

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Энергосбережение является наиболее дешевым и безопасным способом увеличения энерговооруженности без введения новых генерирующих мощностей, так как затраты на экономию 1 кВт мощности обходятся в 4—5 раз дешевле, чем стоимость вновь вводимого 1 кВт мощности.

Основные потери (до 90 %) приходятся на сферу энергопотребления, и именно здесь должны быть сконцентрированы основные усилия по рациональному использованию электроэнергии. Так как электроприводы потребляют до 70 % всей вырабатываемой электроэнергии (это характерно для всех развитых стран), наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута при использовании регулируемых электроприводов в сочетании с автоматизацией технологических процессов.

В связи с тем, что среди регулируемых электроприводов наилучшие совокупные показатели имеют частотно-регулируемые электроприводы и асинхронных двигателей в диапазоне мощностей до 100 кВт производится в 40—50 раз больше, чем двигателей постоянного тока, их массовое применение позволяет решать не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения.

Современный электропривод является не только энергосиловой основой, позволяющей обеспечить производственные механизмы необходимой механической энергией, но и средством управления технологическими процессами, и задачи по реализации качества производственных процессов в большинстве случаев целесообразно возлагать именно на системы управления электроприводами.

Тенденция возрастания применения регулируемых электроприводов характеризуется следующими цифрами. Ежегодный рост мирового рынка продаж электроприводов составляет 7 %, причем в общем объеме ежегодно возрастает доля асинхронных электроприводов, так в 1990 г. она составила 60 %, в 1995 г. — 75%, в 2002 г. — 82%, в 2006 г. — 87%.

Технологические процессы лишь тогда протекают оптимально, когда система управления приводом имеет возможность регулирования производительности, интенсивности, показателей качества производственного механизма. Именно такие возможности обеспечивает частотно-управляемый электропривод, который целесообразно применять в большинстве отраслей промышленности для большинства используемых механизмов.

Таблица иллюстрирует этот тезис. Здесь буквой М обозначена мощность используемых приводов до нескольких МВт, буквой С — до нескольких сотен кВт, буквой Х — десятки и единицы кВт. Заштрихованные ячейки показывают, что Институт электродинамики НАН Украины ведет разработки в этой области и имеет научные и(или) внедренные результаты.

Механизмы Отрасли	Насосы	Вентиляторы	Компрессоры	Конвейеры и транспортеры	Краны	Лифты	Подача рабочего инструмента	Тяговые двигатели (двигатели)
Тепловая энергетика	М	М	С	С	Х	Х		
Атомная энергетика	М	М	С	С	С	Х		
Гидроэнергетика	Х	Х	Х		Х			
Нетрадиционная энергетика	Х	Х	Х	Х				
Металлургия	С	С	С	С	С	Х		
Угольная и горно-рудная промышленность	М	М	С	С	С	М	С	
Нефтяная и газовая промышленность	М	М	С	С	С	М	С	
Машиностроение	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	
Строительная индустрия			Х	Х	Х			
Жилищно-коммунальный комплекс	Х	Х	Х			Х		
Агропромышленный комплекс	Х	Х	Х	Х	Х	Х		
Железнодорожный транспорт	Х	Х	Х					М
Автомобильный транспорт								С
Авиационный транспорт	Х		Х					
Морской транспорт	С	С	С		Х	Х		М

Взаимодействие электропривода и приводимого механизма удобно проанализировать с помощью характеристик, приведенных на рис. 1, характерных для насосов, вентиляторов, компрессоров и других турбомеханизмов. На рис. 1 буквой *D* обозначено семейство характеристик электропривода при разных скоростях вращения, *E* – характеристики нагрузки приводимой системы. По оси *x* откладываются кинетическая энергия, скорость, расход. Интервал $x_1 \dots x_2$ характеризует производительность, которую можно обеспечить. По оси *y* откладываются значения потенциальной энергии, противодействующего момента, высоту напора и т.д., т.е. обычно значение противодействующей нагрузки, которую приводу необходимо преодолеть. Точки пересечения приводной характеристики (из семейства характеристик *D*) и характеристики нагрузки (из семейства характеристик *E*) — это рабочие точки.

