

УДК 621.313

Шеремет А. И., Климченкова Н. В., Климченков А. Г.

ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПУТИ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

По прогнозам Международного энергетического агентства потребление электроэнергии в мире возрастет на 47 % к 2035 году, значительная доля которого приходится на электропривод различных производственных механизмов. В связи с этим становится важным улучшение их энергетических показателей и качества пусковых и тормозных режимов работы [1, 2].

Современный электропривод обслуживает очень разные технологические процессы и механизмы, отличающиеся по характеру движения, экономичности, назначению, мощности, точности движения, условиям окружающей среды и др.

В простейшем нерегулируемом асинхронном электроприводе, самом массовом и потому энергоемком, часто превышена установленная мощность электродвигателей. Так, эксперты ЕС считают, что средний коэффициент использования двигателей (отношение средней мощности за цикл к номинальной) составляет 0,6. В Украине он часто опускается до 0,4. При таких недогрузках преобразование энергии двигателем происходит с повышенными удельными потерями [1, 3].

Современные системы управления электроприводом позволяют организовать регулирование выходных координат привода в широком диапазоне, с высокой точностью и быстродействием. Однако далеко не каждая система управления обеспечивает работу электропривода с максимальной энергетической эффективностью. Выделяют два основных подхода в рассмотрении современных методов энергосбережения в электроприводах [2].

Первый подход связан с модификацией структуры электропривода (предполагает совершенствование преобразователя и асинхронного двигателя с учетом возможностей вычислительной техники), второй – с применением энергоэффективных стратегий управления, основанных на минимизации потерь при электромеханическом преобразовании (выбор рационального способа управления электроприводом) [2].

Среди регулируемых электроприводов доминирующее положение занимают частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. Значения конструктивных, режимных параметров и законов управления устанавливают эксплуатационные, энергетические и динамические характеристики асинхронного электропривода, которые в свою очередь определяют эффективность функционирования технологического оборудования.

Целью работы является рассмотрение возможностей энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов. При этом следует также оценить пути реализации энергосбережения.

Рассмотрим реализацию первого подхода в энергосбережении.

Благоприятные значения энергетических и массогабаритных показателей электропривода могут быть получены лишь после отказа от применения серийных электродвигателей, рассчитанных на работу от сети с нерегулируемой частотой, и выполнения ряда мероприятий, которые оказываются возможными при работе электродвигателей от современных преобразователей частоты.

Прежде всего, это – отказ от глубоких пазов на роторе у асинхронного двигателя, так как электродвигатель в схеме частотного регулирования не подвергается прямому пуску от промышленной сети. Далее, применение новых схем обмоток на статоре (с улучшенным гармоническим составом МДС и пониженным дифференциальным рассеянием). И наконец, снижение до разумного предела числа пар полюсов. Это приведет к снижению пазового рассеяния в роторе, а значит, к повышению $\cos\varphi$ электродвигателя, утолщению спинки ротора (из-за чего снижается степень ее насыщения). При этом уже нет необходимости выполнять электродвигатель с повышенным скольжением, а это повышает его КПД.

В настоящее время специальные асинхронные двигатели для регулируемого электропривода практически не разрабатываются. Их особенность в том, что у двигателей изменяются длина сердечника статора, число витков в фазе обмотки статора и диаметр провода.

Практика создания энергоэффективных асинхронных двигателей показала, что у двигателя АИР112М2 мощностью 7,5 кВт при изменении длины сердечника на 160 % наблюдается повышение КПД на 110–125 %. Экономия электроэнергии составила от 15–25 %.

Потери энергии могут быть заметно снижены за счет применения двигателей с меньшими значениями моментов инерции ротора при одновременном увеличении его длины. Это характерно для двигателей крановых серий, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме, с большим числом включений в час. Мощность при этом остается неизменной.

Для реализации всех предложенных изменений в конструкции двигателя необходима оптимизация зависимостей КПД от изменения длины сердечника, числа витков в фазе и диаметра используемого провода.

Выбором рационального способа управления также можно добиться экономии электроэнергии. В асинхронных электроприводах целесообразно рассмотреть два случая.

