

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Л.В. Куликова, А.Л. Андронов

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Возможность управления частотой вращения короткозамкнутых асинхронных электродвигателей была доказана сразу же после их изобретения. Реализовать эту возможность удалось лишь с появлением силовых полупроводниковых приборов - сначала тиристоров, а позднее транзисторов *IGBT* (биполярный транзистор с изолированным затвором). В настоящее время во всем мире широко реализуется способ управления асинхронной машиной, которая сегодня рассматривается не только с точки зрения экономии энергии, но и с точки зрения совершенствования управления технологическим процессом.

В промышленности и быту применяют двигатели переменного и постоянного тока. Исторически сложилось, что для регулирования скорости вращения чаще использовали двигатель постоянного тока. Преобразователь в данном случае регулировал только напряжение, был прост и дешев. Однако двигатели постоянного тока имеют сложную конструкцию, критичный в эксплуатации щеточный аппарат и сравнительно дороги.

Асинхронные двигатели широко распространены, надежны, имеют относительно невысокую стоимость, хорошие эксплуатационные качества, но регуляторы скорости их

вращения из-за сложности систем электронного регулирования частоты питающего напряжения стоили до начала 80-х годов дорого и не обладали качествами, необходимыми для широкого внедрения в индустрию. Быстрый рост рынка преобразователей частоты для асинхронных двигателей не в последнюю очередь стал возможен в связи с появлением новой элементной базы - силовых модулей на базе *IGBT*, рассчитанных на токи до нескольких *kA*, напряжением до нескольких *kV* и имеющих частоту коммутации 30 *kГц* и выше.

Существует два основных типа преобразователей частоты: с непосредственной связью и с промежуточным контуром постоянного тока. В первом случае выходное напряжение синусоидальной формы формируется из участков синусоид преобразуемого входного напряжения. При этом максимальное значение выходной частоты принципиально не может быть равным частоте питающей сети. Частота на выходе преобразователя этого типа обычно лежит в диапазоне от 0 до 25-33 *Гц*. Но наибольшее распространение получили преобразователи частоты с промежуточным контуром постоянного тока, выполненные на базе инверторов напряжения. Структурная схема такого преобразователя приведена на рис. 1.

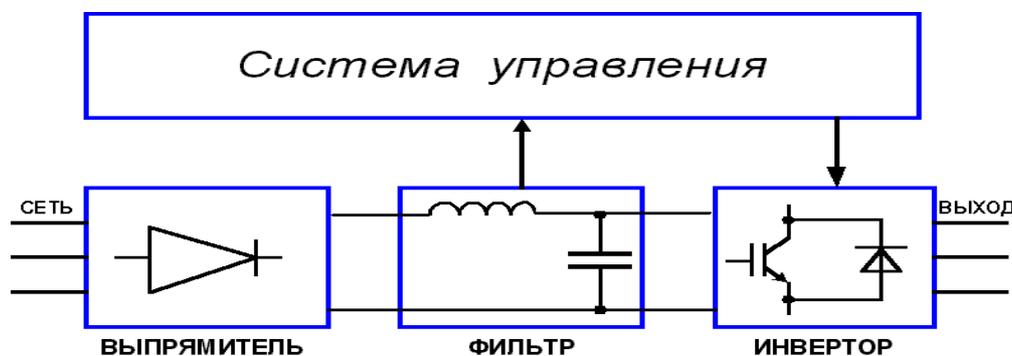


Рисунок 1 – Структурная схема преобразователя частоты с промежуточным контуром постоянного тока