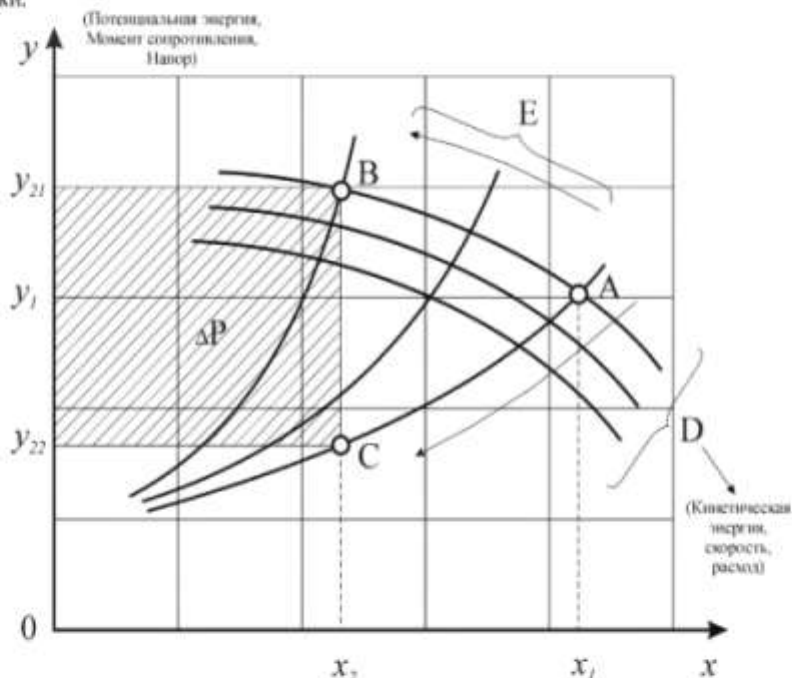


Рисунок 1. – Характеристики взаимодействия привода и приводимой системы

Производительность привода можно менять либо путем регулирования нагрузки, т.е. за счет механической части, когда при уменьшении производительности с x_1 до x_2 приводимая система переходит из точки *A* в точку *B*, что приводит к возрастанию противодействующего момента и, следовательно, к увеличению потребляемой мощности и энергии, либо путем регулирования скорости электропривода, т.е. применением регулируемого электропривода, когда при уменьшении нагрузки с x_1 до x_2 система переходит из точки *A* в точку *C*, что снижает противодействующий момент и, следовательно, уменьшает потребляемые мощность и энергию по сравнению с регулированием нагрузкой. Потребляемая приводом мощность пропорциональна произведению координат *x* и *y*, что при переходе в точку *B* традиционным способом соответствует площади прямоугольника $B y_{21} x_2 0$, при использовании же регулируемого привода (переход в точку *C*) его мощность соответствует площади прямоугольника $C y_{22} x_2 0$. Выигрыш мощности дельта *P* (заштрихованная площадь на рис.1) весьма существен и сопоставим с номинальной мощностью привода (рабочая точка *A*).

Ясно, что использование регулируемого электропривода, в сочетании с системами технологической автоматизации позволяет более гибко, плавно, динамично и, главное, **энергетически экономнее** воздействовать на производственный процесс и обеспечить наилучшие показатели его качества значительное снижение энергопотребления и других ресурсов.

Рассмотрим эту тенденцию на примерах, которые далее будут расширены и дополнены конкретными технико-экономическими показателями, подтверждающими обоснованность внедрения регулируемых асинхронных электроприводов для управления многими производственными механизмами [1].

В частности, характеристики турбомеханизма из семейства *D* описывается уравнением напора *H*:

$$H = A_2 n^2 + B_2 n \cdot Q + C_2 Q^2, \tag{1}$$

где *Q* – подача, *n* – скорость вращения, *A₂*, *B₂*, *C₂* – коэффициенты.