В первом, более простом случае рабочий механизм не требует обязательного регулирования скорости, но момент статической нагрузки может изменяться от полного (номинального) значения и до нуля. Такой режим характерен, например, для некоторых прессов на машиностроительных заводах, испытательных стендов. Тогда с целью улучшения энергетических показателей электропривода между питающей сетью и статорной обмоткой двигателя включается тиристорный преобразователь напряжения, который автоматически изменяет напряжение на двигателе в функции его нагрузки. В ряде случаев бывает полезно перейти от повторно-кратковременного режима работы перемежающемуся, если это допустимо технологически.

Во втором случае рабочий механизм требует регулирования скорости, а момент статической нагрузки изменяется.

Применение в двухзвенном преобразователе частоты управляемого выпрямителя в сочетании с автономным инвертором тока (АИТ) позволяет реализовать работу электропривода во всех возможных режимах с рекуперацией в сеть энергии торможения. Кроме того, процесс регулирования напряжения на статоре двигателя при изменении момента нагрузки осуществляется выпрямителем, а инвертор формирует только форму напряжения, что приводит к увеличению срока службы изоляции статорной обмотки при питании двигателя прямоугольными импульсами. Это важно не только для электроприводов с АИТ, но и АИН.

Система управления таким электроприводом выполнена на программируемом контроллере, с помощью которого осуществляется управление преобразователем частоты и электроприводом в целом.

Реализация желаемой структуры системы управления и настройка параметров регуляторов производится программным путем. Управление электроприводом чаще осуществляется от встроенного пульта управления, который позволяет не только подавать команды на пуск и остановку электропривода, но и производить простейшую настройку электропривода (например, изменять темп разгона) и отражать на дисплее заданные и текущие значения регулируемых переменных.

Большое значение имеет рациональный выбор пускорегулирующей аппаратуры. Применение тиристорных пускорегулирующих устройств обеспечивает наиболее экономичное протекание процессов пуска и регулирования двигателя, но стоимость этих устройств пока еще остается достаточно высокой. Поэтому при решении вопроса целесообразности применения тиристорных устройств, следует обратиться к графику работы проектируемого электропривода. Если электропривод не подвержен значительным регулировкам частоты вращения, частым пускам, реверсам и т. п., то повышенные затраты на тиристорное оборудование могут оказаться неоправданными, а расходы, связанные с потерями энергии, – незначительными.

И наоборот, как у крановых электроприводов, применение электронных пускорегулирующих устройств становится целесообразным. К тому же следует иметь в виду, что эти устройства практически не нуждаются в уходе и их технико-экономические показатели, включая надежность, достаточно высоки. Необходимо, чтобы решение по применению дорогостоящих устройств электропривода подтверждалось технико-экономическими расчетами.

Все выше сказанное полностью относится к асинхронным крановым электроприводам механизма подъема грузоподъемных кранов. К ним предъявляется ряд основных требований: плавный пуск и торможение при подъеме и опускании груза, обеспечение перехода на пониженную скорость при сохранении удерживающего момента и снижения ударных нагрузок, увеличение срока службы узлов электропривода.

При частотном регулировании изменяем с помощью преобразователя частоту на входе двигателя, что приводит к регулированию частоты вращения ротора асинхронного двигателя. В режиме энергосбережения преобразователь автоматически отслеживает потребление тока, рассчитывает нагрузку и изменяет выходное напряжение. Зависимость изменения напряжения от частоты определяется характером изменения нагрузки на валу электрического двигателя. Момент, развиваемый двигателем при этом, определяется следующей зависимостью:

$$M = k \cdot \left(\frac{U}{f} \right)^2, \quad (1)$$

где k – постоянный коэффициент, зависящий от параметров обмоток двигателя.

Суть энергосбережения состоит в том, чтобы изменять соотношение подаваемых на двигатель напряжения и частоту питания, при котором двигатель потреблял бы в данный момент мощность, точно соответствующую требуемой мощности на нагрузке. Изменение мощности, возможно, произвести вручную с пульта управления преобразователя или автоматически с помощью обратной связи от датчиков. Наличие встроенных регуляторов для датчиков, панелей управления с индикацией технологического параметра, встроенной температурной защиты, защиты от перенапряжений и максимальных токов, функции безопасного останова делает подключение преобразователей к существующим системам привода доступной для более или менее квалифицированного персонала. Экономия электроэнергии в крановых электроприводах может достигать 65 %.

