

УДК 621.3:62-83

К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Сапсалева А.В., Брованов С.В., Харитонов А.С.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск,
e-mail: av@sapsalev.ru, brovanov@corp.nstu.ru, andrekh@yandex.ru

В статье отражены вопросы, обуславливающие необходимость разработки энергосберегающих преобразователей энергии и их внедрения в промышленные производства и технологические процессы. Отмечены проблемы, которые обуславливают необходимость перехода к энергосберегающим технологиям. Отмечается, что электродвигатели, как первичные потребители энергии в структуре электропривода, являются в данной системе основными «виновниками» выделения в атмосферу углекислого и других газов, приводящих к парниковому эффекту. Поэтому вопросы энергетического КПД электродвигателей и приводов приобретают все большее значение. Показана важность энергетического КПД электродвигателей и отмечены возможные пути и способы его увеличения. Для электрических приводов, применяемых в устройствах возобновляемой или регенеративной энергии, характерны крайне низкие частоты вращения. Поэтому для снижения удельных массогабаритных показателей и увеличения КПД электрических машин перспективно применение бесконтактных преобразователей механической энергии на основе магнитных редукторов и вариаторов. В этих устройствах, в силу бесконтактной передачи энергии за счет магнитной связи механических валов двигателя и нагрузки, устраняются характерные недостатки для зубчатых аналогов. В системах электропривода при дальнейшем росте цен на нефть, газ и другие энергоносители, высокотехнологичные ферромагнитные и электропроводящие конструкционные материалы двигателя будут играть все большую роль. Внедрение высокотехнологичных электрических машин будет способствовать созданию мехатронных систем с малыми внутренними потерями, что положительно скажется на решении вопросов снижения энергопотребления.

Ключевые слова: электрические машины, электропривод, энергосбережение, массогабаритные показатели, мощность, КПД

TO THE QUESTION OF ENERGY SAVING IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

Sapsalev A.V., Brovanov S.V., Kharitonov A.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk,
e-mail: av@sapsalev.ru, brovanov@corp.nstu.ru, andrekh@yandex.ru

Abstract: The article reflects the issues that necessitate the development of energy-saving energy converters and their implementation in industrial production and technological processes. The problems that necessitate the transition to energy-saving technologies are noted. It is noted that electric motors, as primary consumers of energy in the structure of an electric drive, are the main “culprits” in this system for the release of carbon dioxide and other gases into the atmosphere, leading to the greenhouse effect. Therefore, the issues of energy efficiency of electric motors and drives are becoming increasingly important. The importance of the energy efficiency of electric motors is shown and possible ways and means of its increase are noted. Electric drives used in renewable or regenerative energy devices are characterized by extremely low rotational speeds. Therefore, to reduce the specific weight and dimensions and increase the efficiency of electrical machines, it is promising to use contactless converters of mechanical energy based on magnetic gearboxes and variators. In these devices, due to the contactless transmission of energy due to the magnetic connection of the mechanical shafts of the engine and the load, the characteristic disadvantages of their gear counterparts are eliminated. In electric drive systems, with the further rise in prices for oil, gas and other energy carriers, high-tech ferromagnetic and electrically conductive structural materials of the engine will play an increasing role. The introduction of high-tech electrical machines will contribute to the creation of mechatronic systems with low internal losses, which will have a positive effect on solving issues of reducing energy consumption.

Keywords: electrical machines, electric drive, energy saving, weight and dimensions, power, efficiency

Неуклонный рост цен на энергоносители ставит задачу энергосбережения одной из приоритетных перед экономиками практически всех стран. Последний энергетический кризис в странах Европы и Азии показывает, что инвестиции в энергетику должны носить серьезный и долгосрочный характер. Истощение природных запасов энергоресурсов, включая газ, нефть и уголь, приводит к росту цен на топливо. А зависимость генерации и потребления

энергии от климатических условий приводят к нестабильности поставок природных энергоносителей. Нестабильность поставок и предполагаемые ограничения в будущем требуют пересмотра отношений как к потреблению энергии, так и к вопросам энергосбережения в процессе потребления энергии. Во многих европейских странах разработаны и приняты меры стимулирующего характера предприятий за разработку и внедрение энергосберегающих на-

правлений (технических, экономических, нормативных, информационных и др.), как при производстве, так и при потреблении электрической энергии. Периодически происходящие на территории России техногенные экологические катастрофы и аварии на предприятиях, добывающих энергоресурсы, говорят о недостаточном внимании к вопросам экологии и техники безопасности как со стороны бизнеса, так и со стороны правительства России. Поэтому настоятельно требуются совместные усилия бизнеса и государственных структур для создания экономических условий, позволяющих приступить к масштабной политике энергосбережения во всех сферах деятельности, направленных на жизнеобеспечение общества. Вопросы энергосбережения, обусловленные ростом стоимости и нестабильностью производства электроэнергии, непосредственно относятся и к мехатронным системам, как одному из основных типов ее потребителей.

