

Применение ЧРП для повышения энергоэффективности насосной установки

6 - 9 сентября 2011, СумГУ, г. Сумы, Украина XIII Международная научно-техническая конференция "ГЕРВИКОН-2011"

Международный форум "НАСОСЫ-2011" Семинар "ЭККОН-11"

Афанасьев А.В., Беккер Л.М., Твердохлеб И.Б.

С точки зрения энергетической эффективности рассмотрены различные способы регулирования скорости вращения насосов и преимущества применения регулирования насосных агрегатов на примере трубопроводного транспорта нефти. Описаны различные аспекты применения преобразователей частоты и их наиболее распространенные типы.

1. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ НАСОСА

Регулирование подачи насоса и обеспечение его работы в требуемой точке возможно как путем изменения характеристики сопротивления трубопровода, так и путем изменения характеристики насоса. Наиболее распространенным методом изменения характеристики сети является дросселирование регулятором давления или задвижкой, установленной на выходе насоса. Этот способ является наиболее простым и не требующим установки какого-либо дополнительного оборудования. Но он – наиболее энергозатратный (см. рисунок 1). Так, например, для обеспечения заданной подачи Q_3 , требуется создать в системе напор, равный H_3 , но насос при этом будет развивать напор H_2 . Следовательно, энергия $N=Q_3(H_2-H_3)$, рассеивается, а общая энергоэффективность насосной установки уменьшается.

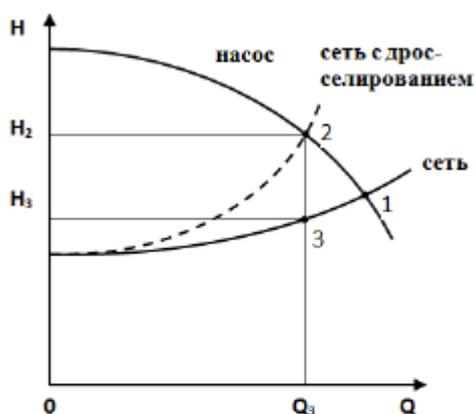


Рисунок 1 – Положение рабочих точек при регулировании дросселированием

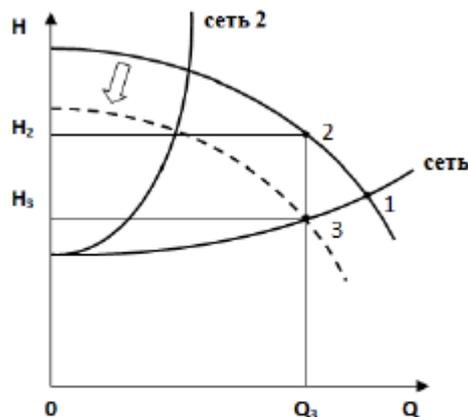


Рисунок 2 – Положение рабочих точек при регулировании изменением частоты вращения рабочего колеса

Регулировать работу системы «насос-сеть» можно также изменяя характеристики насоса: частоту вращения рабочего колеса или геометрию проточной части.

При изменении скорости вращения насоса, характеристика Q-H смещается таким образом (см. рисунок 2), что точка пересечения кривой насоса с характеристикой трубопровода соответствует требуемой в системе подаче Q_3 . При низкой статической составляющей сопротивления сети данный способ регулирования режима работы насоса является наиболее энергетически эффективным и экономичным, при этом регулирование частоты вращения обеспечивает работу насосного агрегата постоянно в зоне максимального КПД.

Помимо энергетической выгоды, использование частотного регулирования позволяет уменьшить гидроудары в системе за счет плавного пуска и останова агрегата, при определенных условиях снизить кавитационный запас насоса.

2. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НАСОСА

Частоту вращения насоса можно изменять следующими способами: либо используя двигатели с переменной частотой вращения, либо при постоянной частоте вращения эл.двигателя с помощью регулируемой гидравлической муфты или других устройств, применяя регулируемый электропривод на базе преобразователя частоты [1].

