

3. Основные мероприятия по энергосбережению

Наименование мероприятия	Годовой экономический эффект ¹		Капиталовложения, тыс. руб
	т у.т.	тыс. руб	
Внедрение частотно - регулируемого привода на воздуходувке к сушилке	24,3	3353,4	16000,0
Внедрение частотно - регулируемого привода на вытяжном вентиляторе	7,1	979,8	8000,0
Внедрение частотно - регулируемого привода на вакуумном водяном узле	13,3	1835,4	19500,0
Внедрение частотно - регулируемого привода на пульпере	26,7	3643,2	20500,0
Внедрение частотно - регулируемого привода на прессе ЛКТ-0	4,5	621,0	18000,0
Замена поршневых компрессоров ремонтно - механического цеха на винтовые	2,8	386,4	требует уточнения
Замена светильников системы производственного освещения	5,6	772,8	5980,0
Замена светильников с лампами накаливания и люминесцентными лампами на энергосберегающие в помещении заводоуправления	1,0	138,0	2633,0
Замена окон на стеклопакеты или установка третьего остекления в РМЦ	13,2	1821,6	требует уточнения
Установка приборов автоматики и учета теплоты в здании заводоуправления	3,3	455,4	7360,0

¹ С учетом стоимости 1 т у.т. = 60\$ и курса Нацбанка РБ на 2006 год (прогноз) = 2300 руб/\$

“Зеленоборское” говорит о том, что в целом резерв экономии достигает 111,0 т у.т., что составляет 5,4% от нормативного потребления (2056 т у.т.).

Основной перечень энергосберегающих мероприятий с расчетом годовой экономии ТЭР приведен в табл.3.

В случае организации производства на предприятии торфяных пеллет и введение в строй установки по комбинированному производству теплоты и электроэнергии годовая экономия ТЭР может быть достигнута в размере 85%

от нормативного потребления (15% - запас по резервированию электроэнергии от электросетей).

ЛИТЕРАТУРА

Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 27 декабря 2002 года № 1820 «О дополнительных мерах по экономному и эффективному использованию топливно-энергетических ресурсов», 2002.

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В НАСОСНОМ ОБОРУДОВАНИИ

А.И. Ковалинский, канд. техн. наук, доцент, Д.В. Батраков, И.Н. Шаукат,
Е.М. Прищенко, инженеры (УО БГАТУ)

Введение

Основные проблемы любого предприятия состоят в экономии энергоресурсов, увеличении сроков службы технологического оборудования и снижении затрат на ремонтные и профилактические работы.

Существует ряд наиболее распространенных машин и механизмов, эксплуатационная эффективность которых может быть значительно повышена при правильном выборе способа регулирования их производительности. Прежде всего, это насосы, вентиляторы, транспортеры,

измельчители кормов.

Регулируемый электропривод в большинстве случаев позволяет отказаться от задвижек, заслонок и другого запорно-регулирующего оборудования. В ряде случаев можно обойтись без редукторов, ременных и других передач, что значительно упрощает кинематическую схему механизмов, повышает их надежность и снижает эксплуатационные расходы.

В современных регулируемых электроприводах применяются асинхронный электродвигатель и преобразователь частоты. Частотно-регулируемый электропривод получает в наше время все более широкое применение.

Частотно-регулируемые электроприводы для широкого применения появились на рынке нашей республики сравнительно недавно и их стоимость пока еще достаточно высокая, поэтому важным является вопрос возврата средств, вложенных в их внедрение.

Сведения о современном состоянии в области регулируемого электропривода, применяемого на различных сельскохозяйственных и коммунальных объектах, приведенные в этой статье, будут полезными не только научным работникам и специалистам, работающим в области электроэнергетики, но и студентам вузов будущим инженерам-электрикам.

Центробежные насосы являются массовыми энергоемкими механизмами и обычно оснащаются регулируемым электроприводом.

В ряде случаев возникает необходимость регулирования подачи насосных установок (в связи с требованиями технологического процесса, в зависимости от режима водопотребления, при первоначальной наладке оборудования и т.п.). Подачу изменяют дросселированием на стороне нагнетания при помощи задвижек, при этом между насосом и задвижкой (дросселем) создается избыточное давление, на преодоление которого затрачивается энергия.

Применение регулируемого электропривода насоса обеспечивает энергосбережение и улучшает эксплуатационные характеристики насосного оборудования.

Рассмотрим энергетические характеристики технологического процесса на примере системы водоснабжения.

