

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

А.С. УШКОВ, А.Р. КОЛГАНОВ
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: taugrin@gmail.com, klgn@drive.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Современные системы управления асинхронным 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.

Материалы и методы: Исследование современных методов энергосберегающего управления асинхронными электроприводами выполнено на основе анализа научно-технической информации, представленной в отечественных и зарубежных высокорейтинговых изданиях, трудах научно-технических конференций и сети Интернет.

Результаты: Рассмотрены современные методы энергосберегающего управления асинхронным электроприводом. Выполнена их классификация. Выделено два основных подхода в рассмотрении современных методов энергосбережения в асинхронных электроприводах. Первый подход связан с модификацией структуры электропривода, второй – с применением энергоэффективных стратегий управления.

Выводы: Показано, что комплексное применение предложенных подходов обеспечит максимально эффективное использование электропривода по мощности, а также минимизацию потерь при электромеханическом преобразовании энергии.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, методы энергосбережения, корректор коэффициента мощности, энергоэффективные стратегии управления.

RESEARCH OF MODERN METHODS OF ENERGY-EFFICIENT CONTROL BY ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

A.S. USHKOV, A.R. KOLGANOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: taugrin@gmail.com, klgn@drive.ispu.ru

Abstract

Background: The modern control systems of asynchronous electric drive allow to organise the regulation of electric drive coordinates in a wide range, with the high accuracy and fast speed. However, not every control system provides functioning of the electric drive with the maximum power efficiency.

Materials and methods: Research of the modern energy optimal control methods for asynchronous electric drive is executed on the basis of the analysis of the scientific and technical information presented in domestic and foreign popular editions, collections of conferences reports, and in the Internet.

Results: Modern energy optimal control methods for asynchronous electric drive are considered. Classification of the modern energy optimal control methods for asynchronous electric drives was created. Two main approaches for considering modern methods of power efficiency in the asynchronous electric drive are found out. The first approach is connected with updating the structure of the electric drive; the second one is connected with application of energy-effective control strategies.

Conclusions: It is shown that the complex application of both mentioned approaches will provide the maximum effective usage of the power for the electric drive, as well as to minimize the losses at electromechanical transformation of energy.

Key words: asynchronous electric drive, methods of power saving, corrector of power coefficient, power efficient control strategy.

На современном этапе развития науки и техники системы электропривода прочно занимают лидирующее положение среди приводных устройств и обеспечивают бесперебойную и надежную работу технологических механизмов во многих отраслях промышленности.

В качестве приводного двигателя наибольшее распространение находит асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором.

Повсеместное применение АД обусловлено их высокой надежностью, сравнительно низкой стоимостью и приемлемыми эксплуатационными расходами. По экспертным оценкам на предприятиях Российской Федерации используются от 120 до 150 млн единиц АД. До 70 % АД сосредоточено в энергоемких отраслях: горно-, нефте-, газодобывающей, метал-

лургической, строительной промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве.

В настоящее время повышение энергоэффективности работы оборудования выдвигается на первый план развития национальной экономики.

Современный асинхронный электропривод реализуется на базе силовой полупроводниковой техники с применением микропроцессорного управления. Его возможности позволяют обеспечить регулирование выходных координат привода в широком диапазоне, с высокой точностью и быстродействием. Однако далеко не каждая система управления (СУ) обеспечивает работу электропривода (ЭП) с максимальными энергетическими показателями.

Использование энергоэффективных асинхронных электроприводов и их эксплуатация с минимальным потреблением энергии позволяют сэкономить в РФ до 6 ТВт·ч в год или более 12 млрд руб. Поэтому повышение эффективности работы электромеханических систем и эксплуатация их в энергосберегающих режимах являются, несомненно, актуальной задачей.

Действующая в настоящее время *Федеральная целевая программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»* [1] направлена на обеспечение конкурентоспособности, финансовой устойчивости, энергетической и экологической безопасности российской экономики, роста уровня и качества жизни населения, реализации потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности на основе модернизации, технологического развития и перехода к рациональному и экологически ответственному использованию энергетических ресурсов.

