

## ЛИТЕРАТУРА

1. К о р о л е в Е. П., Л и б е р з о н Э. М. Расчет допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
2. Р о м а н ю к Ф. А., Н о в а ш В. И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.
3. С о п ь я н и к В. Х. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты. – Мн.: БГУ, 2000. – 143 с.
4. В а в и н В. Н., Г о л у б е в М. Л. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты. – М.: Энергия, 1977. – 88 с.
5. Э л е к т р и ч е с к и е цепи с ферромагнитными элементами в релейной защите / А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин, С. Л. Кужеков и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

Поступила 20.03.2001

УДК 621.313.39

### **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КАК СРЕДСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАГНЕТАТЕЛЕЙ**

**Докт. техн. наук, проф. РУСАН В. И.**

*РУП «БелНИИагроэнерго»*

**Асп. КЛЕБАНОВ Е. А.**

*Белорусский аграрный технический университет*

Одним из направлений в области энергосбережения является внедрение преобразователей частоты (ПЧ) для регулирования скорости вращения электродвигателей нагнетателей (насосов, вентиляторов, компрессоров). В связи со стремительным развитием электроники, и микропроцессорной техники в частности, данное направление получило в последнее время особое развитие. О достоинствах применения регулируемого электропривода в системах водоснабжения и вентиляции написано много работ, аргументирующих целесообразность данного подхода к регулированию производительности нагнетателей. Однако мы остановимся на экономическом аспекте вопроса и попытаемся выявить критерии экономической целесообразности внедрения ПЧ, опустив при этом несомненные технологические преимущества данного подхода.

Оценка экономической эффективности сводится, в сущности, к исследованию энергетических режимов работы нагнетателя, для определения которых необходимо в комплексе изучить изменение энергетических характеристик самого нагнетателя и параметров сети, на которую он работает. Известно, что водопроводные сети представляют собой сложные объекты с постоянно изменяющимися во времени параметрами. Данное обстоятельство неразрывно связано с изменением КПД нагнетателя, работающего

на такую сеть. Теоретически и практически в процессе работы возникают такие периоды, при которых КПД нагнетателей значительно снижается в силу неэффективного алгоритма управления. Кроме того, необходимо обязательно учитывать изменение КПД самого нагнетателя в процессе регулирования скорости вращения его рабочего органа. Это особенно относится к граничным режимам его работы (режимы минимального и максимального расхода), так как сегодняшнее экономическое положение предприятий зачастую не позволяет им выходить на проектные мощности. Это приводит к изменению режимов работы (загрузки) технологического оборудования, обуславливающему выход нагнетателей как части технологического оборудования за пределы рабочей зоны.

Фактически при неэффективном алгоритме управления нагнетатели могут оказываться в режимах, при которых их КПД составляет 10–15 %, а в особо неблагоприятных режимах снижается до нуля. Во избежание возникновения подобных неблагоприятных режимов необходимо еще на стадии проектирования проводить анализ энергетических режимов работы нагнетателя, регулируемого с помощью ПЧ, а также выявлять возможность возникновения таких технологически недопустимых режимов, как кавитационный и помпажный.

Для выполнения исследований создана программа моделирования работы нагнетателей при регулировании их производительности с помощью ПЧ и запорной арматуры. В основу программы положены аналитические уравнения, описывающие рабочие характеристики нагнетателей и сети. Исходными данными для нее является напорно-расходная характеристика нагнетателя и сети. Рабочая характеристика нагнетателя вводится по точкам из паспортных данных нагнетателя или по реально измеренным на объекте (что особенно важно для старых насосов, а также насосов, подверженных обточке рабочего колеса). На основании введенных данных определяются аналитические характеристики нагнетателя и сети, используемые в дальнейших расчетах. Характеристика нагнетателя интерполируется полиномом второй степени, при этом используется сплайн или линейная интерполяция (рис. 1).