Требуемую удельную энергию для подачи воды в сеть потребителей можно определить как

$$W_C = \gamma \cdot H_C \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3), \text{ Вт} \quad (1)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – расходы воды потребителями сети, м³/с;

H_C – напор в сети потребителей, м;

γ – удельный вес жидкости, Н/м³.

Для нормальной работы сети необходимо создание постоянного напора H_C . Расходы потребителей

Q_1, Q_2, Q_3 изменяются во времени.

Гидравлическая энергия насосного агрегата опре-

деляется по формуле:

$$W_H = \gamma \cdot H_H \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3), \text{ Вт} \quad (2)$$

где H_H – напор, создаваемый насосным агрегатом, м.

Так как между насосным агрегатом и сетью установлены элементы со своими гидравлическими сопротивлениями (задвижки, водяные фильтры, регулирующие клапаны), то существуют потери напора:

$$\Delta H_H = \Delta H_1 + \Delta H_2, \text{ м} \quad (3)$$

где ΔH_1 – потери напора на задвижке и водяном фильтре, м;

ΔH_2 – потери напора на регулирующем клапане, м.

Таким образом, потери энергии при перекачивании жидкости можно получить как

$$\Delta W_H = \gamma \cdot \Delta H_H \cdot Q_C, \text{ Вт} \quad (4)$$

где Q_C – расход воды в сети, м³/с.

Для поддержания заданных параметров сети насос должен обеспечивать энергию:

$$W_H = \gamma \cdot H_C \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) + \gamma \cdot \Delta H_H \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3), \text{ Вт} \quad (5)$$

Для поддержания заданного давления в сетевом трубопроводе при изменении расхода изменяют гидравлическое сопротивление регулирующего элемента, при этом ΔH_H увеличивается и достигают 40...45% от номинальной мощности насосного агрегата; насос при этом необходимо выбирать с избыточным напором.

Исключить дополнительные гидравлические сопротивления из сети можно, если процесс регулирования обеспечивать за счет изменения производительности насосного агрегата.

Изменение напорных характеристик насосного агрегата при изменении частоты вращения иллюстрирует рис. 1, на котором кривая 1 соответствует номинальной напорной характеристике (при номинальной частоте вращения насоса), а кривая 2 – 4 – напорным характеристикам при пониженной частоте вращения.

Используя частотно-регулируемый привод, можно с минимальными потерями энергии стабилизировать давление в сети потребителей.

Известно также, что КПД насоса зависит от частоты вращения, что позволяет рационально использовать его при работе на пониженной частоте (рис. 2).

Таким образом, снижение частоты вращения в соответствии с требуемым расходом позволяет экономить потребляемую энергию за счет исключения гидравлических потерь, а также получать экономический эффект благодаря повышению при этом КПД насоса.

Экономический эффект от применения частотных преобразователей обеспечивается не только экономией электроэнергии, но и снижением потерь транспортируемого вещества.

Несмотря на высокую стоимость современных

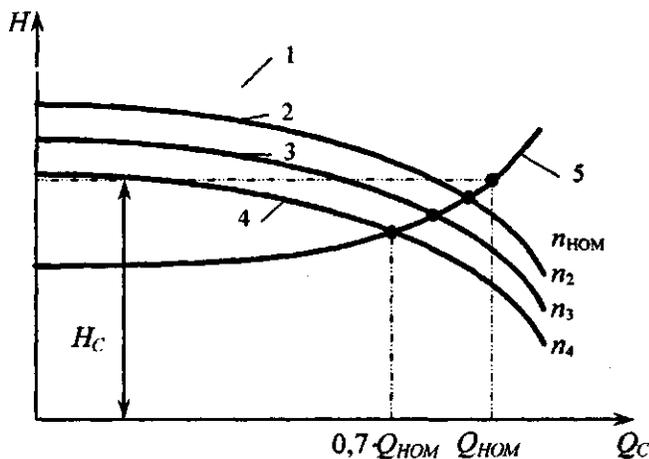


Рис. 1. Характеристики насоса и сети при частотном регулировании:

1 – характеристика насоса при номинальной частоте вращения $n_{ном}$; 2, 3, 4 – характеристики насоса при снижении частоты вращения ($n_{ном} > n_2 > n_3 > n_4$); 5 – характеристика сети

преобразователей, окупаемость вложенных средств за счет экономии энергоресурсов и других составляющих эффективности не превышает в среднем 1,5 – 2 года.