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

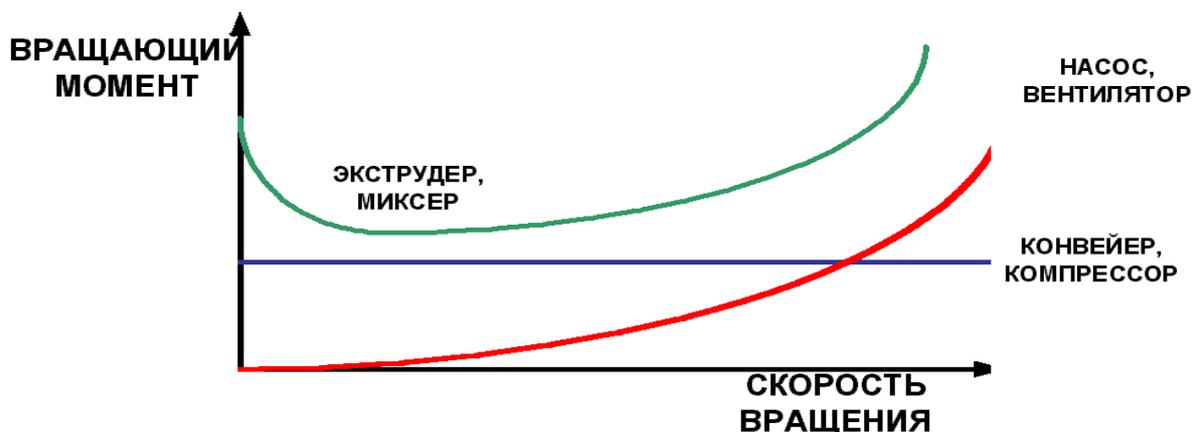


Рисунок 2 – Механические характеристики типичных нагрузок

2. ТИПЫ НАГРУЗОК

Требования к электроприводу определяются диапазоном требуемых скоростей и типом нагрузки. Зависимость между скоростью вращения и моментом сопротивления неодинаковы для нагрузок разного типа (рис. 2). Многие нагрузки могут рассматриваться как имеющие постоянный момент во всем диапазоне изменения скорости. К ним относятся, например, конвейеры, компрессоры, поршневые насосы и т.п.

Некоторые виды нагрузки имеют переменную механическую характеристику, для которой момент нагрузки возрастает с увеличением скорости вращения. Типичным примером устройств с такой нагрузкой являются центробежные насосы и вентиляторы, чья механическая характеристика описывается уравнением квадратичной параболы, а значит, потребляемая мощность пропорциональна кубу скорости вращения. Из этого следует, что даже небольшое снижение скорости электропривода может дать значительный выигрыш в мощности - вот почему экономия электроэнергии является главным преимуществом использования управляемого электропривода для насосов и вентиляторов. Теоретически снижение скорости на 10% дает тридцати процентную экономию мощности.

Есть класс устройств (экструдеры, промышленные миксеры), у которых механическая характеристика близка к характеристике насосов и вентиляторов. Но особенность нагрузок такого типа состоит в наличии высокого пускового момента, который с увеличением скорости снижается, а затем, начиная с некоторого значения, характеристика становится квадратичной.

Кроме того, существует и большое число нагрузок с совершенно уникальными механическими характеристиками. Поэтому в любом случае выбору электродвигателя и преобразователя частоты должен предшествовать этап анализа характера нагрузки и ее механической характеристики.

3. РЕЖИМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

В зависимости от характера нагрузки преобразователь частоты обеспечивает различные режимы управления электродвигателем, реализуя ту или иную зависимость между скоростью вращения электродвигателя и выходным напряжением.

Режим с линейной зависимостью между напряжением и частотой ($U/f=const$) реализуется простейшими преобразователями частоты для обеспечения постоянного момента нагрузки и используется для управления синхронными двигателями или двигателями, подключенными параллельно. Вместе с тем при уменьшении частоты, начиная с некоторого значения, максимальный момент двигателя начинает падать. Для повышения момента на низких частотах в преобразователях предусматривается функция повышения начального значения выходного напряжения, которая используется для компенсации падения момента для нагрузок с постоянным моментом или увеличения начального момента для нагрузок с высоким пусковым моментом, таких, например, как промышленный миксер.

Для регулирования электроприводов насосов и вентиляторов используется квадратичная зависимость напряжения/ частоты ($U/f^2=const$). Этот режим, так же как и преды-

душий, можно использовать для управления параллельно подключенными двигателями. Вместе с тем для повышения качества управления приводом требуется использование других, более совершенных методов управления. К ним относятся метод управления потокоцеплением (*Flux Current Control - FCC*) и метод бессенсорного векторного управления (*Sensorless Vector Control - SVC*). Оба метода базируются на использовании адаптивной модели электродвигателем, которая строится с помощью специализированного вычислительного устройства, входящего в состав управления преобразователя.