При использовании гидравлической муфты частота вращения ротора электродвигателя остается постоянной, а регулирование частоты вращения ведомого вала гидромуфты достигается путем изменения объема масла, заполняющего рабочее пространство колес гидромуфты. Равенства частот вращения ведущего и ведомого вала быть не может, их разность характеризуется величиной, называемой скольжением гидромуфты. Поэтому с уменьшением передаточного числа КПД гидромуфты уменьшается (рисунок 3, [2]). Когда муфта полностью заполнена маслом, скольжение – минимально, а КПД передачи наибольший и составляет 93-96%.

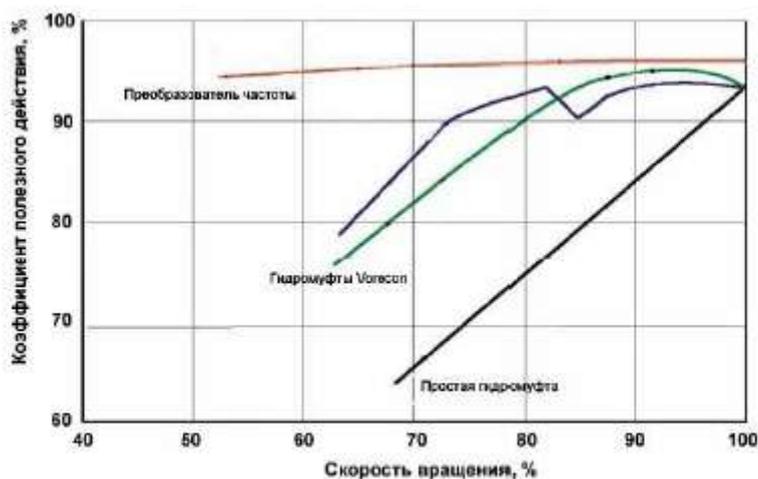


Рисунок 3 – КПД преобразователя частоты, традиционной гидромуфты и гидромуфт Voith (Voith) при различных частотах вращения

Более экономичным способом регулирования частоты вращения в широком диапазоне оборотов является применение полупроводниковых преобразователей. Скорость вращения вала электродвигателя изменяется пропорционально частоте и амплитуде подводимого к статору напряжения.

Несмотря на их высокую стоимость в сравнении с другими способами частотного регулирования, использование приводов насосных агрегатов на базе преобразователей частоты (ПЧ) целесообразно там, где необходимо плавное регулирование в широком диапазоне при постоянно меняющихся уровнях нагрузки. КПД преобразователя частоты мало зависит от частоты вращения вала электродвигателя и для различных от моделей приводов, составляет 94-98% (рисунок 3).

3. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА НА ПРИМЕРЕ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ

Частотное регулирование применяется на объектах трубопроводного транспорта нефти в составе привода магистральных насосных агрегатов (МНА). Помимо описанного ранее увеличения экономичности за счет исключения потерь, связанных с дросселированием и увеличения энергоэффективности насосной системы в целом, оно дает еще ряд важных преимуществ:

1. ЧРП позволяет осуществлять регулирование как минимального, так и максимального рабочего давления на входе магистрального насосного агрегата (МНА), поэтому для раскладки труб при работе на следующую НПС, это дает возможность использовать трубы с меньшей толщиной стенки, рассчитанные на меньшее давление. Таким образом, снижается общая металлоемкость строительства нефтепровода.
2. Регулирование частоты позволяет уменьшить количество сменных роторов насоса, необходимых для изменения его режима работы. Уже имеющиеся в наличии роторы могут использоваться в более широком диапазоне подач, в том числе при частотах вращения выше номинальной.
3. При использовании ЧРП не требуется установка дополнительного устройства плавного пуска двигателя.
4. Наличие ЧРП позволяет отказаться от двух видов защит магистрального насоса:

- предупредительной защиты по коллекторному давлению;
- аварийной защиты по коллекторному давлению.

Это повышает устойчивость работы нефтепровода.

При традиционной системе, с регулятором давления и постоянной частотой вращения насоса, давление в коллекторе НПС (до узла регулирования) должно быть на 1,0 - 1,5 МПа выше рабочего давления в магистральном нефтепроводе. Использование частотного регулирования позволяет иметь давление на выходе агрегата, равным давлению выхода из НПС. Тем самым сокращается количество оборудования НПС, уменьшается число насосных станций.