Создание систем с частотно-регулируемым электроприводом, в которых управление частотой вращения осуществляется с одновременным контролем ряда технологических параметров, позволяет не только снизить энергопотребление, но и правильно организовать технологический процесс. Другими словами, целесообразно использовать преобразователь частоты как составляющий элемент системы автоматизации технологического процесса.

Частотный преобразователь в комплекте с асинхронным электродвигателем позволяет заменить элект-

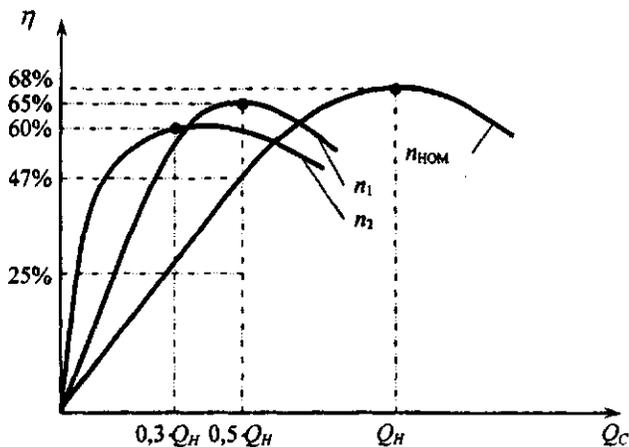


Рис. 2. Изменение КПД насосного агрегата с частотным регулированием при изменении производительности: $n_{ном}$ – номинальная частота вращения ($n_2 < n_1 < n_{ном}$)

тропривод постоянного тока. Системы регулирования скорости двигателя постоянного тока (ДПТ) достаточно просты, но довольно уязвимым элементом такого электропривода является электродвигатель, который дорог, ненадежен, требует больших затрат при эксплуатации.

Асинхронные электродвигатели (АД) превосходят двигатели постоянного тока по многим параметрам: они просты по устройству и надежны, так как не имеют подвижных контактов; имеют меньшие по сравнению с ДПТ размеры, массу и стоимость при той же мощности; АД просты в изготовлении и эксплуатации, могут использоваться в агрессивной среде.

Основной недостаток АД – сложность регулирования их скорости традиционными методами (изменением питающего напряжения, введением дополнительных сопротивлений в цепь обмоток). Управление АД в частотном режиме до недавнего времени было большой проблемой, хотя теория частотного регулирования была разработана еще в тридцатых годах прошлого века. Развитие частотно-регулируемого электропривода сдерживалось высокой стоимостью преобразователей частоты (ПЧ). Появление силовых схем с IGBT-транзисторами, разработка высокопроизводительных микропроцессорных систем управления позволило различным фирмам Европы, США и Японии создать современные преобразователи частоты доступной стоимости.

Принцип частотного метода регулирования скорости АД заключается в том, что, изменяя частоту f_1 питающего напряжения, можно в соответствии с вы-

ражением $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}$ при неизменном числе пар

полюсов p изменять угловую скорость магнитного поля статора ω_0 . Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью. Регулирование скорости при этом не сопровождается увеличением скольжения АД, поэтому потери мощности при регулировании невелики.

Для получения высоких энергетических показателей АД (коэффициентов мощности и полезного действия, перегрузочной способности) – необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение. Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки M_c . При постоянном моменте нагрузки $M_c = const$ напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте $U_1 / f_1 = const$. Для вентиляторного характера момента нагрузки это состояние имеет вид $U_1 / f_1^2 = const$, а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости, – $U_1 / \sqrt{f_1} = const$. Таким образом, для плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения вала асинхронного электродвигателя преобразователь частоты должен обеспечивать одновременное регулирование частоты и напряжения на ста-

торе АД.

В наиболее совершенных современных ПЧ использован принцип векторного управления [2].

2.1 Структура преобразователя частоты

Большинство современных преобразователей частоты построено по схеме двойного преобразования. Они состоят из следующих основных частей: звена постоянного тока (неуправляемого выпрямителя), силового импульсного инвертора и системы управления.

Звено постоянного тока состоит из неуправляемого выпрямителя и фильтра. Переменное напряжение питающей сети преобразуется в нем в напряжение постоянного тока.

Силовой трехфазный импульсный инвертор состоит из шести транзисторных ключей. Каждая обмотка электродвигателя подключается через соответствующий ключ к положительному и отрицательному выводам выпрямителя. Инвертор осуществляет преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное напряжение нужной частоты и амплитуды, которое прикладывается к обмоткам статора электродвигателя.

В выходных каскадах инвертора в качестве ключей используются силовые IGBT-транзисторы. По сравнению с тиристорами они имеют более высокую частоту переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальными искажениями.