Наиболее точное и эффективное управление обеспечивает режим векторного управления без датчика обратной связи по скорости (*SVC*). Если в двигателях постоянного тока имеются две обмотки (статорная, или возбужденная и роторная, или якорная), что позволяет управлять отдельно скоростью вращения (ток возбуждения) и электромагнитным моментом (ток якоря), то в двигателях переменного тока с короткозамкнутым ротором имеется всего лишь одна статорная обмотка, через которую формируется возбуждающее магнитное поле и определяет вращающий момент. С этим и связаны все трудности управления электродвигателем. Выход остается один: необходимо управлять амплитудой и фазой статорного тока, то есть его вектором, однако для управления фазой тока, а значит, и фазой магнитного поля статора относительно вращающегося ротора необходимо знать точное положение ротора в любой момент времени. Эта задача может быть решена с использованием датчика положения, например, шифратора приращений. В такой конфигурации привод переменного тока по качеству регулирования становится сопоставим с приводом постоянного тока, но в составе большинства стандартных электродвигателей переменного тока встроенные датчики положения отсутствуют, поскольку их введение неизбежно ведет к усложнению конструкции двигателя и существенному повышению его стоимости.

Применение же современной технологии векторного управления позволяет обойти это ограничение путем использования математической адаптивной модели двигателя для предсказания положения ротора. При этом система управления должна с высокой точностью измерять значение выходных токов и напряжений, обеспечивать расчет параметров двигателя (сопротивление статора, значение индуктивности рассеяния и т.д.), точно

моделировать тепловые характеристики двигателя с различными режимами его работы, осуществлять большой объем вычислений с очень высокой скоростью. Последнее обеспечивается применением в составе системы управления преобразователя специализированных интегральных схем *ASIC*.

Векторное управление без датчиков обратной связи по скорости позволяет обеспечивать динамические погрешности, характерные для регулируемого привода с замкнутой обратной связью. Однако полное управление моментом при скорости, близкой к нулевой, невозможно без обратной связи по скорости. Такая обратная связь становится необходимой и для достижения погрешности регулирования менее 1%. Контур обратной связи при этом легко реализуется с помощью самого преобразователя частоты.

Вместе с тем режим векторного управления не может быть использован для синхронных или реактивных синхронных двигателей, для группы двигателей, чья номинальная мощность меньше половины мощности преобразователя частоты или превышает его.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ И ВИД РЕГУЛИРОВАНИЯ

Потери энергии в технологическом процессе зависят от расхода сети (технологической нагрузки), определяемого потребителем, и потерь напора на оборудовании насосной станции которые определяются гидравлическим сопротивлением элементов схемы. Для организации технологического процесса с минимальными энергетическими потерями необходимо, в первую очередь, снизить потери напора между трубопроводом насосного агрегата и сетью потребителей.

Кроме того, в процессе функционирования в зависимости от режимов работы системы может меняться давление перед насосом, создаваемое источником водоснабжения. Измерение этого давления также отражается на величине давления в сети потребителей.

Такой характер взаимосвязи параметров требует установки в системе дроссельных регулирующих элементов - регулирующих клапанов (иногда их роль выполняют напорные задвижки агрегатов). Эти элементы создают дополнительное гидравлическое сопротивление и позволяют обеспечить стабильное давление в сетевом трубопроводе. При использовании дроссельных элементов происходит распределение напора на элементах системы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

На величину потерь при дроссельном регулировании влияет не только регулирующий элемент: чаще всего на этапе проектирования выбирается насосный агрегат с определенным запасом напора, а при замене насосных агрегатов новое оборудование может иметь несколько завышенные характеристики. Кроме того, диапазон изменения входных давлений (перед всасывающим патрубком насосного агрегата) оказывает влияние на величину давления за насосным агрегатом. Все эти обстоятельства приводят к тому, что потери энергии в ходе технологического процесса становятся достаточно большими, достигающими 45 %, а в некоторых случаях и более, от номинальной мощности агрегата.