Проблемы

Можно отметить две основные проблемы, которые обуславливают необходимость перехода к энергосберегающим преобразователям энергии и энергосберегающим технологиям:

1. Ограниченность материальных ресурсов, традиционно используемых в процессе производства электрической энергии, таких как газ, уголь, нефть и водяной (гидроэлектростанции) напор.

2. Второй аспект связан с взаимодействием человека и природы. Деятельность человеческого сообщества весьма негативно влияет на состояние среды его обитания. В первую очередь негативные факторы вносит неконтролируемая техногенная деятельность предприятий, направленная на получение максимальной прибыли любой ценой. Взаимодействие человеческого общества и природы связано [1–3]: с выбросами загрязняющих веществ в атмосферу; со сбросом загрязненных вод в реки и водоемы; с загрязнением почвы твердыми отходами; с энергетическими загрязнениями биосферы. Большую проблему с точки зрения экологии играют вопросы, связанные с утилизацией бытовых и промышленных отходов.

Некоторые направления решения указанных проблем

Энергосберегающие мероприятия, которые приводят к сокращению вредных выбросов, зависят от эффективности мер в трех направлениях: производство, передача и потребление энергии. Известно, что к числу основных потребителей электрической энергии относятся электрические машины.

Электропривод, применяемый в технологических процессах, потребляет до 63 % всей электроэнергии, используемой промышленностью США [4], и не менее 60 % в России [5] и других промышленно развитых странах. В [6] отмечается, что суммарный КПД производства, передачи и распределения электроэнергии в среднем равен 33 %, следовательно, каждый киловатт-час, сэкономленный в структуре мехатронных систем, экономит до трех киловатт-часов первичной энергии. Отсюда нетрудно сделать вывод, что электродвигатели, как первичные потребители энергии в структуре электропривода, являются в данной системе основными «виновниками» **ВЫДЕЛЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И ОБРАЗОВАНИЯ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА** [1].

В условиях непрерывного роста стоимости электроэнергии и стремления к сокращению вредных выбросов в атмосферу, диктуемого Киотским протоколом, все большее значение приобретают вопросы энергетического КПД электродвигателей и приводов. Рынок требует эксплуатационной гибкости. Поскольку ветровые и солнечные установки по своей природе не способны на стабильное непрерывное генерирование электрической энергии, в их составе требуется применение высокоэффективных регулируемых электрических двигателей. Поэтому двигатели в сочетании с регулируемым электроприводом являются ключевыми элементами современной энергетики. В связи с этим, в условиях неопределенности цен и доступности электроэнергии, возрастает конкурентная борьба компаний, являющихся поставщиками промышленных электродвигателей.

В области электропривода можно выделить три основных направления энергосберегающих мероприятий: 1 – разработка энергосберегающих электромеханических преобразователей – двигателей; 2 – вопросы, связанные с оптимальным использованием электрических машин в структуре электропривода; 3 – вопросы, связанные с аккумуляцией энергии в подвижных частях привода с целью ее рекуперации или повторного использования в следующих циклах работы.

Третье направление может оказаться наиболее эффективным в электроприводах транспортного назначения при относительно больших массах перемещаемой нагрузки по сравнению с силами статического сопротивления движению. Рекуперация электрической энергии легко решается при использовании машин постоянного тока и дает достаточно большой эффект в мощных приводах с преобладающей инерционной нагрузкой.

Способы повышения энергетического КПД электромеханических преобразователей

В связи с указанными ранее проблемами разработка высокоэффективных двигателей с повышенным КПД вырастает в одну из самых актуальных задач. Повысить энергоэффективность электрических двигателей на 5 и более процентов можно за счет следующих факторов [4, 6]:

1. Уменьшение в структуре мехатронных систем электромагнитных нагрузок двигателя.