Силовой модуль ПЧ (рис. 3) состоит из неуправляемого выпрямителя и инвертора на базе полупроводниковых ключей (в большинстве случаев это IGBT) драйвера затворов.

Драйвер затворов необходим для управления открытием и закрытием ключей. Быстрым последовательным переключением силовых ключей в

обмотку двигателя подается трехфазное импульсное напряжение. Фактическая форма напряжения представляет собой импульсы различной ширины, модулируемые широтно-импульсным модулятором (ШИМ). Выходная частота инвертора зависит от частоты задающих импульсов на входе драйвера затворов, а напряжение – от длительности импульсов ШИМ.

Пульт управления необходим для индикации параметров электродвигателя во время работы и индикации сигнала ошибки при аварии, а также для программирования режимов работы ПЧ, настройки параметров защиты. Программирование может быть произведено и с помощью персонального компьютера через специальный порт RS-485. В некоторых конструкциях используется съемный пульт управления.

Цепь обратных связей необходима для автоматического управления технологическим процессом. В некоторых моделях ПЧ встроенный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор позволяет регулировать такие параметры, как расход, давление, температуру. Для этого необходимы соответствующие датчики с токовым выходом 4...20 мА. При этом можно осуществлять ПИ, ПД или ПИД-регулирование.

2.2 Принцип работы преобразователя частоты

Регулирование выходной частоты $f_{\text{вых}}$ и напряжения $U_{\text{вых}}$ осуществляется в автономных инверторах (АИН) за счет высокочастотного широтно-импульсного управления. ШИМ характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора ЭД подключается поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя. Длительность этих состояний внутри периода модулируется по синусоидальному закону. При высоких (обычно 2–15 кГц) тактовых частотах ШИМ в обмотках электродвигателя, вследствие их фильтрующих свойств, текут синусоидальные токи.

Таким образом, форма кривой выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность прямоугольных импульсов (рис. 4). Частота импульсов определяется частотой ШИМ, длительность (ширина) импульсов в течение периода выходной частоты АИН промодулирована по синусоидальному закону. Форма кривой выходного тока в обмотках асинхронного электродвигателя практически синусоидальна.

Регулирование выходного напряжения АИН можно осуществить двумя способами: амплитудным (АР) за счет изменения входного напряжения U_B и широтно-импульсным за счет изменения программы переключения вентилей V_1-V_6 при $U_B = const$. Второй способ получил распространение в современных преобразователях частоты благодаря

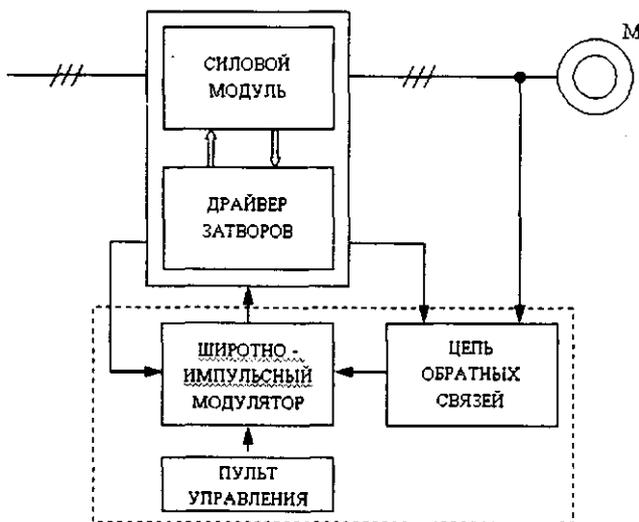


Рис. 3. Структурная схема преобразователя частоты

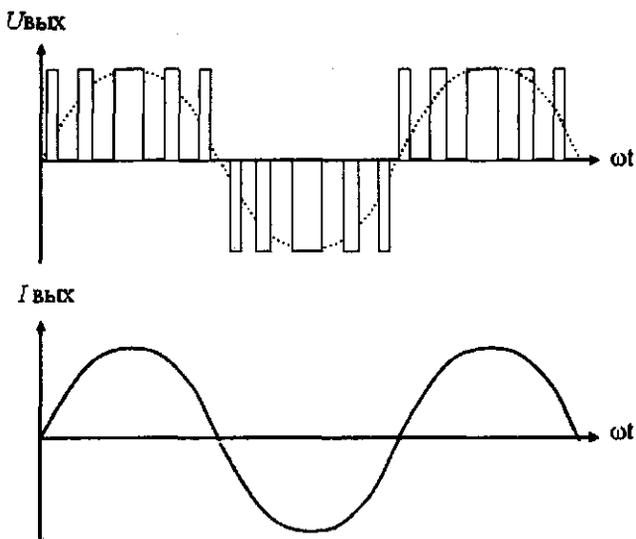


Рис. 4. Форма кривых напряжения и тока на выходе инвертора с широтно-импульсной модуляцией

