

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Введение. В статье рассмотрены пути энергосбережения средствами промышленного электропривода, способы эффективного использования электроэнергии, определяющие три процесса: энергопотреблением, энергоиспользованием и энергоуправлением. Освещается необходимость использования энергосберегающих двигателей и вопрос экономии электроэнергии рабочими установками за счет повышения эффективности использования технологического процесса.

Сохранение электрической энергии является важной частью общей тенденции по защите окружающей среды. Добыть тонну топлива и выработать соответствующее количество энергии – примерно вдвое дороже, чем сэкономить. Электродвигатели, приводящие в действие системы в быту и на производстве, потребляют более 60% производимой энергии. Поэтому здесь заложены самые крупные резервы энергосбережения.

Энергосбережение в электроприводе является частью общего процесса эффективного использования электроэнергии и определяется тремя процессами [1]:

- ♦ энергопотреблением;
- ♦ энергоиспользованием потребляемой энергии;
- ♦ энергоуправлением процесса энергопотребления.

Энергопотребление – процесс формирования составляющих мощности на входе преобразователя при работе электропривода. Этот процесс характеризуется

зависимостями активной, реактивной и мощности искажения от скорости и момента двигателя, показателями качества электроэнергии и их влиянием на характеристики электромеханических преобразователей.

Энергоиспользование – использование мощности, потребляемой из сети. Этот показатель характеризует качественную сторону процесса энергопотребления. Он показывает насколько эффективно использование потребляемой электроэнергии, какая ее часть относится к потерям, а какая – к полезной мощности, как распределяются потери, определяющие рабочий режим электродвигателя, его температуру и надежность, механизмы старения электрооборудования.

Энергоуправление – процесс формирования режимов энергопотребления с помощью технических устройств и систем, воздействующих на цепи управления электроприводом и преобразовательные устройства, питающие эти цепи. К энергоуправлению относится управление перераспределением потерь в электрических двигателях, оптимизация потерь, минимизация нагрева активных частей электрической машины, снижение уровней потребляемой реактивной мощности и генерирование гармоник тока.

Первый путь энергосбережения относится к простейшему неуправляемому, самому массовому электроприводе и состоит в совершенствовании процедуры выбора двигателя для конкретной технологической установки с целью соблюдения номинального теплового режима двигателя при эксплуатации.

Известно, что в отдельных подотраслях промышленности аварийность электродвигателей колеблется от 20 до 60–70% в год, причем указанные показатели отличаются даже в случае однотипных предприятий или производств. Характерно, что при общем спаде производства количество аварийных выходов машин не уменьшается, а растет.

С учетом недогрузки электрических машин в нормальном технологическом режиме на 20–25% и снижении производительности в 2,5–3 раза затраты на ремонт двигателей (при наработке на отказ 4000 час) вплотную приближаются к стоимости электроэнергии, которую потребил бы двигатель за время эксплуатации между двумя ремонтами при условии, что цена 1 кВт·ч находится на уровне 0,13 – 0,15 грн. С учетом транспортных и иных расходов, связанных с аварийным выходом двигателей из строя, удельные затраты на ремонт приближаются к соответствующему показателю для новых заводских машин.

Второй путь повышения экономичности массового нерегулируемого электропривода – переход на энергосберегающие двигатели и двигатели улучшенной конструкции, специально предназначенные для работы с регулируемым электроприводом. В энергосберегающих двигателях за счет увеличения массы активных материалов (железа и меди) повышены номинальные значения КПД и $\cos \phi$. Энергосберегающие двигатели используются, например, в США и дают эффект при постоянной нагрузке. Целесообразность применения энергосберегающих двигателей должна оцениваться с учетом дополнительных затрат, поскольку небольшое (до 5%) повышение номинальных КПД и $\cos \phi$ достигается за счет увеличения массы железа на 30–35%, меди на 20–25%, алюминия на 10–15%, то есть за счет удорожания двигателя на 30–40%.

Ориентировочные зависимости КПД (η) и $\cos \phi$ от номинальной мощности P_N для обычных и энергосберегающих двигателей фирмы Гоулд (США) приведены на рис.1 (сплошные линии соответствуют энергосберегающим двигателям).

Повышение КПД энергосберегающих электродвигателей достигается следующими изменениями в конструкции:

- удлиняются сердечники, собираемые из отдельных пластин электротехнической стали с малыми потерями. Такие сердечники уменьшают магнитную индукцию, то есть потери в стали;

- уменьшаются потери в меди за счет максимального использования пазов и проводников повышенного сечения в статоре и роторе;

- добавочные потери сводятся к минимуму за счет тщательного выбора числа и геометрии зубцов и пазов.