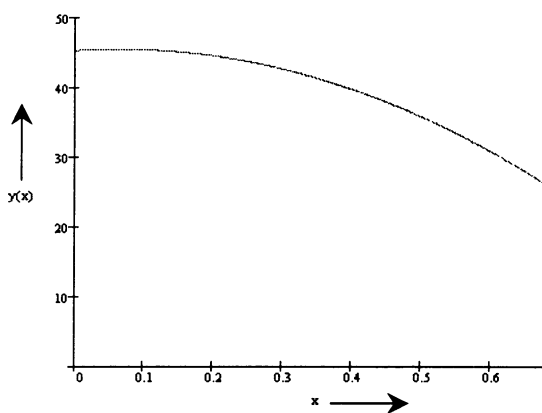


Рис. 1

Далее выполняется расчет максимального отклонения найденной эквивалентной аналитической модели от введенной, что позволяет пользователю контролировать процесс расчета и вводить при необходимости требуе-

мые коррективы. Затем выполняются расчеты энергетических режимов работы нагнетателя при регулировании его производительности с помощью запорной арматуры и преобразователя частоты. Результаты расчетов представляются в табличном виде, а также в виде графиков, наглядно иллюстрирующих характер изменения КПД нагнетателя в зависимости от требуемого расхода.

На рис. 2 показан один из наиболее характерных случаев, когда в процессе регулирования в зависимости от текущего расхода возникают области, в которых максимальный КПД достигается при регулировании производительности запорной арматурой. Данный пример наглядно иллюстрирует тот факт, что при определенных режимах работы преобразователь частоты является экономически менее благоприятным инструментом регулирования производительности нагнетателя, чем запорная арматура.

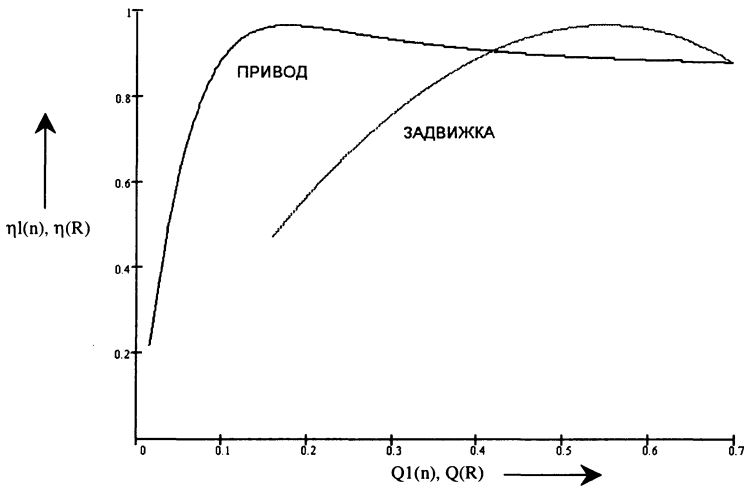


Рис. 2

Второй характерный пример (рис. 3) наглядно иллюстрирует близкий и практически одинаковый характер изменения энергетических режимов нагнетателя при двух указанных выше способах регулирования.

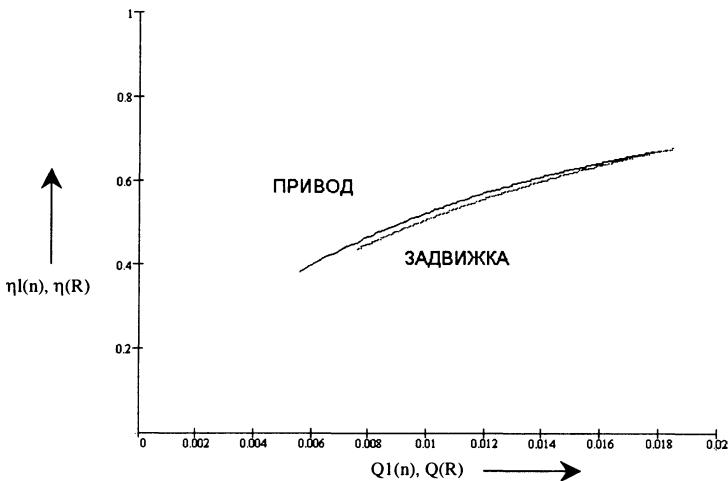


Рис. 3

Несмотря на то, что два указанных выше примера являются характерными отрицательными примерами использования ПЧ, безусловно, существуют режимы (и таких режимов большинство), при которых ПЧ дает значительную экономию электроэнергии по отношению к задвижке (рис. 4).