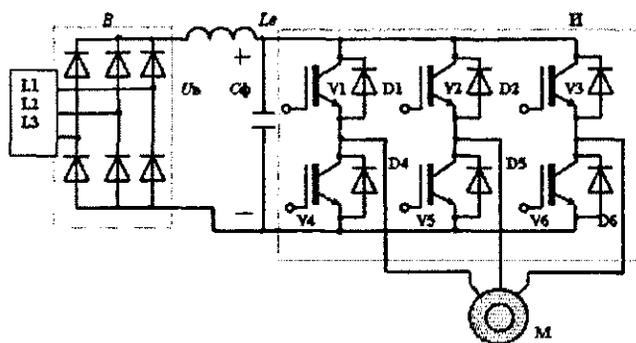


Рис. 5. Схема инвертора: И – трехфазный мостовой инвертор; В – трехфазный мостовой выпрямитель; Lb и Cф – дроссель и конденсатор фильтра

развитию современной элементной базы (микропроцессоры, IGBT-транзисторы). При широтно-импульсной модуляции форма токов в обмотках статора АД получается близкой к синусоидальной благодаря фильтрующим свойствам самих обмоток.

Такое управление, эквивалентное аналоговому, с помощью частоты и амплитуды напряжения позволяет получить высокий КПД преобразователя.

Современные инверторы выполняются на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов – запираемых GTO – тиристоров, либо биполярных IGBT-транзисторов с изолированным затвором. На рис. 5 представлена 3-х фазная мостовая схема автономного инвертора на IGBT-транзисторах. Она состоит из входного емкостного фильтра (Lb и Cф), предназначенного для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения, и шести IGBT-транзисторов V_1-V_6 с включенными встречно-параллельно

диодами обратного тока D_1-D_6 . За счет поочередного переключения вентиляей V_1-V_6 по алгоритму, заданному системой управления, постоянное входное напряжение UB преобразуется в переменное прямоугольно-импульсное выходное напряжение. Через управляемые ключи V_1-V_6 протекает активная составляющая тока асинхронного электродвигателя АД, через диоды D_1-D_6 – реактивная составляющая тока АД.

Мостовое соединение транзисторных ключей V_1-V_6 позволяет получать двухполярное напряжение в обмотках статора АД при однополярном источнике. При открывании двух ключей в диагонали моста к обмотке статора прикладывается полное напряжение питания. При закрывании ключей обмотки оказываются зашунтированными включенными в обратном направлении диодами D_1-D_6 , что приводит к быстрому снижению тока, вызванному ЭДС-самоиндукции обмоток.

Путем комбинирования различных состояний транзисторных ключей, изменяя частоту следования и длительность импульсов ШИМ – модулятора, можно уменьшить потери в транзисторах, улучшить форму тока в обмотках и повысить коэффициент мощности преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с.
2. Finbarr Moynihan. Fundamentals of DSP-Based Control for AC Machines / Analog Dialogue, № 34, 2000. – С. 3...6.
3. Чибыркин В., Рожков Л., Шестоперов Г., Юнович В., Клоков А. Энергосберегающие преобразователи частоты для низковольтных асинхронных электроприводов производства ОАО “Электровыпрямитель” / Компоненты и технологии: Силовая электроника №2, 2005. – С. 28...29.
4. Оттерпол Г., Хюбнер Р. Технические и экономические аспекты применения энергосберегающих электроприводов в насосных и вентиляторных механизмах (из опыта фирмы “Eipco AG”, Германия) / Научно-технический семинар “Энергосберегающий электропривод насосов и вентиляторов в промышленности и коммунальном хозяйстве”/ Тезисы докладов, –М., 1995. – С. 12...16.
5. Бергнер М. С., Гальцев Ю. К., Голыгин А. Ф., Давиденко П. В., Данилкин Н. И. Насосное и вентиляторное хозяйство в структурах современного производства. /Научно-технический семинар “Энергосберегающий электропривод насосов и вентиляторов в промышленности и коммунальном хозяйстве”/ Тезисы докладов. – М., 1995. – С. 23...25.