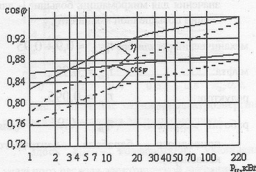


Рис. 1. Зависимости (η) и $\cos \phi$ от номинальной мощности для обычных и энергосберегающих двигателей

Изменения в конструкции способствуют снижению выделения тепла, что позволяет уменьшить мощность и размеры охлаждающего вентилятора. Это приводит к снижению вентиляторных потерь и, следовательно, к уменьшению общих потерь мощности.

Проведенные испытания трех “энергосберегающих” электродвигателей [2] показали, что при полной нагрузке полученная экономия составила: 3,3% для электродвигателя 3 кВт, 6% для электродвигателя 7,5 кВт и 4,5% для электродвигателя 22 кВт.

Цена обычного электродвигателя мощностью 7,5 кВт в среднем составляет 171 доллар США, тогда как стоимость электродвигателя с повышенным КПД – 296 долларов США (надбавка к цене – 125 долларов США). Период окупаемости для электродвигателя с повышенным КПД, рассчитанный на основе маргинальных издержек, составляет приблизительно 5000 часов, что эквивалентно 6,8 месяцам работы электродвигателя при номинальной нагрузке. При меньших нагрузках период окупаемости будет несколько больше.

Эффективность использования энергосберегающих двигателей будет тем выше, чем больше нагрузка двигателя и чем ближе его режим работы к постоянной нагрузке.

Третий путь – устранение промежуточных передач.

Ориентировочные значения КПД элементов привода:

преобразователь: $\eta_{\Pi} = 0,5 + 0,95$ (меньшие значения для малых скоростей вращения, большие для более высоких скоростей);

двигатель: $\eta_{\Pi} = 0,75 + 0,95$ (меньшие значения для микромашин, большие – для машин повышенной мощности);

механический регулятор: $\eta_{рег} \approx 0,9 + 0,95$

муфта: $\eta_{м} = 0,99$;

редуктор: $\eta_{р} = 0,095$;

рабочий механизм: $\eta_{рм} \approx 0,95$ (для приводного барабана ленточного конвейера).

Коэффициент полезного действия системы электропривода

$$\eta = \eta_{\Pi} \eta_{Д} \eta_{рег} \eta_{М}^i \eta_{р} \eta_{рм}, \quad (1)$$

где i – количество соединительных муфт.

Подстановка в формулу усредненных значений КПД для привода с электродвигателем мощностью 10–100 кВт дает значение КПД в диапазоне $\eta = 0,65 + 0,75$. При этом в среднем от 7 до 10% мощности теряется в механических передачах. Таким образом, устранение механических передач приводит к существенному повышению КПД системы (на 7–10%).

Четвертый путь заключается в повышении эффективности работы электропривода, то есть в выборе рациональных режимов работы и эксплуатации электропривода.

Сюда входят:

- ♦ выбор рационального способа и диапазона регулирования скорости электропривода в зависимости от технологических условий работы машины и механизмов;
- ♦ выбор рационального способа регулирования скорости в зависимости от характера изменения нагрузки;
- ♦ повышение загрузки электрических машин;
- ♦ исключение режима холостого хода;
- ♦ снижение напряжения на зажимах двигателя;
- ♦ минимизация тока и потерь энергии асинхронного двигателя (АД) при изменении нагрузки;
- ♦ оптимизация динамических режимов;
- ♦ использование синхронной машины как компенсатора реактивной мощности;
- ♦ использование аккумуляторов энергии.

Коэффициент загрузки двигателя рассчитывается по формуле:

$$k_3 = \frac{P_{\phi}}{P_{н}} \approx \frac{P_c}{P_{к}} \quad (2)$$

где P_{ϕ} – фактическая мощность, развиваемая приводом;

P_c – мощность, потребляемая из сети, определяется по показаниям приборов за фиксированный промежуток времени как мощность, потребляемая двигателем из сети при данной нагрузке;

$P_{н}$ – номинальная мощность.

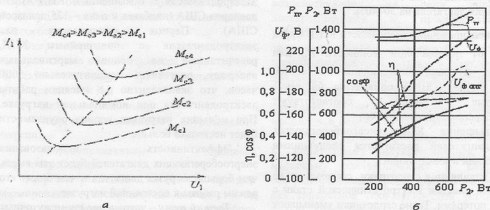


Рис. 4. Рабочие характеристики электропривода с переменной нагрузкой

Тогда за номинальную мощность берут мощность, потребляемую двигателем из сети при номинальной нагрузке:

$$P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{3}, \quad (3)$$

где η – КПД системы электропривода.