Схемы современных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов весьма разнообразны, однако в конечном итоге преобладают два варианта формирования электромагнитного момента двигателя.

В первом случае поддерживают постоянство магнитного потока двигателя (пример тому – общеизвестный закон регулирования $\frac{U}{f} = const$). Этот способ наиболее удобен в случаях, когда величина момента статической нагрузки изменяется мало при регулировании скорости электропривода.

Во втором случае в регулируемом электроприводе поддерживают режим постоянной величины скольжения, что гарантирует минимум потерь в электроприводе, когда момент статической нагрузки на валу рабочего механизма изменяется в большом диапазоне. Эффект здесь достигается за счет того, что при малых моментах нагрузки снижают магнитный поток в асинхронном двигателе, что приводит к уменьшению потерь в стали и снижению тока намагничивания.

В асинхронных электроприводах с векторным управлением оптимальные режимы предлагается выполнять, воздействуя на форму моментного треугольника в электромашине, применяя методы экстремального управления асинхронным двигателем, реализуя новейшие подходы синтеза нелинейных систем с раздельным управлением. Раздельное управление напряжением с помощью выпрямителя и формирование формы напряжения позволит существенно улучшить электромагнитную совместимость системы «управляемый выпрямитель – преобразователь частоты – асинхронный двигатель».

Таким образом, получаем следующее.

Для уменьшения потерь при пуске необходим управляемый источник напряжения. Наличие неуправляемого выпрямителя сильно искажает форму потребляемого тока, что приводит к отрицательному влиянию преобразователей на сеть и окружающую среду. В статорной цепи применяется стандартный ПЧ с конденсатором в звене постоянного тока, поэтому рассмотрим закон управления с распределением составляющих намагничивающих токов между статором и ротором. За основу примем закон минимизации электрических потерь в обмотках статора и ротора:

$$P_m = \Delta P_{1m} + \Delta P_{2m} = 3I_1^2 \cdot R_1 + 3I_2^2 \cdot R_2. \quad (2)$$

Токи статора и ротора выражаются через проекции на оси $x - y$, где ось x направлена по вектору главного магнитного потока. Подставляя значения этих токов в уравнения потерь и с учетом намагничивающего тока, получим минимум электрических потерь:

$$I_{1X} = I_M \cdot \frac{R_2'}{R_1 + R_2'};$$

$$I_{2X} = I_M \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2'}.$$

Таким образом, при линейном изменении напряжения на обмотке статора также линейно изменяется и скорость холостого хода двигателя. Пренебрегаем при этом электромагнитной постоянной двигателя.

Тогда при $t \leq t_{\Pi}$ скорость и момент изменяются в соответствии с выражением:

$$\omega(t) = \varepsilon_n t - T_M \varepsilon_{\Pi} (1 - e^{-t/T_M}). \quad (3)$$

$$M = J \varepsilon_{\Pi} (1 - e^{-t/T_M}). \quad (4)$$

При $t \geq t_{\Pi}$:

$$\omega(t) = \omega_{0\Pi} - (\omega_{0\Pi} - \omega_{\Pi}) \cdot e^{-t/T_M}. \quad (5)$$

$$M = M_{\Pi} \cdot e^{-t/T_M}. \quad (6)$$

где ε_{Π} – ускорение, с которым меняется напряжение; ω_{Π} , M_{Π} – скорость и момент при $t = t_{\Pi}$, т. е. в конце первого этапа подъема(опускания). Отсчет времени на втором этапе пуска необходимо вести от t_{Π} , тогда потери энергии:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\Pi}} M(t) \cdot (\omega_0 - \omega) dt. \quad (7)$$

Если обозначить, что

$$\omega_0 - \omega = T_M \varepsilon_{\Pi}; \quad M = J d\omega / dt = J \cdot \varepsilon_n; \quad \varepsilon_n t_n \approx \omega_{0ном}.$$

Получим

$$\Delta W = T_M \cdot J \cdot \omega^2 / t_{\Pi\Pi}. \quad (8)$$

С учетом (1) можно отметить, что за счет медленного наращивания напряжения на двигателе можно существенно сократить потери на пуске.