Основным документом в Российской Федерации, регулирующем отношения, возникающие при осуществлении деятельности в области энергосбережения, является *Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 года «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...»* [2]. Цель этого закона – создать экономические и организационные условия для эффективного использования энергетических ресурсов.

Кроме того, область энергосбережения регулируют *ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»* [3] и *ГОСТ Р 51317.3.2-2006 «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний»* [4].

Под электромагнитной совместимостью понимается способность электротехнических

устройств нормально функционировать при наличии непреднамеренных электромагнитных помех из питающей сети (кондуктивных) и из окружающей среды (индуктивных), не создавая при этом недопустимых помех для питающей сети и окружающей среды.

В настоящее время проблемы электромагнитной совместимости асинхронных электроприводов разделяют на три вида:

- проблемы обеспечения качества электрической энергии питающей сети и обратного влияния вентильных преобразователей на сеть;
- проблемы помехоустойчивости систем управления вентильными преобразователями;
- проблемы эмиссии электромагнитных помех вентильными преобразователями в окружающую среду.

Среди основных нормируемых показателей качества электроэнергии, на которые влияет подключение к питающей сети полупроводникового преобразователя, рассматриваются:

- отклонение напряжения δU ;
- колебания напряжения, характеризующиеся размахом изменения напряжения δU_1 и дозой фликера P_1 ;
- несинусоидальность напряжения, количественно определяемая через коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U и коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(1)}$;
- несимметрия напряжения;
- отклонение частоты;
- ряд других показателей.

В [4] определяется уровень влияния на питающую сеть высших гармонических составляющих потребляемого из сети тока, а именно эмиссия высших гармоник тока в питающую сеть в зависимости от класса преобразователей. Все электротехнические устройства разделяются на классы:

- класс А – симметричные трехфазные электротехнические устройства;
- класс В – переносные электрические инструменты;
- класс С – световые приборы, включая устройства регулирования;
- класс D – ТС с потребляемым током, характеризующимся специальной прямоугольной формой и активной мощностью, не превышающей 600 Вт.

Для каждого из классов определены нормы эмиссии максимально допустимых гармонических составляющих тока.

ГОСТ Р 51317.3.2-2006 устанавливает ограниченное количество высших гармоник потребляемого тока: ток должен быть практически синусоидальным и синфазным с напряжением питающей сети, обеспечивая коэффициент мощности K_M устройства близкий к единице. По сути, коэффициент мощности – это показатель,

характеризующий линейные и нелинейные искажения, вносимые нагрузкой в электросеть.

Главными показателями энергоэффективности асинхронных электроприводов являются: потребляемый из электросети ток, электрический КПД, коэффициент мощности.

Главный недостаток асинхронных электроприводов с точки зрения энергоэффективности – это потребление реактивной мощности из питающей сети, что обуславливает снижение коэффициента мощности.

Кроме того, подавляющее большинство современных асинхронных электроприводов реализованы на базе двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ), которые, как правило, выполнены по схеме «неуправляемый выпрямитель – емкостный фильтр – транзисторный автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения» (рис. 1).

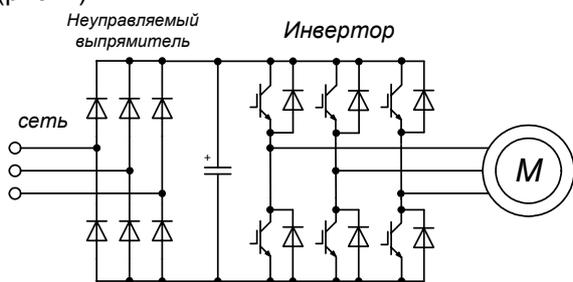


Рис. 1. Типовая схема двухзвенного ПЧ

Наличие неуправляемого выпрямителя сильно искажает форму потребляемого тока, что приводит к отрицательному влиянию преобразователей на сеть и окружающую среду.

Таким образом, современные методы энергосберегающего управления асинхронными электроприводами должны обеспечивать высокий коэффициент мощности электропривода, а также хорошую электромагнитную совместимость полупроводникового преобразователя с сетью.

