиций и гибкости управления, представляет собой три насоса, первые два из которых управляются устройствами плавного пуска, а третий насос – преобразователем частоты (см. рис. 15 и табл. 5).

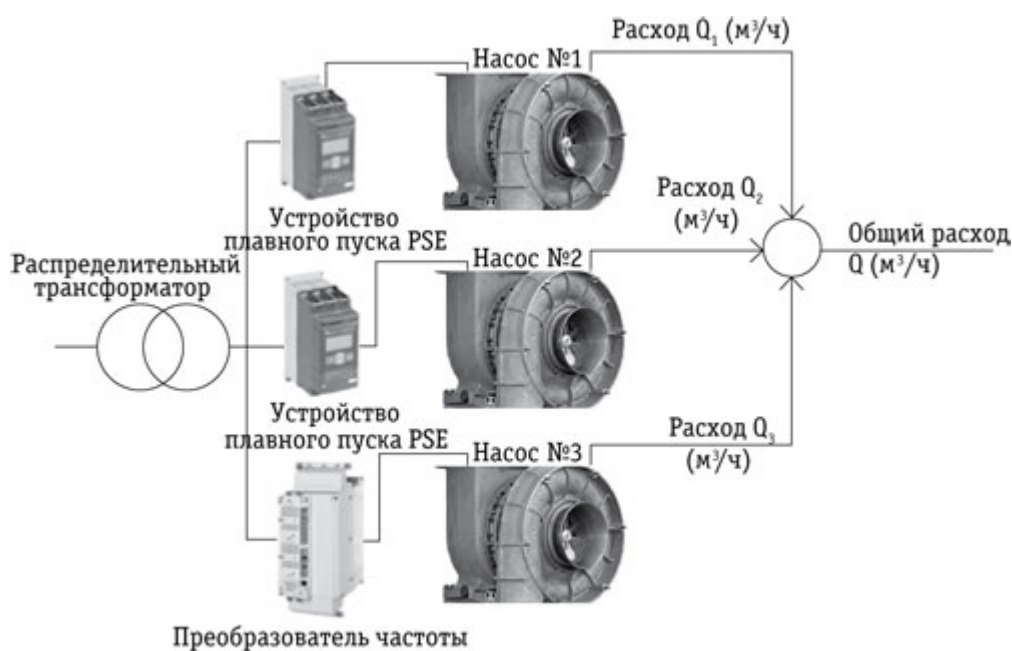


Рис. 15. Решение для системы с тремя параллельными насосами (гидравлическая система со статическим напором/с преобладанием напора на преодоление трения)

Таблица 4. Схема управления расходом в системе с тремя параллельными насосами (комбинированная гидравлическая система)

	Насос 1	Насос 2	Насос 3
Устройство	Плавный пуск	Плавный пуск	Преобразователь частоты
Управление расходом	Циклическое	Циклическое	Частотное регулирование
Расход Q (м³/ч)			
0–2,500	Вкл. – Выкл. (0–50%)	Вкл. – Выкл. (0–50%)	Выкл.
2,500–4,500	Вкл. – Выкл. (30–60%)	Вкл. – Выкл. (30–60%)	Вкл. (40–60% P_n)
4,500–5,760	Вкл. – Выкл. (60–75%)	Вкл. – Выкл. (60–75%)	Вкл. (60–80% P_n)
5,760–6,630	Байпас	Вкл. – Выкл. (75%)	Вкл. (55–90% P_n)
6,630–7,500	Байпас	Байпас	Вкл. (35–100% P_n)
> 7,500	Байпас	Байпас	Вкл. (> 100% P_n)

Для обеих систем начальные инвестиции по закупке устройств плавного пуска и преобразователей частоты трансформируются в экономическую прибыль менее чем за 1,5 года при условии, что регулируемый расход составляет менее 80 % от общей производительности (рис. 16).

Таблица 5. Параметры

$H_{бер}$ [м]	Гидравлический напор в точке оптимального КПД центробежного насоса
$Q_{бер}$ [м ³ /с]	Производительность в точке оптимального КПД насоса
$H_{ит}$ [м]	полная высота всасывания. Определяется как расстояние по вертикали, на которое насос должен поднимать воду. При подаче из скважины это расстояние от уровня откачиваемой воды в скважине до поверхности грунта плюс расстояние по вертикали, на которое осуществляется подъем воды от поверхности грунта до точки выпуска. При откачке с открытой водной поверхности это общее расстояние по вертикали от поверхности воды до точки выпуска
$Q_{ор}$ [м ³ /с]	Производительность в расчетном режиме системы. На практике определяется для периодических пиков расхода (т.е. около 5 % времени на станциях водоподготовки)
$H_{ор}$ [м]	Гидравлический напор в расчетном режиме системы
$H_{ор,ид}$ [м]	Гидравлический напор в расчетном режиме в идеальной системе
H_t [м]	Гидравлический напор, связанный с общей типовой производительностью Q [м ³ /с] в системе регулирования расхода с фиксированной частотой вращения
H_d [м]	Гидравлический напор, связанный с общей типовой производительностью Q [м ³ /с] в системе регулирования расхода с переменной частотой вращения
H_{max} [м]	Максимальная высота подъема жидкости насосом
Q_{max} [м ³ /с]	Максимальная производительность данного насоса