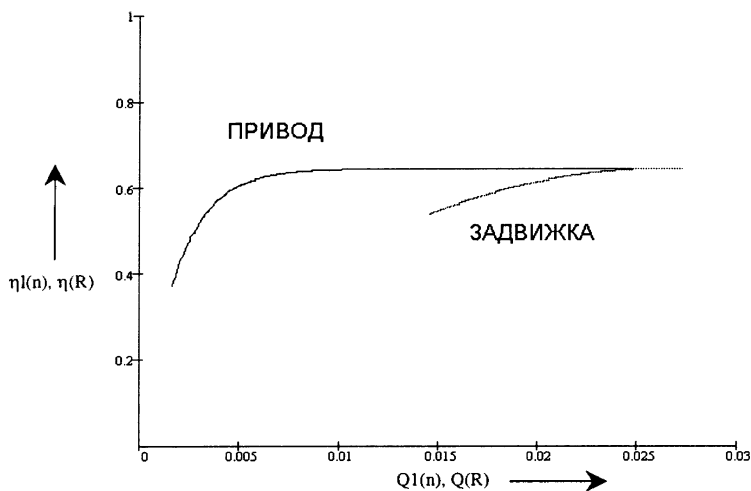


Рис. 4

Для принятия решения об установке преобразователя частоты для регулирования производительности нагнетателя с целью энергосбережения необходимо проанализировать все возможные режимы работы и выявить экономическую целесообразность ПЧ.

Надо также помнить, что гидравлические сети являются динамичными объектами с постоянно изменяющимися параметрами.

Для определения величины экономии электроэнергии необходимо знать характеристики сети и нагнетателя. Но если рабочая характеристика насоса неизменна, то характеристика сети будет влиять на величину экономии следующим образом. Известно, что характеристика сети в общем виде описывается уравнением

$$H = H_{ct} + RQ^2,$$

где  $H_{ct}$  – статический напор в сети;

$R$  – коэффициент сопротивления сети;

$Q$  – расход перекачиваемой жидкости.

При этом значения  $H_{ct}$  и  $R$  переменны не только для различных объектов, но и постоянно изменяются во времени в процессе работы одного и того же нагнетателя. Статистика, полученная в результате моделирования, показывает, что если величина  $H_{ct}$  незначительна по отношению к номинальному напору нагнетателя, то величина экономии электроэнергии при использовании преобразователя частоты будет значительной, но если  $H_{ct}$  близка по своему значению к величине номинального напора нагнетателя, то использование преобразователя частоты, как правило, нецелесообразно. Именно  $H_{ct}$  оказывает существенное влияние на величину экономии. Что касается практического использования данного вывода, то, как правило, малое значение  $H_{ct}$  характерно для большинства вентиляционных систем. В системах водоснабжения насосные станции первого подъема, к примеру,

имеют высокое значение  $H_{ct}$ , что не позволит получить значительной экономии от использования ПЧ.

В подтверждение данных теоретических выводов на одной из насосных станций третьего подъема (Зеленый луг) проведены следующие испытания. В составе насосной станции работали два насоса номинальной мощностью по 45 кВт. На них были установлены датчики давления на выходном водоводе, счетчики мощности, расхода воды и датчики тока. Один из насосов функционировал от преобразователя частоты в режиме обратной связи по давлению, второй – напрямую от сети. В результате испытаний выяснилось, что если производительность обоих насосных агрегатов близка между собой, т. е. насосы создают одинаковое давление, то КПД обоих насосов близок к номинальному. При уменьшении производительности регулируемого насоса более чем на 35 % наблюдается резкое снижение его КПД. В общем случае допустимый диапазон регулирования расхода, при котором КПД находится в области приемлемых значений, зависит от характеристик нагнетателей и сети. Поэтому в каждом отдельном случае необходимо на этапе моделирования определять допустимый диапазон изменения скорости нагнетателя регулируемой производительности, что фактически и будет определять эффективность использования преобразователя частоты с точки зрения энергосбережения.