Анализ современного состояния проблемы построения энергосберегающего электропривода переменного тока позволил выделить два основных подхода в рассмотрении современных методов энергосбережения в асинхронных электроприводах.

Первый подход связан с модификацией и улучшением аппаратной части ЭП. Наиболее простым методом решения проблемы энергосбережения является замена традиционного АД на АД с повышенным классом энергоэффективности.

Одной из причин невысокого энергетического КПД АД является их конструктивная особенность – наличие электротехнической стали и катушек индуктивности обмоток электрической машины, а также проектирование и изготовление их по критерию минимума затрат, выгодного только для производителя. Ведущие

зарубежные производители электрических машин AEG [5], ABB [6], Siemens [7] изготавливают АД с повышенным КПД классов EFF1, EFF2, EFF3, Premium. Повышение КПД в АД осуществляется за счет увеличения массы активных материалов двигателя – меди и электротехнической стали. Однако это ведет к значительному удорожанию двигателя.

Еще одним методом повышения энергоэффективности асинхронных электроприводов является *модификация топологии силовых преобразователей или алгоритмов ШИМ*.

Все ПЧ по уровню напряжений можно разделить на низковольтные и высоковольтные. Практически все низковольтные ПЧ, как правило, выполнены по двухзвенной схеме – неуправляемый выпрямитель с автономным инвертором напряжения (АИН), реже – с автономным инвертором тока (АИТ), выполненными по мостовой схеме. В свою очередь, высоковольтные ПЧ также содержат промежуточное звено постоянного напряжения, а инверторы, исходя из схемных решений, подразделяются в зависимости от их исполнения [8]:

- АИТ по мостовой схеме на SCR-тиристорах;
- АИТ на полностью управляемых симметричных тиристорах (GTO, SGCT);
- выполнение АИН с тремя уровнями напряжения (3-level) и коммутацией в звезду с фиксированной нулевой точкой или нейтралью;
- АИН с четырьмя уровнями напряжения (4-level);
- АИН многоуровневым (Multi-level).

Эволюция топологии многоуровневых схем начиналась со схемы 3-уровневого ШИМ-АИН (рис. 2). Особенность такого АИН – формирование двуполярного выходного напряжения в виде прямоугольной «решетки» импульсов высокой крутизны, определяемой частотой переключения полупроводниковых ключей (IGCT, IGBT). Поэтому все трехуровневые АИН снабжаются включаемым на выходе синусоидальным фильтром во избежание повреждения изоляции статора асинхронного двигателя импульсами напряжения с высоким значением du/dt (скорости нарастания).

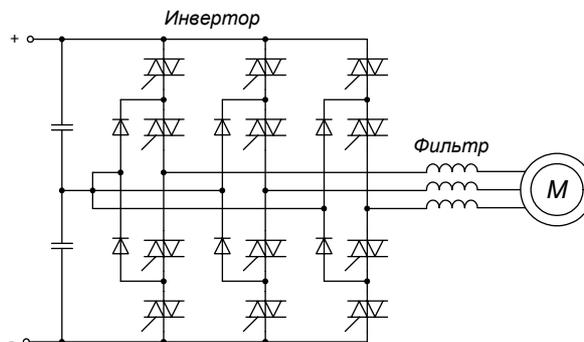


Рис. 2. Трехуровневый АИН

Недостаток в виде установки выходного фильтра отсутствует у четырехуровневых АИН (рис. 3). Форма выходного тока ПЧ с таким инвертором практически синусоидальная, что благоприятно влияет на электромагнитную совместимость преобразователя с сетью, а также обеспечивает высокий коэффициент мощности.