Рекомендации нормативных документов Министерства топлива и энергетики Украины:

- при $0 \leq k_3 < (0,4 \dots 0,5)$ – необходима установка двигателя меньшей мощности;
- при $(0,4 \dots 0,5) \leq k_3 < (0,7 \dots 0,75)$ – целесообразность снижения установленной мощности привода должна быть подтверждена расчетами;
- при $(0,7 \dots 0,75) \leq k_3 \leq 0,9$ – мощность привода выбрана верно.

Ограничение максимального значения k_3 величиной 0,9 позволяет предотвратить возможную перегрузку двигателя в случае падения напряжения питающей сети.

На рис. 2 представлена усредненная

зависимость КПД $\frac{\eta}{\eta_{\text{ном}}}$ от коэффициента загрузки, которая показывает, насколько нежелательна работа привода с малым коэффициентом загрузки.

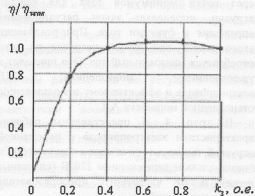


Рис. 2. Зависимость КПД электропривода от коэф. загрузки

Значение экономии электроэнергии, получаемое в результате повышения загрузки машин, можно определить из рис. 3.

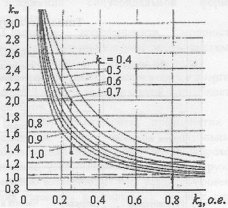


Рис. 3. Значение экономии электроэнергии в результате повышения загрузки машины

Здесь k_w – коэффициент увеличения удельного расхода электрической энергии:

$$k_w = \frac{W_y}{W_{y0}}, \quad (4)$$

где W_y – фактическое значение удельного расхода электроэнергии за фиксированный промежуток времени, кВт·ч/(час, сутки, и т.д.);

W_{y0} – удельный расход энергии при отсутствии холостого хода и нагрузке $k_3=1$, кВт·ч/(час, сутки и т.д.).

Коэффициент использования рабочей машины:

$$k_T = \frac{t_n}{t_n + t_x}, \quad (5)$$

где t_n – время работы под нагрузкой, ч;

t_x – время холостой работы, ч.

При невозможности замены малозагруженных двигателей следует проверить целесообразность снижения напряжения на их зажимах. Снижение напряжения питания АД приводит к уменьшению потребления реактивной мощности (за счет снижения тока намагничивания) и, тем самым, к повышению $\cos \varphi$. При этом одновременно уменьшаются потери активной мощности, то есть увеличивается КПД двигателя.

Возможны следующие методы снижения напряжения у малозагруженных асинхронных двигателей:

Типы регулируемых электроприводов

№	Показатель	Тип электропривода										
		ВП (ТП-Д)	Частотно-регулируемый электропривод (ПЧ-АД)				ВД	АВК	МДП	Фазовое управление (ТРН-АД)	Привод с электромагнитными муфтами	
1.	Тип двигателя	ДПП	АД с короткозамкнутым ротором				СД	АД с фазным ротором		АД с короткозамкнутым ротором		
2.	Щетки, коллектор или контактные кольца	+	-				- (+)	+		-		
3.	Управление со стороны	якоря	статора				статора	статора		статора		
4.	Регулируемый параметр	Напряжение	Частота и напряжение				Напряжение	Напряжение		Напряжение	Напряжение возбуждения эл. маг. муфты	
5.	Структура преобразователя	УВ	УВ-ИН	УВ-ИТ	ШИМ	УВ-ИТ	НПЧ	В-И	НПЧ			
	Режимы работы: двигательный	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	тормозной	+	+	-	+	+	+	-	-	+	-	
	четыре квадранта	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	
	частые пуски	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	
	частые реверсы	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	
7.	Возможный диапазон рабочих частот	С увеличением частоты уменьшается предельная мощность		Верхний предел ограничен механической прочностью машины			Верхний предел ограничен механической прочностью машины. Устойчивая работа при низких скоростях.		30-50 Гц	30-70 Гц	40-50 Гц	0-50 Гц

- ♦ переключение статорной обмотки с "треугольника" на "звезду";
- ♦ секционирование статорных обмоток;
- ♦ понижение напряжения в силовых цепях предприятий переключением ответвлений понижающих трансформаторов;
- ♦ применение регулируемого электропривода, позволяющего изменять напряжение на статоре АД в функции нагрузки (ЧРП, ТРН-АД).