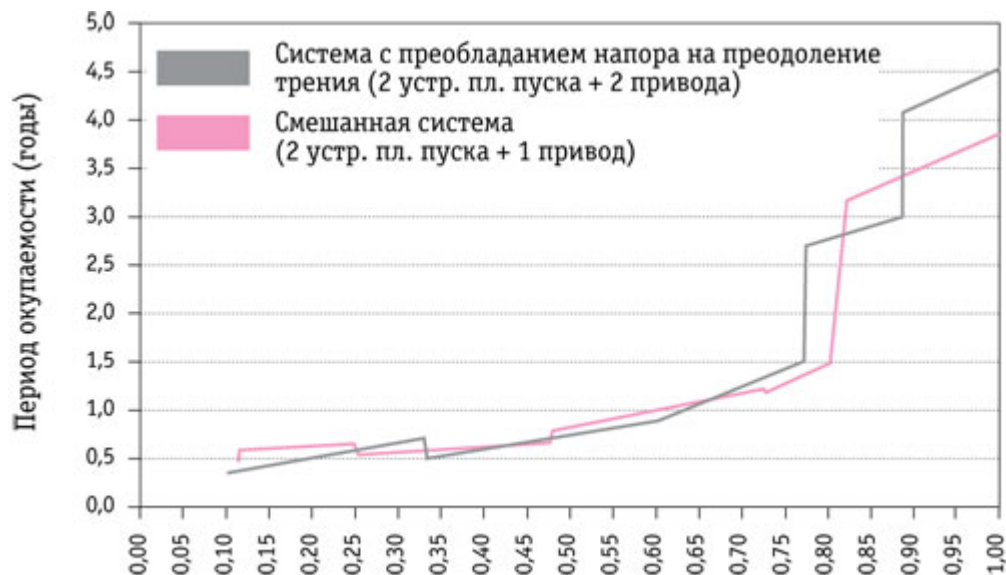


Рис. 16. Расчетный период окупаемости для двух установок, с параллельным управлением насосов от преобразователей частоты и устройств плавного пуска

Лучшее решение?

Анализ эффективности систем частотного и циклического регулирования расхода был проведен для двух центробежных насосов (90 кВт и 350 кВт) с двигателями до 1000 В. Полученные результаты свидетельствуют о том, что управление посредством частотного регулирования является наилучшим решением в гидравлических системах с преобладанием напора на преодоление потерь на трение (транспортировка жидкости без разности высот в случае использования циркуляционных насосов). В системах с преобладанием статического напора рекомендуется использовать циклическое управление. Следует избегать применения преобразователей частоты в системах с пологими характеристиками насоса и нагрузки из-за риска неустойчивости и поломки [9].

Устройства плавного пуска являются наиболее перспективным техническим решением для установок водоочистки и водоотведения, в которых необходимо осуществлять включение/выключение насоса для откачки жидкости из коллекторов и последующее перемещение сточных вод на очистные сооружения. Устройства плавного пуска отличаются высокой надежностью и имеют встроенные функции для устранения гидроударов как при пуске, так и при останове системы. Однако максимального энергосбережения и минимального периода окупаемости для широкого ряда гидравлических систем можно достичь путем применения параллельных схем управлением насосами, в которых используется комбинация преобразователей частоты и устройств плавного пуска. Опираясь на ноу-хау в области автоматизации и широкий ассортимент низковольтного оборудования для автоматизации, компания АББ предлагает и другие решения для эффективного использования энергии в самых различных областях применения.

* Устройства плавного пуска регулируют уровень напряжения, подаваемого на электродвигатель, за счет чего обеспечивается плавный запуск и останов привода.

** При переводе экономии энергии в процентах (в отношении фиксированной скорости и дросселирования) в показатель экономической эффективности предполагается, что насос работает 8760 часов в год (330 x 24) при цене 0,065 долл. США за 1 кВт·ч электричества [5].

*** Для оптимального регулирования расхода в параллельных схемах работает один насос до тех пор, пока не будет достигнута максимальная производительность, после чего гидравлическая нагрузка разделяется на два одновременно работающих насоса [8]. При достижении второй контрольной точки активируются три насоса и т.д.

Литература

1. ITT Industries (2007). ITT's Place in the cycle of water: Everything but the pipes.
2. Aurora Pump (Pentair Pump Group) June 1994, United States.
3. IEC 60034-31:2009. Rotating electrical machines. Part 31: Guide for the selection and application of energy-efficient motors including variable speed applications.
4. Brunner, C. U. (4–5 February 2009). Efficiency classes: Electric motors and systems. Motor energy performance standards event, Sydney (Australia). www.motorsystems.org.
5. Department of Energy (DOE). Energy International Agency (EIA) (June 2009). Average retail price of electricity to ultimate customers.
6. Sagarduy, J. (January 2010). Economic evaluation of reduced voltage starting methods. SECRC/PT-RM10/017.
7. Hydraulic Institute (August 2008). Pumps & Systems, Understanding pump system fundamentals for energy efficiency. Calculating cost of ownership.
8. ITT Flygt (2006). Cirkulationspumpar med vet motor för värmesystem i kommersiella byggnader.
9. Vogelesang, H. (April 2009). Energy efficiency. Two approaches to capacity control. World Pumps Magazine.

Статья опубликована в журнале «ИСУП», № 6(36)_2011