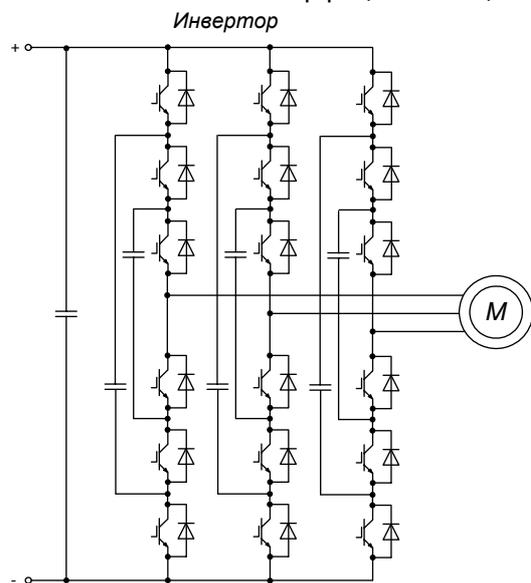


Рис. 3. Четырехуровневый АИН

Применение многоуровневых схем ШИМ-АИН (топология Multi-level) позволяет одновременно с увеличением мощности снизить потери. Форма выходного тока таких АИН наиболее приближена к синусоидальному виду, что благоприятно влияет на электромагнитную совместимость преобразователя с сетью, а также обеспечивает высокое значение коэффициента мощности.

Одним из эффективных способов решения задачи повышения энергоэффективности является применение корректоров коэффициента мощности (ККМ). На практике это означает, что в входную цепь практически любого импульсного преобразователя (в том числе, и преобразователя частоты) включается специальное устройство, обеспечивающее снижение потребления реактивной мощности и искажения формы тока питающей сети.

ККМ принято классифицировать по трём основным группам [9]:

- пассивные корректоры мощности;
- низкочастотные активные корректоры мощности;
- высокочастотные активные корректоры мощности.

Пассивные ККМ являются самыми простыми. Они не содержат элементов, регулирующих ток или напряжение. Основной принцип их работы основан на фильтрации потребляемого тока. Пассивная коррекция позволяет достичь значения коэффициента мощности до 0,8. Такая схема требует включения индуктивных элементов, имеющих высокие масса-

габаритные показатели. Кроме того, требуется изменение индуктивности (подстройка) при изменении тока нагрузки.

Главным отличием активных ККМ является наличие в схеме силовых ключей, с помощью которых происходит регулирование выходного напряжения и потребляемого тока.

Низкочастотные активные ККМ позволяют регулировать выходное напряжение и улучшить коэффициент мощности, однако они, так же как пассивные ККМ, требуют крупногабаритных реактивных элементов, и коэффициент мощности не может превышать значения 0,9.

Для уменьшения размеров элементов фильтра необходимо увеличить частоту преобразования. *Высокочастотный ККМ* представляет собой обычный выпрямитель (диодный мост) и DC/DC преобразователь. При этом DC/DC преобразователь, имея определенный закон управления, обеспечивает необходимую форму тока и стабилизирует выходное напряжение. Варианты схемного исполнения высокочастотного ККМ представлены на рис. 4.

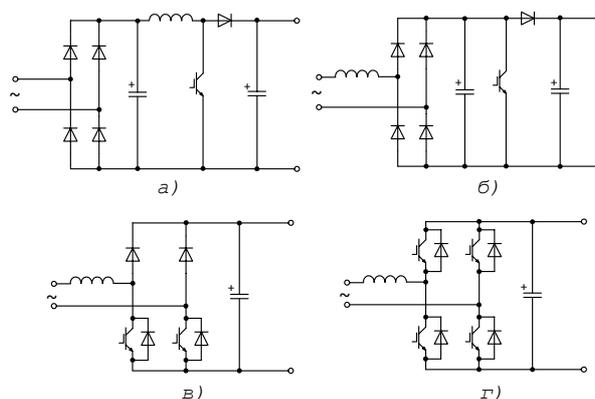


Рис. 4. Варианты схемного исполнения высокочастотного ККМ

Схема на рис. 4,а представляет собой классический вариант высокочастотного ККМ на основе повышающего преобразователя, с дросселем, включенным после выпрямителя. Достоинствами этой схемы является относительно простая система управления.

Схема на рис. 4,б – аналог по алгоритму работы схеме на рис. 4,а, однако имеет дроссель, вынесенный в цепь переменного тока.

Схема на рис. 4,в отличается меньшим количеством силовых диодов за счет использования двух силовых транзисторов ККМ, поочередно работающих на каждом полупериоде сетевого напряжения. Безмостовой ККМ имеет более высокий КПД по сравнению с высокочастотным ККМ на основе повышающего преобразователя. ККМ с широким диапазоном входных напряжений представляют собой одни из самых сложных схем в силовой электронике. Безмостовой способ коррекции коэффициента мощности разработан уже давно, но из-за сложности системы управления до сих пор не получил широкого распространения.