Снижение напряжения влияет и на тепловой режим асинхронных двигателей. Так, при номинальной нагрузке и номинальной частоте питающей сети снижение напряжения на 10% приводит к росту перегрева двигателя также на 10%. Однако следует учитывать, что при загрузке двигателя, составляющей 90%, допустимо снизить напряжение на 13%, а при $k_3 = 0,8$ напряжение можно снижать на 22%, без опасности перегрева двигателя свыше допустимого.

На рис. 4, а приведены зависимости тока I_1 от напряжения U_1 при различных моментах

нагрузки M_c . Из рисунка следует, что при каждой нагрузке АД имеется такое напряжение, при котором потребляемый двигателем ток минимален. Штриховая линия, проведенная через точки минимумов тока для каждой нагрузки, определяет закон регулирования напряжения в функции тока. При реализации такого закона при любой нагрузке из сети потребляется минимальный ток. Это приводит к существенному повышению КПД электропривода и эффективному использованию установленной мощности АД.

На рис. 4, б представлены рабочие характеристики электропривода с переменной нагрузкой, питающегося от сети с частотой 50 Гц и номинальным напряжением 220 В (сплошные линии) и от частотного преобразователя (пунктирные линии).

Как следует из характеристик, при уменьшении нагрузки от номинальной ($P_{2н} = 750$ Вт) до минимальной (200 Вт) при питании АД (4АМ71В) от энергосберегающего устройства по сравнению с нерегулируемым

электроприводом потребляемая двигателем мощность P_{Π} уменьшается от 8,7 до 61%, коэффициент полезного действия η возрастает от 7 до 43%, коэффициент мощности $\cos \varphi$ от 6 до 36%. Уровень оптимального фазного напряжения $U_{\phi, \text{опт}}$ при тех же диапазонах изменения мощности на валу АД уменьшается до 50% номинального $U_{\phi, \text{н}}$. Таким образом, применение энергосберегающего устройства существенно улучшает технико-экономические и энергетические показатели установки.

Пятый путь – выбор рационального типа электропривода для конкретной технологической установки и переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому.

При неполной нагрузке работа с постоянной скоростью характеризуется повышенным (по сравнению с номинальным режимом) удельным расходом электроэнергии. Снижение скорости механизмов непрерывного транспорта при недогрузке позволяет выполнить необходимую работу с меньшим удельным расходом электроэнергии. В этом случае экономический эффект появляется также за счет улучшения эксплуатационных характеристик технологического оборудования. Так, при снижении скорости уменьшается износ тягового органа транспортера, увеличивается срок службы трубопроводов за счет снижения давления и т.д. Эффект в сфере технологии часто оказывается существенно выше, чем за счет экономии электроэнергии.

Типы основных регулируемых электроприводов с краткой их характеристикой представлены в табл. 1, из которой следует, что вентильный двигатель и частотно-регулируемый асинхронный привод являются наиболее универсальными типами регулируемого привода с наилучшими техническими данными. Так, по режимам работы они не уступают приводу постоянного тока, выгодно отличаясь от него практически неограниченным диапазоном мощностей и частот вращения, большей надежностью и простотой.

Шестой путь – улучшение качества электроэнергии средствами силовой преобразовательной техники регулируемого электропривода.

Регулируемый электропривод при работе оказывает неблагоприятное воздействие на сеть электроснабжения, что выражается в снижении коэффициента мощности на входе преобразователя, колебаниях напряжения в сети

и искажении синусоидальной формы напряжения.

Снижение коэффициента мощности увеличивает реактивную мощность системы электроснабжения, что приводит к дополнительным потерям напряжения и энергии и требует увеличения пропускной способности ее элементов.

В электрических сетях предприятия с современным оборудованием вентильные преобразователи находят все более широкое применение, удельный вес нелинейных нагрузок непрерывно возрастает. В этих условиях уровень высших гармоник в кривых напряжения сети нередко достигает 10–15%.