Вектор решения данного вопроса имеет два направления. Первый связан с оптимизацией потребляемой нагрузки, второй достигается за счет оптимизации активных материалов двигателя путем повышения диаметра обмоточных проводов и сечения магнитопровода. Это позволяет уменьшить потери, как в стали, так и в меди двигателя, а следовательно, температуру нагрева двигателя.

2. Повышение площади сечения магнитопровода не самый оптимальный вариант, поэтому здесь следует рассмотреть варианты использования для материала сердечника более тонкой и высококачественной электротехнической стали.

3. Эффективное, но более дорогое решение повышения энергоэффективности электрических двигателей, достигается применением медных литых обмоток короткозамкнутых роторов, вместо алюминевых.

4. За счет конструктивных решений, позволяющих уменьшить воздушный зазор между ротором и статором.

5. Уменьшение потерь на создание основного магнитного потока, что в синхронных двигателях и двигателях постоянного тока реализуется использованием магнитно-электрического возбуждения.

6. Использование в конструкциях электрических машин термостабильных высокоэнергетических магнитов, способствующих реализации более высоких удельных характеристик.

7. Сокращение вентиляционных потерь.

Естественно, что одновременное выполнение всех этих условий приводит к увеличению стоимости и габаритных размеров электрической машины. Но стремление увеличить КПД двигателя в большинстве случаев оправдывается.

Когда двигатель работает ежедневно практически в непрерывном режиме более 8 часов в день, даже незначительное повышение его КПД может позволить ощутимо сократить потребление электроэнергии.

Если нагрузка двигателя, работающего в длительном режиме, менее 80% его номинальной мощности, то однозначно тре-

буется либо замена двигателя, либо переход к регулируемому электроприводу. При этом следует учитывать, что при дальнейшем росте цен на энергоносители, сталь и электропроводящие материалы двигателя будут играть все большую роль.

Бурный прогресс в области силовой электроники привел к существенному снижению цен на полупроводниковые преобразователи, стоимость которых практически сравнялась со стоимостью электромеханических преобразователей. Очевидны тенденции к дальнейшему сокращению стоимости полупроводниковых преобразователей. Поэтому при проектировании мехатронных систем воспроизведения различных движений, ограничения по габаритам, массе и уровню электрических потерь в качестве приоритетной выдвигают задачу выбора исполнительного двигателя:

1. Применение специальных машин для систем частотного регулирования снижает на ступень стоимость привода. Для работы при пониженных частотах следует стремиться к снижению активного сопротивления ротора. На повышенных частотах требуется минимизация индуктивных сопротивлений как ротора, так и статора [6].

2. На сегодняшний день известно, что в диапазоне частот вращения входного вала редуктора от 2000 до 6000 об/мин, наибольший удельный момент и самые высокие энергетические показатели можно получить, используя синхронные двигатели с постоянными магнитами на роторе [7].

3. Для нагрузки мощностью от 0,4 до 1,5 мегаватт при частотном регулировании достаточно часто используются высоковольтные двигатели. Западные фирмы в большинстве случаев перекрывают данный диапазон мощностей за счет низковольтных двигателей. Замена высоковольтных приводов на привод с пониженным напряжением позволяет в 1,5–2 раза снизить их стоимость [6].

4. Конструкция ротора специальных двигателей должна соответствовать конкретному виду регулирования [6].

Для электрических машин, применяемых в электрических приводах возобновляемой или регенеративной энергии (зеленая энергия), характерны крайне низкие частоты вращения. В то же время, когда нагрузка требует низких частот вращения, соединение вала электрической машины с исполнительным механизмом без использования редуктора становится практически невозможным. Применение в этих случаях прямого привода не только экономически невыгодно, но и приводит к существенному возрастанию массогабаритных харак-

теристик и снижению КПД электрических машин. Для улучшения этих характеристик двигателей требуется увеличение их скорости вращения, что ведёт к необходимости использования редукторов в качестве согласующих устройств между двигателем и нагрузкой.

Классические трансмиссии (механические редукторы) практически исчерпали свои возможности и не в полной мере отвечают все возрастающим требованиям к мехатронным системам преобразования и распределения энергии. Для механических передач с зубчатым зацеплением характерны такие известные недостатки, как вносимые в систему электропривода нелинейности, люфты, вибрации и акустические шумы. При значительных величинах передаваемого момента возникают дополнительные проблемы, связанные со сложностью обслуживания, необходимостью постоянного контроля температуры и наличия масла. Ограниченные возможности по дальнейшему росту плотности передаваемого момента снижают перспективы их применения в современных мехатронных системах генерации, преобразования, передачи и распределения энергии.