Схема на рис. 4,г отличается от схемы на рис. 4,в наличием всех полностью управляемых ключей, что дает возможность работать в выпрямительно-инверторном режиме.

В структуре асинхронного электропривода наибольший интерес представляет применение схем на рис. 4,а и 4,г, при этом применение последней схемы в структуре ЭП превращает его в двухзвенный ПЧ с активным выпрямителем и инвертором напряжения.

Структура асинхронного электропривода с ККМ представлена на рис. 5.

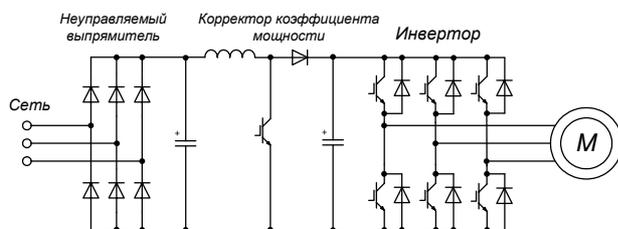


Рис. 5. Силовая схема асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности

Структура асинхронного электропривода с активным выпрямителем представлена на рис. 6.

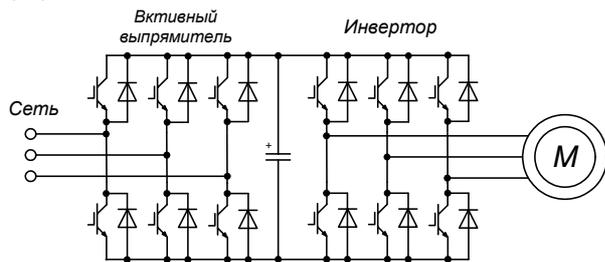


Рис. 6. Двухзвенный ПЧ с активным выпрямителем

Второй подход к повышению энергоэффективности асинхронного электропривода связан с применением энергоэффективных стратегий управления. Энергоэффективные стратегии управления можно разделить на три класса [10]:

- простой контроль состояния (simple state control);
- модельно-ориентированное управление (model-based control);
- поисковое управление (search control).

Класс *энергоэффективных стратегий управления с простым контролем* состояния исторически появился первым, и все методы в этом классе в основном применимы к скалярным частотно-регулируемым электроприводам. В основе этих стратегий лежит следующее: при работе асинхронного электропривода легко вычислить некоторые его энергетические параметры – самые очевидные из них это $\cos\phi$ и величины скольжения ротора s .

Одна из простых энергоэффективных систем управления этого класса [11] представлена на рис. 7. В этой системе управления зада-

ется некоторое значение $\cos\phi$, которое сравнивается со значением обратной связи (вычисленным на основе информации о токе и напряжении), сигнал ошибки подается на регулятор, который, в свою очередь, управляет величиной напряжения.

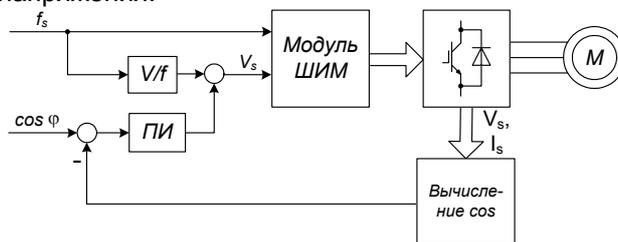


Рис. 7. Функциональная схема ЭП с контролем $\cos\phi$

Второй пример энергоэффективной системы управления с простым контролем состояния представлен на рис. 8 [12]. В основе этой системы лежит управление на основе информации о скольжении, при этом оптимальная частота выбирается из таблицы значений скольжения.