Для решения задачи минимизации потерь, связанных с регулированием давления в сети, необходимо исключить дополнительные гидравлические сопротивления на участке от насосного агрегата до сетевого трубопровода, то есть необходимо полностью открыть всю запорно-регулирующую арматуру. Это можно сделать, если процесс регулирования давления передать насосному агрегату. Теория работы нагнетателей (насосов и вентиляторов) доказывает, что изменение частоты вращения привода нагнетателя изменяет его напорные характеристики, кроме того, напор создаваемый нагнетателем, пропорционален квадрату частоты вращения агрегата. На рис. 3 приведено изменение на-

порных характеристик насосного агрегата при изменении частоты вращения. На этом рисунке кривая 1 соответствует номинальной (при номинальной частоте вращения привода) напорной характеристике, а кривые 2-4 - напорным характеристикам при пониженной частоте вращения.

Если организовать работу привода насосного агрегата таким образом, чтобы он при изменении параметров технологического процесса (расхода в сети и давления на входе агрегата) изменял частоту вращения, то в итоге можно без существенных потерь энергии стабилизировать давление в сети потребителей. При таком способе регулирования исключаются потери напора (нет дроссельных элементов), а значит, и потери гидравлической энергии.

Способ регулирования давления в сети путем изменения частоты вращения привода насосного агрегата снижает энергопотребление еще и по другой причине. Собственно насос как устройство преобразования энергии имеет свой коэффициент полезного действия - отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата.

Характер изменения коэффициента полезного действия насоса в зависимости от расхода жидкости Q при различных частотах представлен на рис. 4.