Характеристика сети без противодействия (нагрузки) из семейства *E* описывается уравнением:

$$H = RQ^2. \tag{2}$$

Из этих уравнений вытекает, что подача *Q* пропорциональна частоте вращения механизма и, соответственно, двигателя, и, поскольку напор *H* пропорционален квадрату частоты, то полезная мощность пропорциональна кубу частоты вращения.

$$P_1 / P_1 = k_p \cdot (n_1 / n_1)^3. \quad (3)$$

Следовательно, выигрыш в мощности при использовании регулируемого привода тем больше, чем больше диапазон регулирования. Отметим, что электроприводы механизмов этого класса (насосы, вентиляторы, компрессоры, дымососы и др.) потребляют около 25 % всей вырабатываемой электроэнергии. До последнего времени в подавляющем большинстве случаев для их привода использовался нерегулируемый асинхронный двигатель, а для регулирования расхода (подачи) применялось механическое управление через дроссель, заслонку, клапан и др. Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода, помимо радикальной экономии электроэнергии, позволяет решить ряд еще и ряд технологических задач (снизить или полностью ликвидировать гидравлические удары, стабилизировать требуемый уровень напора в системе и т.п.).

Приведем в качестве иллюстрации характерные ситуации существенного улучшения технологического процесса и радикальной экономии энергоресурсов на примере некоторых разработок Института электродинамики НАНУ.

1. Несмотря на сравнительно малую мощность двигателей бытовых компрессоров холодильников и кондиционеров (большинство из них составляют 80-1000 Вт), они работают круглый год и практически в каждом доме и офисе. Годовое потребление электроэнергии этими агрегатами на Украине составляет примерно $8,4 \cdot 10^9$ кВт.час, что в полтора раза превышает годовую выработку электроэнергии одного блока Запорожской АЭС. Поэтому оптимизация их энергопотребления дает огромный эффект энергосбережения.

Если обеспечить регулирование скорости вращения двигателя, чтобы он поддерживал постоянную температуру в камере холодильника, либо температуру в помещении (кондиционеры), то можно значительно уменьшить энергопотребление и улучшить качество вырабатываемого холода (уменьшить колебания температуры). Причем энергосбережение достигается двумя путями: повышением к.п.д. двигателя и уменьшением термодинамических потерь на эвaporаторе. Были выполнены теоретические исследования, а на базе серийного компрессора ХКВ 6,65-1М и холодильника НОРД 214 создан экспериментальный образец холодильника со специальным трехфазным асинхронным двигателем компрессора. Для этого в существующий пакет статора двухфазного асинхронного двигателя, была заложена специально рассчитанная трехфазная обмотка с двумя парами полюсов, а управление двигателем осуществлялось от разработанного специализированного миниатюрного преобразователя частоты. К.п.д. трехфазного асинхронного двигателя оказался на 10% выше, чем однофазного, что уже само по себе дает значительную экономию электроэнергии, кроме того, уменьшаются тепловые потери внутри компрессора, что дает дополнительное энергосбережение. Однако наибольший эффект дает уменьшение термодинамических потерь, за счет снижения разницы температур между воздухом в камере холодильника и эвaporатором. Испытания опытного образца холодильника показали, что энергопотребление снижается более чем на 40%, при сохранении всех необходимых технических характеристик агрегата. Более того, был выявлен ряд дополнительных положительных свойств:

- практически отсутствуют колебания температуры в камере, что улучшает качество хранения продуктов;
- за счет частотного пуска исключаются механические удары и рывки, а также броски пускового тока двигателя, и гидравлические удары хладагента, что не только улучшает виброакустические характеристики холодильника, но и снижает вредное влияние на сеть и уменьшает вероятность прорыва магистрали;
- в холодильнике с частотно-регулируемым приводом может быть обеспечен режим ускоренной заморозки продуктов, когда компрессор работает на скоростях выше номинальной что обеспечивает улучшение качества хранения.

Если учесть, то все перечисленные рассуждения относятся также и к промышленным холодильным агрегатам и кондиционерам (мощность которых может достигать сотен кВт), то трудно переоценить революционизирующее влияние этой разработки при ее массовом внедрении [2].