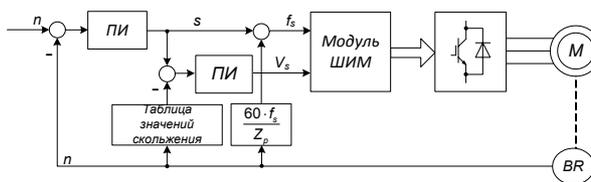


Рис. 8. Функциональная схема ЭП с контролем скольжения

Модельно-ориентированные стратегии управления основываются на использовании в структуре электропривода математической модели двигателя или его части, используемой для создания энергетически-оптимального управления. Примером может служить система управления, вычисляющая оптимальную частоту тока статора на основе математической модели двигателя без учета основных потерь [13]. Частота тока статора вычисляется по следующей формуле:

$$f_s = \frac{60n}{Z_p} + \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_s R_r^2}{R_s (L_m + L_r)^2 + R_r L_m^2}}, \quad (1)$$

где n – скорость двигателя; Z_p – количество пар полюсов; R_s – активное сопротивление статора; R_r – активное сопротивление ротора; L_r – индуктивность ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания.

Функциональная схема такой СУЭП представлена на рис. 9.

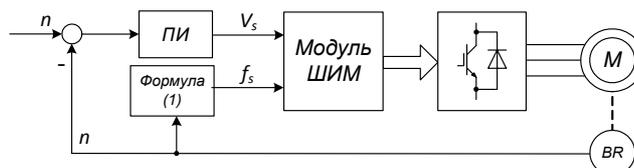


Рис. 9. Пример схемы модельно-ориентированной стратегии управления

Примером модельно-ориентированных стратегий управления, которые наиболее часто используются в настоящее время, могут служить векторный асинхронный электропривод с учетом потерь в стали, векторный асинхронный электропривод с моделью роторной цепи [14] и др.

Поисковые стратегии управления основываются на оптимизации в процессе работы некоторых параметров электропривода в соответствии с заданным критерием, например: максимум КПД, минимум потребляемой мощности, минимум потребляемого тока, минимум потерь энергии и т.п.

Структурная схема системы управления асинхронного электропривода с адаптивным управлением по критерию минимума потребляемой мощности [15] представлена на рис. 10. В этом примере на основе информации о токе и напряжении вычисляется значение потребляемой мощности, напряжение питания будет регулироваться до тех пор, пока не будет достигнут ее минимум.

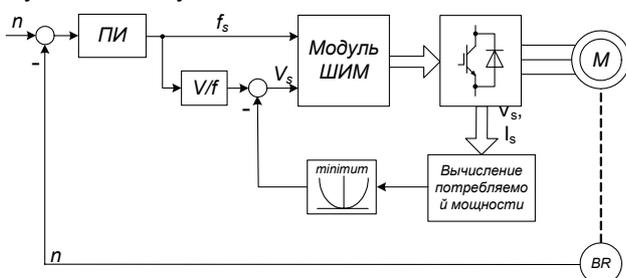


Рис. 10. Пример схемы поисковой стратегии управления

Заключение

Оба из рассмотренных выше подходов к повышению энергетических показателей представляют существенный интерес для разработчиков современных ЭП. В этой связи наиболее перспективной представляется тенденция совместного применения обоих подходов, что обеспечит максимально эффективное использование ЭП по мощности, а также минимизацию потерь при электромеханическом преобразовании энергии.

Выбор метода энергосбережения напрямую зависит от самого электропривода и области его применения.

В первую очередь стоит рассмотреть вариант замены традиционного АД на АД с повышенным классом энергоэффективности. Это самый простой и надежный вариант, и он особо актуален для нерегулируемых асинхронных электроприводов.

В области высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов наилучших результатов в энергосбережении можно добиться за счет применения преобразователей с 4-уровневыми или многоуровневыми инверторами напряжения. Благодаря применению этих топологий АИН выходной ток будет макси-

мально приближен к синусоидальной форме, что позволит не устанавливать дополнительные сглаживающие реакторы. Также это благоприятно повлияет на электромагнитную совместимость преобразователей с сетью.

В области низковольтных частотно-регулируемых электроприводов, которые наиболее распространены в промышленности, наилучших результатов можно добиться за счет коррекции коэффициента мощности. При этом возможны два варианта: 1) применение частотного преобразователя с активным выпрямителем напряжения; 2) применение частотного преобразователя с традиционным корректором коэффициента мощности. Оба варианта имеют свои достоинства и недостатки. Достоинствами обоих являются: высокий коэффициент мощности электропривода, форма потребляемого из сети тока приближена к синусоидальной и, как следствие этого – хорошая электромагнитная совместимость преобразователя с сетью.