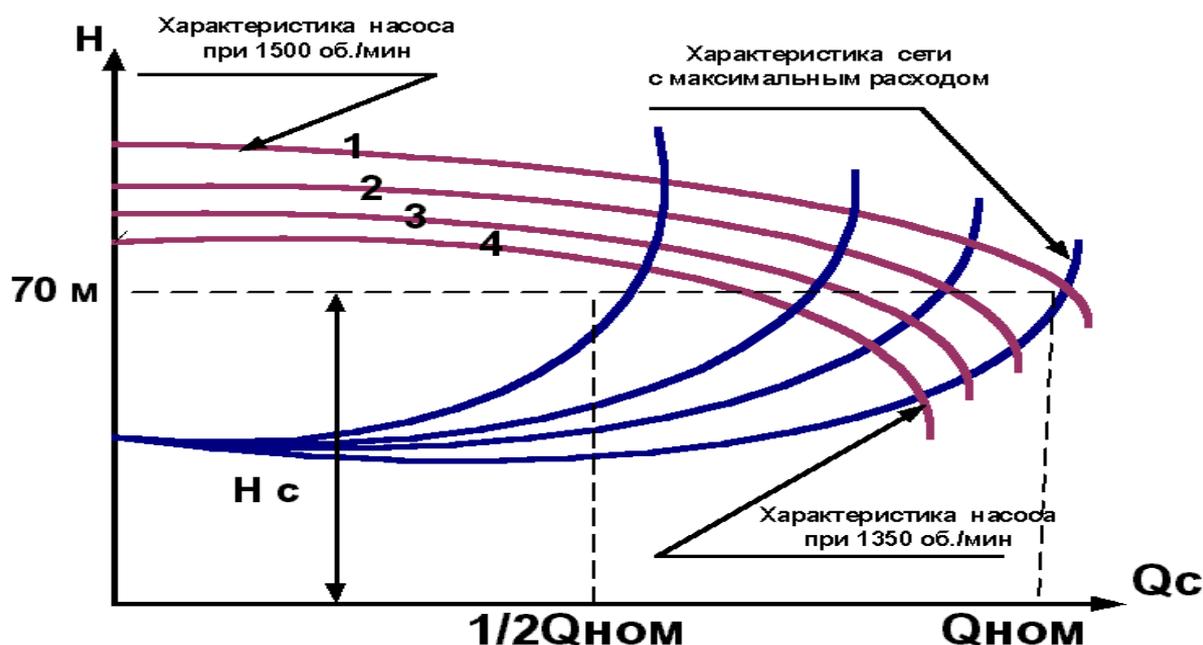


Рисунок 3 – Характеристики насосного агрегата и сети с частотным регулированием

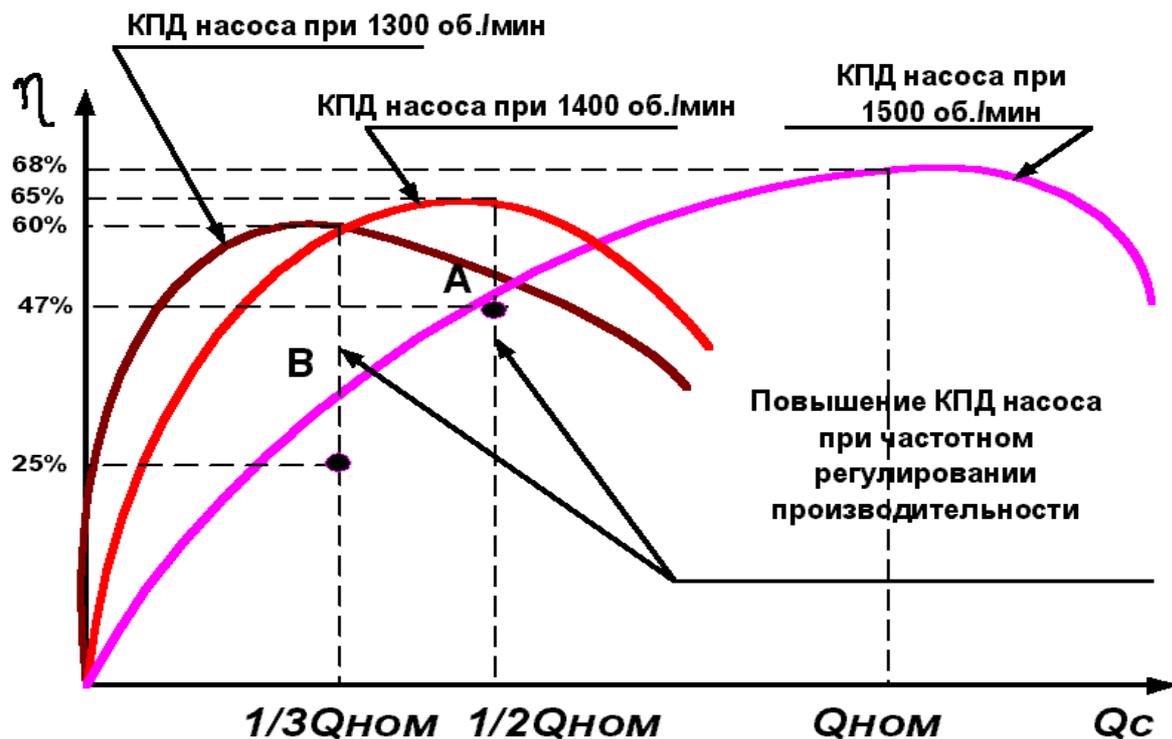


Рисунок 4 – Изменение КПД насосного агрегата с частотным регулированием при изменении производительности

В соответствии с теорией подобия максимум коэффициента полезного действия с уменьшением частоты вращения несколько снижается и смещается влево. Анализ требуемого изменения частоты насосного агрегата при изменении расхода в сети показывает, что с уменьшением расхода требуется снижение частоты вращения. Если рассмотреть работу агрегата для расхода меньше номинального (вертикальные линии А и В), то для этих режимов рационально работать на пониженной частоте вращения. В этом случае КПД насоса выше, чем при работе на номинальной частоте вращения. Таким образом, снижение частоты вращения в соответствии с технологической нагрузкой позволяет не только экономить потребляемую энергию на исключении гидравлических потерь, но и получить экономический эффект за счет повышения коэффициента полезного действия самого насоса - преобразования механической энергии в гидравлическую.

Применение частотного регулирования приводов позволяет существенно уменьшить и эксплуатационные затраты, связанные с обслуживанием агрегатов и систем. Например, снижение перепада давления между

всасывающим и напорным патрубками насосного агрегата увеличивает срок службы сальниковых уплотнений, практически исключая гидроудары и обеспечивает стабильность давлений в трубопроводах сетей, а также минимизирует затраты на обслуживание.