Предельное давление корпуса магистрального насоса, которое традиционно определяется величиной давления на закрытую задвижку, может быть уменьшено до величины рабочего давления, поскольку с применением резервирования всегда можно его снизить при малых подачах. При этом значительно снижается металлоемкость насосов и другого оборудования НПС.

5. ЧРП можно использовать для перераспределения потоков нефти, когда необходимо сбрасывать часть нефти на другие направления, при этом сброс может быть как постоянным, так и переменным. Традиционно, для этой задачи используются емкости объемом 0,3 – 0,5 суточной подачи с подпорными насосами, а регулирование расхода по различным направлениям осуществляется либо дросселированием, либо ступенчатым регулированием путем включения/выключения необходимого числа насосов. Применение частотного регулирования – более экономично и позволяет отказаться от емкости, либо использовать емкости значительно меньшего объема.

6. Очевидны преимущества применения ЧРП для поддержания режимов перекачки, связанных с резким изменением реологических свойств перекачиваемой среды (плотности, вязкости). Например, если один из участков нефтепровода начал перекачивать нефть с большей плотностью или вязкостью, и для этого требуется увеличить давление – это легко сделать изменяя частоту вращения насосного агрегата. Особенно удобно это может оказаться на магистральных продуктопроводах, где перекачиваются последовательно бензин и дизельное топливо.

В настоящее время, при строительстве новых нефтепроводов планируется использование частотного регулирования также и на подпорных насосных агрегатах, в этом случае удастся получить следующие преимущества:

1. Регулирование подачи разных сортов нефти при их смешивании с целью получения заданной плотности или вязкости.
2. Возможность работы без МНА в режиме регулирования для начальных этапов развития нефтепровода.
3. Возможность работы МНА в условиях малых требуемых давлений на выходе НПС, с учетом необходимости перераспределения напора между подпорным и магистральным агрегатами.
4. Возможность использования этих же насосов для внутривартовой перекачки нефти.

Таким образом, использование ЧРП значительно расширяет возможности магистральных и подпорных насосных агрегатов, позволяет на их основе реализовывать новые, более удобные технологические схемы. А подключение ЧРП и управление им через систему верхнего уровня, позволяет повысить уровень автоматизации НПС в целом.

4. ВОЗМОЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Выше были отмечены преимущества использования ПЧ по сравнению с другими способами частотного регулирования. Однако при установке ПЧ необходимо учитывать следующие важные аспекты его работы [3]:

1. Высокая скорость коммутации при формировании выходного ШИМ- сигнала и, как результат, высокая скорость нарастания фронта импульса создает электромагнитные помехи, которые при неправильном выборе типов кабелей и неверной организации заземления могут привести к сбоям в работе соседнего электронного оборудования. Данную проблему решают применяя экранированные выходные кабели, а также фильтры, ограничивающие скорость нарастания напряжения (фильтры dU/dt), или синусоидальные фильтры на выходе преобразователя частоты.

Также, из-за высокой скорости изменения напряжения, может происходить ускоренный износ изоляции обмоток двигателя. В первую очередь это относится к устаревшим модификациям двигателей с обмотками, не рассчитанными на работу с преобразователями частоты. Эту проблему также можно устранить с помощью синусоидального фильтра.

2. Влияние собственной емкости соединительного кабеля на ШИМ-сигнал, при большой его длине, приводит к появлению пиковых перенапряжений на клеммах электродвигателя. Величина перенапряжения зависит от длины кабеля, так как собственная емкость кабеля повышается с увеличением его длины.

3. Под влиянием синфазных помех и гармоник в сигнале ПЧ, на валах мощных электродвигателей могут индуцироваться напряжения, которые приводят к появлению циркулирующих подшипниковых токов. Несмотря на

относительно малые величины этих напряжений, при значениях свыше 500 мВ, они могут вызвать преждевременное повреждение и последующее разрушение подшипников двигателя и приводного механизма.

4. Выпрямитель, входящий в состав преобразователя частоты, является источником гармонических искажений (гармоник) в питающей сети, которые негативно влияют на работу других потребителей этой сети.

5. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРИВОД

На практике распространены следующие схемы сопряжения преобразователей частоты с высоковольтными двигателями [4]:

- использование высоковольтного преобразователя частоты, подключенного непосредственно к высоковольтному двигателю, при этом в зависимости от типа выпрямителя в ПЧ, может потребоваться установка дополнительного согласующего трансформатора.
- двухтрансформаторная схема с низковольтным преобразователем частоты и двумя трансформаторами – понижающим на входе преобразователя частоты и повышающим на его выходе.

Двухтрансформаторная схема (рисунок 4) позволяет использовать для регулирования частоты низковольтный преобразователь частоты, отличающийся относительной дешевизной и простотой практической реализации. Вследствие этого они наиболее часто применяются для управления высоковольтными электродвигателями в диапазоне мощностей до 1 – 1,5 МВт. При большей мощности электропривода повышающий трансформатор вносит существенные искажения в процесс управления электродвигателем. Обязательной является установка синусоидального фильтра на выходе ПЧ.



Рисунок 4 - Двухтрансформаторная схема использования низковольтного преобразователя частоты

Основными недостатками двухтрансформаторных схем являются высокие массогабаритные характеристики и меньшие по отношению к другим схемам КПД (92 – 96%) из-за дополнительных потерь на трансформаторах и соединительных кабелях. Преобразователи, выполненные по этой схеме, имеют ограниченный диапазон регулирования частоты вращения двигателя.

6. ТИПЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

С точки зрения схемотехники современных высоковольтных преобразователей частоты для асинхронных двигателей можно выделить следующие принципиальные решения [4,5]:

- инвертор тока с мостовой схемой на SCR-тиристорах;
- инвертор тока на полностью управляемых симметричных тиристорах (GTO, SGCT);
- трехуровневый инвертор напряжения с коммутацией в «звезду» с фиксированной нулевой точкой или фиксированной нейтралью (Neutral-Point Clamped - NPC);
- четырех- и пятиуровневые инверторы напряжения;
- многоуровневые инверторы напряжения.

Примерами инвертора тока на симметричных GTO, SGCT – тиристорах являются ПЧ PowerFlex 7000, предлагаемые компанией Allen-Bradley (Rockwell Automation). Они широко применяются для асинхронных двигателей напряжением 6 кВ. В них применяются различные схемы управляемых выпрямителей, в том числе 18-импульсный. Конденсаторный фильтр на выходе инвертора, поглощая высокочастотные гармоники, позволяет получить форму тока и напряжения, близкую к синусоидальной.

Такая форма сигнала позволяет использовать данные преобразователи частоты с асинхронными или синхронными двигателями стандартного исполнения без их переразмеривания.

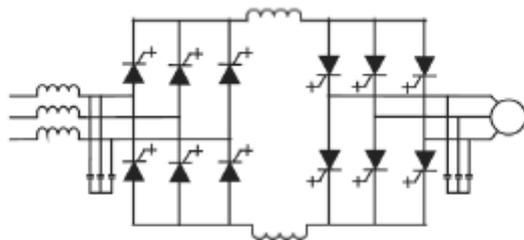


Рисунок 5 - Схема преобразователя частоты PowerFlex 7000 с активным выпрямителем и конденсаторным фильтром

Особенностью трехуровневого инвертора напряжения является формирование двуполярного выходного напряжения в виде прямоугольной «решетки» импульсов высокой крутизны, определяемой частотой переключения полупроводниковых приборов (IGBT-транзисторов или IGCT- тиристоров). Поэтому все автономные инверторы напряжения с фиксированной нулевой точкой (NPC) на выходе обязательно имеют синусоидальный фильтр. Это позволяет избежать повреждения изоляции статора асинхронного двигателя импульсами напряжения высокой частоты.

К преобразователям частоты данного типа относятся ПЧ ACS1000 (производитель ABB) на базе IGCT-тиристоров, ПЧ серий SimovertMV, Sinamics GM150 (предлагаются IGCT и IGBT-варианты) и SM150 (IGCT) фирмы Siemens, серия MV7000 от ConVerTeam. При современной элементной базе выходное напряжение трехуровневой схемы ограничено по выходному напряжению до 4160 В. Для согласования выходного напряжения ПЧ с напряжением двигателя 6 кВ и устранения гармонических искажений в выходном сигнале, на выходе ПЧ устанавливают синусоидальный фильтр, состоящий из конденсаторной батареи и согласующего трансформатора (или автотрансформатора).