Отмеченные недостатки зубчатых передач позволяют в значительной мере устранить магнитные передачи: магнитные муфты, редукторы и вариаторы [8, 9]. В этих устройствах момент передаётся посредством силового взаимодействия магнитных полей. Это делает возможным бесконтактное преобразование скорости и момента, благодаря чему магнитные передачи сокращают характерные для их зубчатых аналогов недостатки [8, 9].

Высокие удельные характеристики магнитных передач на основе высокоэнергетических магнитов с большой коэрцитивной силой позволяют им конкурировать по массогабаритным показателям с механическими редукторами. Далеко не последним аргументом в пользу концепции магнитных передач является практическая исчерпанность свойств механических передач по повышению качественных и количественных характеристик мехатронных систем. В то же время копилка электромагнитных систем непрерывно пополняется передовыми и в том числе прорывными технологиями. Это высокоэнергетические постоянные магниты, «аморфное» железо, силовая высоковольтная электроника, микропроцессорное управление, высокотемпературные силовые полупроводниковые устройства, позволяющие упростить конструкцию электронных преобразователей за счет отказа от интенсивного охлаждения.

Почему важен энергетический КПД электрических машин

Для ответа на этот вопрос следует сравнить первоначальные затраты на приобретение электрической машины и эксплуатационные затраты, связанные с техническим обслуживанием и стоимостью потребляемой электроэнергии.

Рост стоимости электроэнергии выдвигает в качестве приоритетной проблему энергетического КПД электродвигателей и приводов. Для большинства электрических машин их стоимость составляет менее двух процентов от всех затрат, связанных с эксплуатацией двигателя за весь срок его службы.

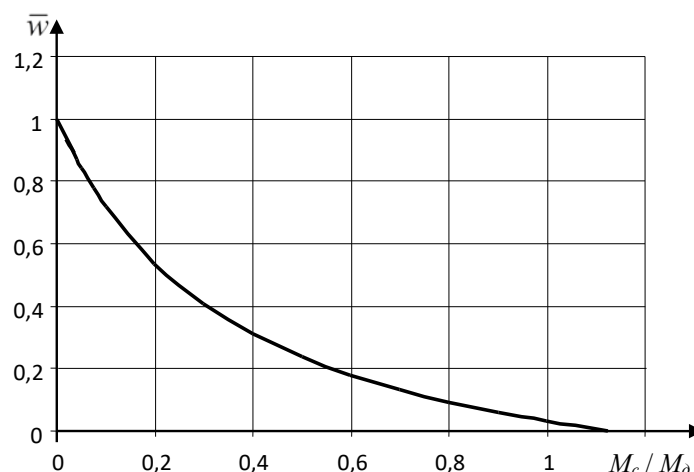
Согласно отчету министерства экономики США системы электропривода потребляют 679 млрд киловатт-часов электроэнергии. В отчете отмечается, что за счет повышения КПД и улучшения использования электрических машин можно снизить потребление электроэнергии промышленными электродвигателями на 18%.

Поэтому не удивительно, что еще в 1992 г. в США Закон о политике в области энергетики (ЕРАСТ) установил стандарты на минимальный уровень КПД промышленных электродвигателей, которые начали выпускаться после октября 1997 г. Аналогичные стандарты приняли Канада и Германия.

Другим не менее важным фактором является то обстоятельство, что автомобили, оснащенные бензиновыми и дизельными двигателями, являются едва ли не главным прямым источником выброса вредных веществ в атмосферу. В связи с этим возрастают инвестиции в разработки электромобилей. Для снижения зависимости от нефтепродуктов и улучшения экологической обстановки, особенно в крупных городах, правительства многих стран заявили, что откажутся от продаж автомобилей, использующих в качестве топлива нефтепродукты. Тенденции, направленные на развитие электротранспорта, в том числе и электромобилей, потребуют дополнительных усилий и инвестиций в производство тяговых электродвигателей с улучшенными энергетическими показателями.

Некоторые вопросы энергосбережения в приводах с преобладающей инерционной нагрузкой

Городской и железнодорожный электрический транспорт занимают одно из первых мест по объему потребления электрической энергии. Поэтому в этой сфере требуется серьезный подход к энергосберегающим мероприятиям, направленным как на совершенствование тяговых двигателей, так и на разработку оптимальных законов управления, обеспечивающих сокращение потребления электрической энергии.