В частотно-управляемом приводе с асинхронным двигателем потери определим при помощи уравнений:

$$M = \varphi(\beta, \alpha); \quad M = M_c + J d\omega / dt; \quad (9)$$

$$\omega = \omega_{1ном}(\alpha - \beta); \quad \alpha = \Psi(t),$$

где $\alpha = f_1 / f_{1ном}$ – относительная частота напряжения статора; ω изменяется по закону (3) или (5); $\beta = \Delta \omega / \Delta \omega_{1ном} = f_2 / f_{1ном}$ – абсолютное скольжение или относительная частота ротора.

Для линейного изменения частоты во времени параметр абсолютного скольжения можно определить по формуле:

$$\beta = (M_c + J \cdot \varepsilon) / k\beta \times (1 - e^{-t/T_M}) + \beta_c \cdot e^{-t/T_M}, \quad (10)$$

где $T_M = J \cdot \omega_{ном} \cdot s_{ном} / M_{ном}$; $\beta_c = M_c / k\beta$.

Потери энергии при пуске:

$$\Delta W = \int_0^{t_{н.н}} M_{ном} \cdot \beta \cdot (1 + R_1 / R_2') dt. \quad (11)$$

Используя зависимость $\beta = f(t)$ – (10), можно определить потери для асинхронного электропривода. Аналогично могут быть найдены потери при торможении.

Все выше сказанное полностью относится к асинхронным крановым электроприводам механизма подъема грузоподъемных кранов. К ним предъявляется ряд основных требований: плавный пуск и торможение при подъеме и опускании груза, обеспечение перехода на пониженную скорость при сохранении удерживающего момента и снижения ударных нагрузок, увеличение срока службы узлов электропривода.

Сложившаяся практика использования частотного электропривода основывается на том, что в электроприводах с преобразователями частоты как отечественных, так и зарубежных производителей используют модули рекуперации, которые заменяют тормозные сопротивления в приводах с длительной работой в генераторном режиме или большой тормозной мощностью: подъемные и инерционные механизмы. В этом случае энергия, рассеиваемая в тепло на тормозных резисторах, возвращается в питающую сеть.

ВЫВОДЫ

Анализ рассмотренных способов энергосбережения в асинхронных электроприводах позволяет назвать два основных способа снижения потерь энергии в переходных режимах: уменьшение суммарного момента инерции электропривода; регулирование в переходном процессе скорости идеального холостого хода, т. е. использование управляемых переходных процессов. Особенно эти способы эффективны для электроприводов с частыми пусками и торможениями – такими, как крановые механизмы и другие. Потери мощности при торможении противовключением в 3 раза превышают потери при пуске и динамическом торможении и численно равны тройному запасу кинетической энергии. При реверсе потери равны сумме потерь при торможении противовключением и пуске. Чем меньше сопротивление статорной цепи и больше роторной, тем меньше потери в статоре асинхронного двигателя. Уменьшение потерь в статоре с ростом сопротивления ротора объясняется уменьшением пускового тока.

Повышение энергетической эффективности может быть достигнуто при использовании регулируемых электроприводов для управления технологическими процессами в сочетании с возможностями автоматизации. Для чего необходима разработка алгоритма управления работой электропривода (программного обеспечения), который позволит улучшить его регулировочные и эксплуатационные характеристики, обеспечить работу частотного электропривода в динамике и статике в соответствии с указанными в паспортных данных нагрузками на валу двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ABB Drives and Motors for Improving Efficiency*. – ABB brochure, 2012. – 16 p.
2. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. И. Шиматов, В. Н. Поляков. – М.: АСАДЕМА, 2009. – 202 с.
3. Ильинский Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко – М.: Высш.школа, 2008. – 208 с.

Статья поступила в редакцию 12.05.2015 г.