Несинусоидальность напряжения и тока приводит к дополнительным потерям и нагреву, ускоренному старению изоляции электродвигателей, трансформаторов и отрицательно сказывается на функционировании различных видов электрооборудования. Специфическое воздействие на различные виды электрооборудования, системы релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи проявляется дифференцированно и зависит от амплитудного спектра напряжения (тока), параметров электрических сетей и других факторов. В общем случае отсутствует зависимость между энергией гармонической помехи и степенью ее воздействия на электрическую сеть. Это обстоятельство обусловило широкое применение показателя, характеризующего искажение кривой напряжения сети на зажимах электроприемников, называемого коэффициентом несинусоидальности напряжения, %:

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^l U_n^2}}{U_{\text{н}}} 100, \quad (6)$$

где U_n и $U_{\text{н}}$ – напряжение n -й гармоники и номинальное напряжение сети.

Согласно ГОСТ 13109-87 допустимое значение $k_{\text{нс}}$ ограничивается 5% с интегральной вероятностью 95% за время измерений, указанное в стандарте. В стандарте не указываются допустимые значения $k_{\text{нс}}$, значения отдельных гармоник напряжения и тока в узлах сети; нет также указаний относительно характера частотной характеристики сети.

Последнее обстоятельство послужило

причиной ограничений несинусоидальности напряжения на более высоких ступенях напряжения, содержащихся в стандартах некоторых стран. Так, в Швеции для сетей 0,25...0,43 кВ допустимые значения $k_{нс}$ соответствуют 4%, для сетей 3,3...24 кВ – 3%, 36...72 кВ – 2%, выше 84 кВ – 1%. В Японии для сетей 11...66 кВ и более – соответственно 2 и 1%. В Европейском стандарте EN 50.006 допустимые значения гармоник напряжения задаются на зажимах эталонных сопротивлений, что равносильно нормированию гармоник тока.

Кардинальным решением проблемы является использование активного фильтра вместо неуправляемого выпрямителя в силовой схеме преобразователя частоты, выполненного на силовых транзисторах IGBT. Такой вариант наиболее предпочтителен в плане реализации энергосберегающих систем электропривода, так как позволяет обеспечить двухсторонний обмен энергией с питающей сетью, практически синусоидальный ток, потребляемый из сети (за счет реализации режима ШИМ) и регулировать в широких пределах коэффициент мощности по входу преобразователя частоты.

Седьмой путь – экономия электроэнергии рабочими установками и механизмами за счет повышения эффективности технологического процесса. Он включает следующие основные мероприятия:

- ♦ согласование режимов работы установки при изменении нагрузки;
- ♦ повышение КПД установки;
- ♦ регулирование производительности установки;
- ♦ выполнение оптимальной циклограммы и упорядочение графика нагрузок;
- ♦ обеспечение нормированной загрузки (для подъемных машин, конвейеров и т.д.);
- ♦ контроль состояния технологической установки;
- ♦ применение совершенных видов электропривода;
- ♦ организационные мероприятия.

Принцип экономии электроэнергии с помощью регулируемого электропривода основывается на том, что в тяго-дутьевых и насосных системах потребление мощности пропорционально третьей степени скорости вращения лопастей насоса или вентилятора. Уравнение подобия для метода переменной скорости:

$$P_1/P_2 = (Q_2/Q_1)^3, \quad (7)$$

где P_1 – максимальная подводимая мощность, соответствующая максимальной производительности системы Q_1 ;

P_2 – мощность, необходимая для обеспечения производительности Q_2 .

В случае использования управляемого привода при снижении расхода до 80% требуемая мощность составит 51,2%, а при снижении до 60% – всего 21,6% от номинальной мощности (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость мощности электропривода от производительности установок с вентиляторным моментом сопротивления

Производительность Q_2 , %	80	60	40
Требуемая мощность P_2 , %	51,2	21,6	6,4

Регулируемый электропривод обеспечивает экономию электроэнергии до 30–45%. Однако на первое место выходит экономия от ресурсосбережения и от оптимизации технологических процессов. Уменьшение пусковых токов двигателей, гидравлических и механических ударов в нагрузке и, как следствие, уменьшение затрат на ремонт двигателей и оборудования приносит значительный экономический эффект. Исходя из общемировой практики, эта величина составляет 50–200 % от эффективности экономии электроэнергии.

Выводы

В настоящее время особое значение приобретают вопросы разработки и широкого внедрения методов и способов управления энергоэффективностью (энергосбережением) средствами промышленного электропривода, т.к. с одной стороны, стала острой проблема экономии электроэнергии и, с другой, появилась реальная возможность ее эффективного решения применительно к главному ее потребителю – электроприводу.

Литература

1. Закладной А.Н., Праховник А.В., Соловей А.И. Энергосбережение средствами промышленного электропривода. – К.: Дія, 2001. – 343 с.
2. Луговой А.В. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода// Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 62–67.