5. РЕЖИМЫ ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СПОСОБЫ ЕГО ОСТАНОВА

Самый простой способ останова - выбег электродвигателя. Двигатель отключается от питающей сети и останавливается по инерции. При этом время до полного останова не регулируется и определяется инерционными свойствами двигателя и его нагрузки.

Регулируемое время торможения обеспечивает генераторный способ, заключающийся в том, что преобразователь с необходимой скоростью уменьшает выходную частоту до требуемого значения. При этом двигатель превращается в генератор, преобразуя кинетическую энергию вращения в электрическую. В зависимости от типа выпрямляющего устройства энергия возвращается в первичную сеть либо накапливается в контуре преобразователя частоты. Во втором слу-

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

чае и в случае нагрузки с большим моментом инерции для рассеивания энергии может потребоваться применение внешнего тормозного сопротивления, подключение которого при возникновении опасного перенапряжения в промежуточном контуре преобразователя осуществляет специальная контролирующая схема. Таким образом, преимуществом генераторного торможения является предсказуемое время и плавность останова, высокий тормозной момент. Недостаток же заключается в том, что энергия выделяется в преобразователе, и, в случае быстрого останова или большого момента инерции нагрузки для избежания перегрева встроенного резистора контура постоянного тока преобразователя, необходимо использование внешнего сопротивления.

Для того чтобы осуществить торможение постоянным током, или, иными словами, динамическое торможение, с обмотки статора двигателя снимают переменное напряжение и на одну или две фазы подают постоянное напряжение. При этом магнитное поле будет вызывать в начале замедление, а затем и удержание ротора в неподвижном состоянии. Преимуществом динамического торможения является выделение электрической энергии в роторе двигателя, что делает ненужным использование тормозного сопротивления, и плавным останов. Но поскольку выходная частота преобразователем не контролируется, то время торможения становится величиной неопределенной. Эффективность торможения в этом случае по сравнению с генераторным методом составляет 30-40%.

При комбинированном способе торможения используется комбинация двух описанных способов, то есть на переменную составляющую выходного напряжения преобразователя накладывается постоянная составляющая. Этот способ торможения сочетает в себе преимущества обоих электрических способов торможения и позволяет эффективно тормозить электродвигатель за короткое время выделения тепла в преобразователе.

6. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Практика применения частотных преобразователей для управления насосами и вентиляторами доказывает целесообразность не просто включения преобразователя для управления агрегатом, а создания специализированных систем управления технологическим процессом. Именно такой подход позволяет получить экономический эффект не только от снижения потребляемой из сети

электрической мощности, но и добиться существенного уменьшения эксплуатационных расходов, улучшения условий труда и увеличения срока службы оборудования. Современные преобразователи частоты позволяют получать более 20 параметров состояния электропривода. Соответствующая обработка этих параметров позволяет проводить глубокое диагностирование, как оборудования системы, так и протекающих процессов. Появляется возможность не только реагировать на возникшую аварию, но и предупреждать ее, что для энергетических объектов значительно важнее.

Создание системы с частотно-регулируемыми приводами, в которых управление частотой осуществляется наряду с контролем целого комплекса различных технологических параметров, позволяет снизить не только потребление электрической энергии, но и обеспечивает экономию потребления энергоресурсов всей системы.

7. ВЫВОД

Применение частотно-регулируемых приводов для насосов и вентиляторов в технологических процессах позволяет снизить энергопотребление технологическим оборудованием. Перед началом внедрения рекомендуется провести технико-экономическое обоснование, позволяющее определить не только сроки окупаемости от внедрения, но и правильно организовать технологический процесс с учетом возможности привода с частотным регулированием. Целесообразно использование преобразователей частоты не в качестве элементов системы управления конкретного агрегата, а как составляющих комплексных системных решений с подключением широкого набора средств автоматизации технологического процесса. Такие решения позволяют получить дополнительный эффект, который заведомо больше простой экономии электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Белавкин И.В. Опыт работы по формированию и практическому использованию нормативно-правовой базы энергосбережения при реализации региональных программ //ТЭК. – 1999. – № 1.
3. Бушуев В.В. Энергоэффективность как направление новой энергетической политики России // Энергосбережение. – 1999. – № 4. – С. 32-35.
4. <http://www.energy-audit.ru/>.