Изложенное выше связано с моделированием энергетических режимов нагнетателей и анализом экономического эффекта от использования того или иного инструмента регулирования производительности. Однако зачастую необходимо обеспечить оптимальное с точки зрения энергопотребления управление объектом.

Фактически максимально оптимизировать энергопотребление нагнетателя можно с помощью двух инструментов регулирования: запорной арматуры и преобразователя частоты. Возможны режимы (рис. 2), при которых оптимальное энергопотребление может обеспечиваться только совместным регулированием сопротивления сети (запорной арматурой) и скорости вращения с помощью ПЧ. Для этого в программе реализованы два алгоритма оптимизации управления, позволяющие рассчитать оптимальное положение задвижки и оптимальную скорость вращения рабочего органа нагнетателя с точки зрения минимального энергопотребления. Исходными данными для оптимизации является диапазон или конкретное значение расхода, для которого необходимо определить оптимальное значение сопротивления сети (положение задвижки) и скорость вращения двигателя, обеспечивающие минимальное энергопотребление.

Минимум энергопотребления можно наблюдать на рис. 5, на котором представлены зависимости КПД нагнетателя от текущего положения задвижки и скорости вращения электродвигателя.

Рассчитанные значения скорости вращения электродвигателя нагнетателя и положение задвижки могут быть преобразованы в управляющие воздействия, выдаваемые, например, с программируемого контроллера. Если же управление задвижкой реализовать невозможно, то данная система может отображать текущий КПД регулируемого насосного агрегата, что позволит оператору анализировать энергетические режимы и на их основании осуществлять управление. Описанный способ расчета энергетических режимов нагнетателей полностью аналитический, что в отличие от графоаналитического метода позволяет исследовать и управлять динами-

ческими системами, такими, например, как системы водоснабжения, в автоматическом режиме или с минимальным участием человека. Это стало возможно благодаря развитию микропроцессорной вычислительной техники, способной на сегодняшний день реализовать необходимые для данной системы алгоритмы.

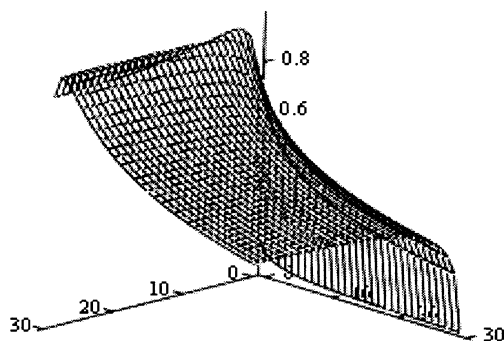


Рис. 5

Расчет энергетических режимов, выполняемый в программе, ведется с учетом энергии, которую необходимо передать нагнетателю для обеспечения требуемого режима, и не учитывается общее потребление электроэнергии с потерями в электродвигателе нагнетателя. Доработка программы в этом направлении позволит анализировать потребление активной и реактивной энергии из сети, что также является необходимым. Кроме этого, планируется ввести в программу отдельный алгоритм, позволяющий выполнить анализ кавитационных и помпажных режимов нагнетателей при регулировании и предотвратить их появление в процессе работы нагнетателей.

В настоящее время ведется работа по реализации на базе программируемого логического контроллера описанной выше системы управления и контроля применительно к насосной станции, состоящей из трех насосов. Это обеспечит оптимальное, с точки зрения энергопотребления, управление. При этом вся информация о текущих режимах работы каждого насоса станции передается в цифровом виде на ПЭВМ с целью последующей визуализации в виде графиков и анализа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский Н. Ф. Энергосбережение в центробежных машинах средствами электропривода // Вестник МЭИ. – 1995. – № 1.
2. Прегер Е. А. Аналитический метод исследования совместной работы насосов и трубопроводов канализационных насосных станций. – Л.: ЛИСИ, 1974.
3. Камалов Т. С. Регулируемый электропривод оросительных насосных станций / АН УзССР, Институт энергетики и автоматики. – Ташкент, 1987.