2. Весьма перспективно применение частотно-регулируемых асинхронных электроприводов системах подачи топлива в котлоагрегаты. Использование сейчас на ТЭС группового управления электродвигателями топливopитателей не позволяет выполнять дифференцированную коррекцию частоты вращения двигателя в зависимости от расхода угольной пыли по каждому отдельному питателю, что приводит к нестабильности распределения топлива по питателям. Например, разница скоростей в 100 об./мин приводит к снижению КПД котлоагрегата на 1,5 %. Этот существенный недостаток, как и ряд других устраняются при использовании частотно-регулируемых асинхронных электроприводов. В ИЭД НАНУ разработан такой электропривод для управления производительностью пылепитателей в широком диапазоне регулирования подачи топлива к горелкам [3]. Проведенные эксплуатационные испытания на энергоблоке №2 Бурштынской ГРЭС и энергоблоке №2 Трипольской ГРЭС показали высокую его эффективность и рекомендованы к серийному производству. В ближайшие 20 лет ТЭС и котельни предприятий, использующие органическое топливо, будут оставаться главными производителями тепловой и электрической энергии в Украине, а твердое топливо – главным (до 60%), используемым на ТЭС. В связи с этим массовое применение регулируемых приводов является исключительно актуальной задачей.

3. В малой энергетике на РТС и котельных предприятий применение частотно-регулируемых электроприводов (до 7,5 кВт) питателей для подачи в котел горючих материалов (газ, мазут) или горючих отходов (шелуха от переработки зерновых культур, опилки и пр.) позволяет не только стабилизировать работу котла при перемен-

ных отборах пара, но и уменьшить расход энергоносителя или, в случае использования отходов, исключения его потребления. Разработанные ИЭД НАНУ совместно с фирмой ТЭМС (руководитель работ – к.т.н. В.П. Стяжкин) САР подачи горючих материалов и отходов на базе частотно-регулируемых электроприводов внедрены в количестве более 10 на десятках предприятий по переработке зерновых культур (комбинатах хлебопродуктов). Аналогичные системы с приводами мощностью до 11 кВт внедрены на 5 предприятиях по производству стеклоизделий на конвейерах и питателях позволили полностью автоматизировать технологический процесс, экономить до 20 % электроэнергии, повысить эффективность линий (расход энергии и материалов на единицу продукции). В коммунальном хозяйстве и на предприятиях Киева и Львова применение частотно-регулируемых электроприводов мощностью до 100 кВт (насосные агрегаты в городских системах холодного и горячего водоснабжения) позволило экономить электроэнергию до 40-50%, воды и тепла – до 20%.

Основные пути повышения энергетической эффективности асинхронных электроприводов можно условно разделить на следующие основные направления [1,3].

Первое направление связано со *снижением потерь в электроприводе при выполнении им заданных технологических операций по заданным тахограммам и с определенным режимом нагружения*. Это электроприводы, работающие в пускотормозных режимах (краны, лифты, главные приводы слябингов и блюмингов, прокатных станов и др.) или длительных режимах с медленно изменяющейся нагрузкой (насосы, вентиляторы, компрессоры, транспортеры и т.д.). В таких электроприводах за счет снижения потерь электропривода в установившихся и переходных режимах возможна значительная экономия электроэнергии.

Второе направление связано с изменением технологического процесса на основе перехода к более совершенным способам регулирования электропривода и параметров этого технологического процесса. При этом происходит *снижение потребления энергии электроприводом*. В качестве примера можно привести электроприводы насосов, вентиляторов, турбокомпрессоров, поршневых насосов и компрессоров, транспортеров, систем регулирования соотношения топливо – воздух и др. При этом, как правило, эффект не ограничивается экономией электроэнергии в электроприводе, во многих случаях возможна экономия ресурсов (воды, твердого и жидкого топлива и т.д.).

Для обоих названных направлений характерным является то, что в них снижается потребление энергии именно в электроприводе: в первом случае за счет снижения потерь энергии, во втором за счет использования менее энергозатратного со стороны электропривода управления технологическим процессом.