Преимуществом ПЧ с активным выпрямителем, по сравнению с традиционным ККМ, является возможность регенерации энергии в сеть, поэтому применение таких ПЧ наиболее актуально для ЭП, которые работают в периодически-кратковременных или повторно-кратковременных режимах. В свою очередь, ПЧ с традиционным ККМ лучше применять для ЭП, которые в процессе работы не часто подвергаются торможению или реверсу, поскольку в таких режимах энергия торможения будет рассеиваться на тормозной резистор. Однако ПЧ с традиционным ККМ за счет меньшего количества силовых элементов и более простой системы управления стоят намного дешевле. В ПЧ с активным выпрямителем необходимо использовать два силовых модуля, для управления обоими модулями обычно используются алгоритмы векторного управления, что значительно усложняет микропроцессорную систему управления. Для реализации такой системы придется использовать микроконтроллер с большей вычислительной мощностью и более сложные программные алгоритмы, что повлечет за собой удорожание ЭП.

Параллельно с модификацией структуры ЭП в целях еще большего увеличения энергосбережения можно использовать энергоэффективные стратегии управления. Выбор класса энергоэффективных стратегий управления и конкретного метода также зависит от многих условий.

Несмотря на то, что методы простого контроля состояния исторически появились самыми первыми, они являются самыми простыми и их реализация возможна еще на аналоговой технике, однако на современном этапе развития электропривода они практически не применяются. Вместо этого выбор стоит

между модельно-ориентированными и поисковыми стратегиями управления.

Асинхронный электропривод с векторным управлением сейчас является наиболее совершенным, однако алгоритмы векторного управления в большинстве случаев не учитывают насыщения магнитопровода, а также других потерь в двигателе. Включение в систему управления модели двигателя позволяет учесть эти потери для создания оптимального энергоэффективного управления двигателем. Достоинством модельно-ориентированных стратегий управления является высокая скорость регулирования, хорошая точность. Однако существенный недостаток этих стратегий управления – это высокая зависимость от параметров электродвигателя.

В отличие от модельно-ориентированных стратегий управления, поисковые стратегии совершенно не зависят от параметров электродвигателя, но при этом они позволяют достичь очень хороших результатов. Их единственный недостаток – это низкая скорость регулирования. Однако применение инновационных методов современной теории управления, таких как методы нечеткой логики (fuzzy logic) и нейронных сетей (neural networks), позволяет значительно повысить скорость регулирования.

Список литературы

1. **Распоряжение** Правительства РФ от 27.12.2010 N 2446-р (ред. от 18.08.2011) «Об утверждении государственной программы "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года"» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118503, свободный.
2. **Федеральный закон** от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 03.12.2011) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122620/#cont, свободный.
3. **ГОСТ** 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006.
4. **ГОСТ Р** 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007.
5. **Асинхронные двигатели** с повышенной энергоэффективностью фирмы AEG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lafert.com/lafert/az/products_zoom.php?id_az=6&id=1431, свободный.
6. **Асинхронные двигатели** фирмы ABB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.abb.com/motors, свободный.
7. **Асинхронные двигатели** фирмы Siemens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electrosiemens.ru/>, свободный.
8. **Лазарев Г.Б.** Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. – 2007. – № 3.
9. **Малаханов А.А.** Математическое моделирование импульсно-модуляционных систем с коррекцией коэффици-

циента мощности: дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 2007. – С. 16.