Относительное значение некомпенсированной энергии

Нагрузка транспортных электроприводов носит, как правило, инерционный характер и основное потребление электрической энергии связано с переходными процессами разгона и торможения. Энергия, накопленная в подвижных массах привода, может быть возвращена в сеть путем рекуперации.

В [5] приведена оценка предельного значения энергии, которая накапливается в подвижных массах привода в цикле движения и может быть рекуперирована в сеть. На рисунке приведен график относительного значения энергии, накапливаемой в подвижных массах:

$$\bar{w} = f(M_c / M_o).$$

Здесь M_c и M_o – соответственно статический и динамический моменты сопротивления движению.

При отношениях $M_c / M_o > 0,55$ рекуперация энергии фактически не дает положительных результатов, так как даже в теоретически идеализированном варианте доля возвращаемой энергии не будет превышать 20%. Потери в преобразователях, усложнение и удорожание конструкции привода практически сведут возможный выигрыш к нулю.

В некоторых случаях эффективное решение вопросов энергосбережения возможно с использованием промежуточных накопителей для аккумуляции энергии. Возможны варианты механических, магнитоэлектрических и электроаккумулирующих накопителей энергии. Свойства и принцип действия электроаккумулирующих накопителей во многом соответствуют характеристикам приводов с рекуперацией электрической энергии. Магнитоэлектрические

накопители энергии требуют достаточно больших материальных затрат и наиболее перспективны в маломощных приводах различных автоматических устройств.

Применение маховиковых накопителей наиболее выгодно в союзе с двигателями транспортных пассажирских и грузовых машин, а также с электростанциями. Не менее перспективным для некоторых видов транспорта может оказаться и применение гравитационных накопителей, реализуемых за счет соответствующего формирования трассы перемещения.

Выводы

Сложившаяся тревожная экологическая обстановка и неуклонный рост цен на энергоносители настоятельно требуют:

1. Нового подхода к принципам выбора электродвигателей для электроприводов промышленных и технологических установок.

2. Нового подхода к конструктивному исполнению и энергетическим характеристикам исполнительных электромеханических преобразователей.

3. Все более остро встает вопрос замены устаревшего парка электрических машин большинства действующих в России промышленных, технологических и сельскохозяйственных предприятий.

4. Использования рекуперации и накопителей энергии, что позволяет существенно повысить эффективность электроприводов с преобладающей инерционной нагрузкой и уменьшить материальные и энергетические затраты для воспроизведения требуемых движений при сохранении производительности привода.

5. Для источников возобновляемой или регенеративной энергии возникает вопрос разработки альтернативных устройств передачи механической энергии.

Список литературы

1. Коняев А.Ю. Электротехнологические методы и установки природоохранных технологий: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 101 с.

2. Ларионов Н.М., Рябышенков А.С. Промышленная экология: учебник для студентов вузов. М.: Юрайт, 2015. 495 с.

3. Тетельман В.В., Язев В.А. Основы экологического мониторинга: учебное пособие. Долгопрудный: Интеллект, 2013. 256 с.

4. Веб-сайт АВВ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.baldor.com. (дата обращения: 10.11.2021).

5. Сапсалева А.В., Касаткина Е.Г. Возможности использования механических накопителей энергии в приводах транспортных средств // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы

9 международной научно-практической конференции (Сочи, 1–10 окт. 2014 г.). М.: НИУ ВШЭ, 2014. С. 486–487.

6. Беспалов В.Я. Высокоэффективные асинхронные двигатели // Энергетика. Информационные направления в энергетике. САКС-технологии в энергетике: материалы I Всероссийской научно-технической интернет-конференции. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2007. С. 17–27.

7. Калужский Д.Л., Стрижков А.М., Галимзянов А.Т. Сравнительный анализ высокомоментных двигателей // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011. Сборник научных трудов. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. первого президента России Б.Н. Ельцина, 2011. С. 183–188.

8. Sapsalev A.V., Kharitonov S.A., Aipov R.S., Zharkov M.A., Kuratov K.A. and Savin N.P. "Prospects for the Use of a Magnetic Gearbox in the Electrical Equipment of Aircraft," International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019. P. 21–25.

9. Молоканов О.Н. Разработка методов расчета и анализ перспективных конструкций бесконтактных магнитных передач: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017. 153 с.