Третье направление, *обеспечивает реализацию энергосберегающих технологий*. В ряде технологических процессов электропривод сравнительно небольшой мощности управляет потоком энергии, мощность которого в десятки и сотни раз превышает мощность электропривода. К таким объектам можно отнести дуговые сталеплавильные печи постоянного и переменного тока, вакуумные дуговые печи, рудовосстановительные печи, установки индукционного нагрева и т. д. На них электроприводы мощностью в несколько киловатт могут управлять процессом, потребляющим десятки мегаватт. Очевидно, что от совершенства электропривода, его быстродействия и точности, во многом зависит эффективное использование таких значительных объемов энергоресурсов, что энергетические показатели самого привода никакой существенной роли не играют.

В рамках первых двух направлений особое значение имеют энергетические показатели силовой части привода. К настоящему времени повсеместное распространение получила т.н. AC-DC-AC система построения силовой части частотно-управляемого асинхронного электропривода, содержащая три основных блока: выпрямитель на входе, инвертор на IGBT- транзисторах с ШИМ управлением и формированием квазисинусоидального регулируемой частоты напряжения на выходе, и батарею электролитических конденсаторов между ними. Такие приводы массово выпускаются ведущими фирмами Европы, США и Японии (ABB, DANFOSS, GENERAL ELECTRIC, MITSUBISHI, TOSHIBA и др.) мощностью от единиц кВт до нескольких МВт, и хорошо зарекомендовали себя в перечисленных выше отраслях промышленности, особенно после начала применения т.н. векторного управления двигателем и прямым управлением его крутящим моментом. Однако два основных недостатка, органично присущих этим приводам, существенно ограничивают возможность их эффективного использования: 1) генерация в сеть высших гармоник тока (суммарный коэффициент гармоник – Total Harmonic Distortion – THD, может без принятия специальных мер достигать 80-90%) и 2) высокая стоимость, большие габариты и пониженная надежность из-за старения батарей электролитических конденсаторов. Оба эти недостатка преодолены в новой концепции построения силовых цепей частотно-регулируемых приводов, разработанной в ИЭД НАНУ [4]. Она базируется на обязательном включении на входе таких приводов специального широкополосного силового LMC-фильтра [5,6], также разработанного в ИЭД НАНУ и освоенного в серийном производстве рядом фирм, в частности, Канадской фирмой "MIRUS International Co." под названием *LINEATOR* [7]. Одна из схем такого фильтра представлена на рис. 2.

Отличительной ее особенностью является размещение на каждом стержне сердечника дросселя трех обмоток (для каждой фазы): основной (сетевой) с индуктивностью L_1 , поперечной (в цепи конденсаторов) L_3 , и компенсационной (выходной) с индуктивностью L_2 . Таким образом, все девять обмоток оказываются магнитно-связанными, причем три выходных обмотки включены встречно по отношению к остальным шести. Возможны (и применяются) и другие комбинации магнитных связей, количества обмоток, немагнитных зазоров дросселей. Каждая модификация дросселей ориентирована на оптимизацию различных параметров фильтра.

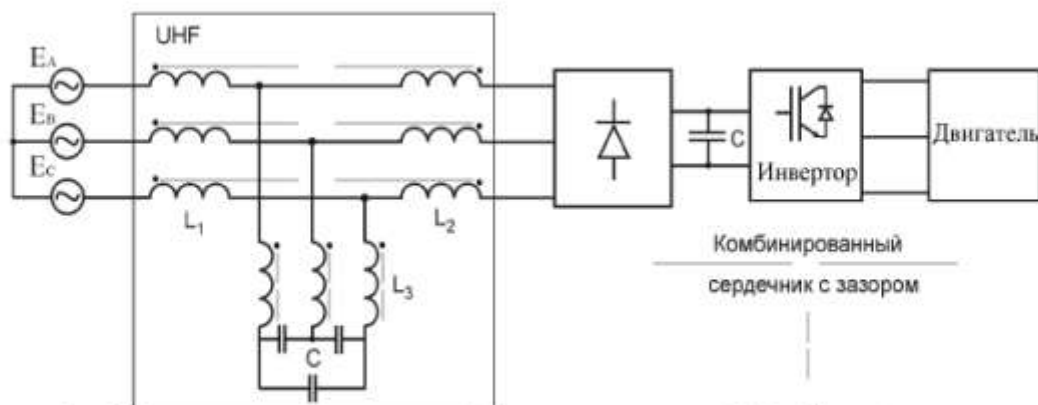


Рис. 2. Схема привода с универсальным фильтром гармоник тока (UHF or Lineator) на входе