10. **Abrahamsen F.** Energy Optimal Control of Induction Motor Drives/ Institute of Energy Technology. – Denmark, 2000.
11. **Park M.H., Sull S.K.** Microprocessor-Based Optimal-Efficiency Drive of an Induction Motor // IEEE Trans. Ind. Elec. – Feb 1984. – Vol. IE-31. – No. 1. – P. 69–73.
12. **Dewan S.B.,** Rosenberg/Inverter S.A., Slemon, G.R. Fed Induction Motor Drive Using Power Factor Control // Journal of the 1976 annual meeting of the IEEE society/ – 1976.
13. **Galler D.** Energy Efficient Control of AC Induction Motor Vehicles: Conf. Record of the IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting 1980. – Sep. 1980. – P. 301–308.
14. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – С. 187–195.
15. **Cathey J.J., Famouri P.** Loss Minimization of an Induction Motor Drive // IEEE Trans. Ind. App. – Jan/Feb 1991. – Vol. 27. – No. 1. – P. 32–37.

References

1. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27.12.2010 N 2446-r (red. ot 18.08.2011) «Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy "Energosberezhenie i povyshenie energeticheskoy effektivnosti na period do 2020 goda"»* [Russian Government Order dated 27.12.2010 2010 N 2446-p «On approval of State Program "Energy Savings and Increasing the Energy Efficient during the period till 2020"»], http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118503, free.
2. *Federal'nyy zakon ot 23.11.2009 N 261-FZ (red. ot 03.12.2011) «Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii»* [Federal Law N 261-FZ dated 23.11.2009 «On Energy Savings and Increasing the Energy Efficient as well as on Changing of Separate Legislative Documents of Russian Federation»], http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122620/#cont, free.
3. *GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Quality Norms of Electric Energy in General Energy Saving Systems], Moscow: Standartinform, 2006.
4. *GOST R 51317.3.2-2006 (MEK 61000-3-2:2005). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Emissiya garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 16 A (v odnoy faze). Normy i metody ispytaniy* [Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Emission of Harmonious Parts with Technical Tools of Consumption Current of less than 16 A in one phase. Norms and Methods of Experiments], Moscow: Standartinform, 2007.
5. *Asinkhronnye dvigateli s povyshennoy energoeffektivnost'yu firmy AEG* [Asynchronous Motors with High Energy Efficiency of the AEG Firm], http://www.lafert.com/lafert/az/products_zoom.php?id_az=6&id=1431, free.
6. *Asinkhronnye dvigateli firmy ABB* [Asynchronous Motors of the ABB Firm], www.abb.com/motors, free.
7. *Asinkhronnye dvigateli firmy Siemens* [Asynchronous Motors of the Siemens Firm], <http://electrosiemens.ru/>, free.
8. *Lazarev, G.B. Chastotno-reguliruemyy elektroprivod nasosnykh i ventilatornykh ustanovok* [Frequency-Controlled Electrical Drive of Pumping and Ventilator Units], in *Silovaya elektronika* [Power Electronics], issue 3, 2007.
9. *Malakhanov, A.A. Matematicheskoe modelirovanie impul'sno-modulyatsionnykh sistem s korrektsiyey koeffitsienta moshchnosti: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical Simulation of Impact and Module Systems with Correction of Power Coefficient], Bryansk, 2007, p. 16.
10. *Abrahamsen, F. Energy Optimal Control of Induction Motor Drives*, Institute of Energy Technology, Denmark, 2000.
11. *Park, M.H., Sull, S.K. Microprocessor-Based Optimal-Efficiency Drive of an Induction Motor*, in *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Feb 1984, vol. IE-31, no. 1, pp. 69–73.

12. Dewan, S.B., Rosenberg, S.A., Slemon, G.R. Inverter Fed Induction Motor Drive Using Power Factor Control, in Journal of the 1976 annual meeting of the IEEE society, 1976.

13. Galler, D. Energy Efficient Control of AC Induction Motor Vehicles, Conf. Record of the IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting 1980, Sep. 1980, pp. 301–308.

14. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vectorial Control of Alternating Current of Electrical Drives], Ivanovo, 2008, pp. 187–195.

15. Cathey, J.J., Famouri, P. Loss Minimization of an Induction Motor Drive, in IEEE Trans. Ind. App., Jan/Feb 1991, vol. 27, no. 1, pp. 32–37.

Ушков Александр Сергеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон (4932) 26-97-16,
e-mail: taugrin@gmail.com

Колганов Алексей Руфимович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон (4932) 26-97-09,
e-mail: klgn@drive.ispu.ru