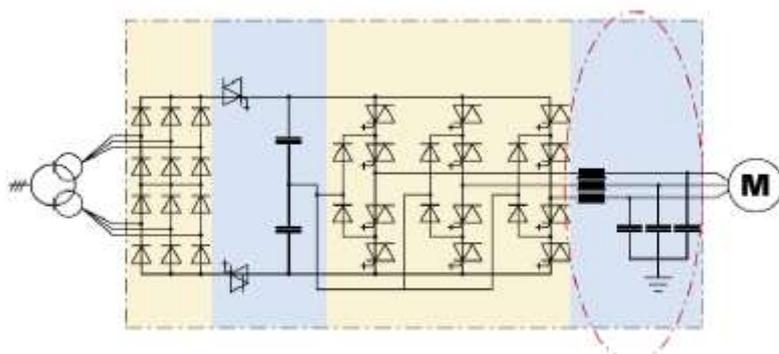


Рисунок 6 - Привод ACS1000 с 12-пульсным выпрямителем, трехуровневым инвертором напряжения и фильтром

Четырехуровневые инверторы напряжения были разработаны фирмами Alstom (с 2006 г. – ConVerTeam) и GE. Пятиуровневая мостовая схема использована фирмой ABB в серии преобразователей частоты ACS5000 (на напряжение 6,0 - 6,9 кВ). Выходное напряжение таких преобразователей за счет большого количества ступенек имеет форму близкую к синусоиде. Как правило, установка фильтра на выходе такого ПЧ необязательна, хотя фирмы рекомендуют в ряде случаев устанавливать облегченный синусоидальный фильтр.

Инверторы с многоуровневой топологией (Multi-level) стали следующим шагом в развитии высоковольтных преобразователей и позволили увеличить их мощности при одновременном снижении потерь. Такая топология используется в преобразователях частоты ROBICON Perfect Harmony (SIEMENS).

В данной конструкции привода (см. рисунок 7) удачно решены вопросы электромагнитной совместимости с питающей сетью и электродвигателем. Благодаря практически синусоидальной форме выходного напряжения их можно использовать для регулирования частоты стандартных общепромышленных асинхронных двигателей без переразмеривания и без установки специальных фильтров. В отличие от преобразователей других типов, схемное решение привода Perfect Harmony включает всего два компонента: согласующий трансформатор и собственно преобразователь. Применение многообмоточных трансформаторов на входе ПЧ, обеспечивающих не менее чем 18-пульсное выпрямление, позволяет практически не исказить напряжение в сети (искажения напряжения менее 3%, искажения тока – менее 5%).

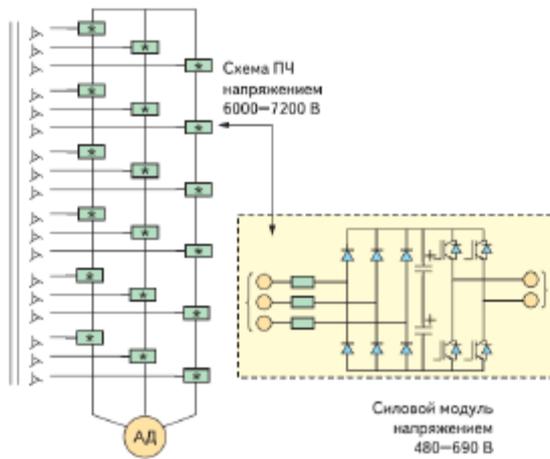


Рисунок 7 – Схема ПЧ с многоуровневой топологией

7. ВЫВОДЫ

Регулирование насосного оборудования с помощью изменения частоты вращения позволяет не только экономить энергию, но и оптимизировать технологические процессы перекачивания различных жидкостей.

При принятии решения о применении частотного регулирования для конкретного насосного агрегата, необходимо произвести оценку стоимости жизненного цикла для различных типов приводов, проанализировать все положительные и отрицательные стороны использования преобразователя частоты данного типа.