Включение UHF между питающей сетью и выпрямительным мостом привода, как показали расчеты, моделирование и эксперименты, приводит к следующим основным эффектам:

- подавления 5-й и 7-й гармоник потребляемого из сети тока до уровня 2-4 % и резкому снижению общего THD₁ до 5-7 %;
- изменению формы подводимого к плечам моста линейного напряжения, которое в этом случае становится близким к трапецеидальному;
- увеличению на контролируемую величину среднего значения выпрямленного напряжения;
- увеличению жесткости нагрузочной характеристики выпрямителя.

Эти четыре фундаментальных отличия, связанные с применением UHF (Universal Harmonic Filter, or LINEATOR), приводят к появлению ряда дополнительных положительных качеств, из которых отметим следующие.

Благодаря снижению коэффициента гармоник и коррекции коэффициента мощности по основной частоте, существенно увеличивается общий коэффициент мощности системы PF (Power Factor). Если в приводах без реактора переменного тока он составляет 0,75 – 0,77, в приводах с реакторами – 0,85 – 0,88, то в системе с UHF – PF = 0,98 – 0,99. Это значит, что при той же мощности нагрузки соответственно на 30% либо 11% снижается эффективное значение потребляемого из сети тока, примерно на столько же уменьшаются потери напряжения и на 20-70 % уменьшаются потери энергии в питающей привод сети. Кроме того, в 2-3 раза уменьшается "crest-factor", т.е. превышение максимального (пикового) значения тока над действующим, приближаясь к стандартной для синусоиды величине 1,41.

Существенным положительным фактором, сопровождающим применение UHF, является видоизменение формы подаваемого на выпрямительный мост междуфазного напряжения – с синусоидальной на трапецеидальную, при которой пульсации выпрямленного напряжения при той же нагрузке и при том же фильтрующем конденсаторе С оказываются намного меньшими. Например, коэффициент пульсации напряжения на 50-киловатной нагрузке, шунтированной батареей электролитических конденсаторов емкостью 6000 мкФ, обычно составляет $K_{\text{П}} = 0,8-0,9\%$, при снижении емкости до 2000 микрофарад он увеличивается до 2,5-2,7 %. При использовании же UHF, как показали расчеты и эксперименты, он равен соответственно 0,34% и 0,92%. Таким образом, без ущерба для работы электрооборудования можно почти в 3 раза (!) уменьшить объем и снизить цену дорогостоящих (и отметим попутно, с малым сроком службы) электролитических конденсаторов. Это преимущество, особенно для приводов большой мощности, трудно переоценить. Спроектированные ИЭД НАНУ такие фильтры серийно производятся фирмой «MIRUS International Co». на мощности от 5 кВт до 3,2 МВт и работают на сотнях предприятиях США, Канады, Кореи, Бразилии и других стран. В настоящее время налаживается их производство и в Украине.

Литература

1. Браславский И.Я и др. - Энергосберегающий асинхронный электропривод.- М.: АКАДЕМА,-250с.
2. Войтех В.А. Частотное регулирование скорости вращения асинхронных двигателей компрессоров бытовых холодильников// Техническая электродинамика.- Тематический выпуск «Проблемы современной электротехники» 2004.- Частина 3.- С.61-63.
3. Исаков В.Н., Пугатарь А.П. Автоматизированные электромеханические системы на базе частотно-регулируемых электроприводов // Промэлектро – 2003.-№ 4. - С12-16.
4. Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых электроприводов// Техническая электродинамика -1999.-№ 4.- С.21-26.
5. Patent US 6127743/ Universal Harmonic Mitigating System / M.Levin, I.Volkov, V.Kuznetsov.-10.03.2000.
6. Patent Application Publication US 2006/0197385 A1/ Harmonic Mitigating Device with magnetic shunt / M.Levin, I.Volkov, -07.09.2006.
7. Сайт www. mirusinternational.com