

Энергоэффективные системы вспомогательного электропривода электрического подвижного состава



Т. С. Титова,
д.т.н., профессор, проректор по научной работе
Петербургского государственного университета
путей сообщения (ПГУПС);



А. М. Евстафьев,
к.т.н., заведующий
кафедрой «Электрическая тяга» ПГУПС

Задачи энергосбережения на железнодорожном транспорте не только не теряют своей актуальности, но и приобретают первостепенную важность. Внедрение энергоэффективных технологий и конструкторских решений позволяет экономить значительные ресурсы и уменьшать негативную нагрузку на окружающую среду.

Снизить энергопотребление и повысить надежность электрического подвижного состава (ЭПС) переменного тока возможно за счет совершенствования системы вспомогательного привода, на которую приходится до 18 % от электроэнергии, расходуемой на тягу [1]. На электровозах переменного тока питание трехфазных асинхронных двигателей вспомогательных машин осуществляется от однофазной сети с помощью простых и надежных систем преобразования числа фаз, разработанных в 60-х гг. прошлого века. Так, для преобразования однофазного напряжения в трехфазное на электровозах переменного тока в ВЭЛНИИ была разработана конструкция расщепителя фаз НБ455А, который обеспечивал уверенный запуск мотор-компрессора, мотор-вентилятора и мотор-насоса. Однако при установившихся режимах работы системы вспомогательного привода роль расщепителя фаз становится незначительной.

Простота схем включения вспомогательных машин и надежность конструкции асинхронных двигателей должны были гарантировать высокий уровень надежности в эксплуатации, но до 20 % общего числа отказов на электровозах связано с системами питания собственных нужд [2]. Негативное влияние на работу вспомогательных машин оказывают значительные колебания напряжения, наличия в нем высших гармоник, токовые и механические нагрузки при пуске двигателей. Момент сопротивления на валу у двигателей вентиляторов и насосов зависит от температу-

ры и давления атмосферного воздуха, а компрессора — от параметров тормозной системы поезда, с которым следует электровоз. Необходимо также учитывать, что кроме обмотки собственных нужд, тяговый трансформатор электровоза имеет тяговую обмотку, к которой подключена основная нагрузка — тяговые двигатели. Особенность работы тягового трансформатора заключается в том, что на интервале времени коммутации обмотки тягового трансформатора оказываются замкнутыми накоротко. Короткое замыкание тяговой обмотки влияет на формы кривых выпрямленного напряжения и тока во всех обмотках трансформатора. Длительность интервала коммутации зависит от величины выпрямленного тока, ступени трансформатора или зоны регулирования выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) и напряжения в контактной сети. Искажения формы тока при замыкании части или всей тяговой обмотки трансформатора увеличивает пульсации электромагнитного момента асинхронных двигателей, получающих питание от обмотки собственных нужд, напряжение на которой на интервале коммутации снижается и становится практически равным нулю. Наличие высших гармоник и несимметрия питающего напряжения приводят к повышенному нагреву асинхронных двигателей и как следствие — к ускоренному старению изоляции, пульсации электромагнитного момента, повышенному механическому износу. Таким образом, существующая система питания вспомогательных машин не позволяет реа-

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

лизовать преимущества асинхронных двигателей, приводит к неоправданному расходу электроэнергии и требует существенного улучшения.

• В зарубежной практике система питания собственных нужд современных электропоездов существенно отличается от систем, используемых на отечественном тяговом подвижном составе. Питание всех цепей собственных нужд, включая вспомогательные машины, осуществляется от статических преобразователей, которые, как правило, имеют несколько независимых каналов, формирующих независимые цепи питания для однофазной, трехфазной нагрузки и цепей постоянного тока. Кроме упрощения и унификации отдельных узлов, такая концепция построения позволяет снизить общую массу и объем преобразователя собственных нужд. Такое решение реализовано в преобразователях собственных нужд поезда Coradia Lirex депо Стокгольма [3]. В нем реализованы четыре резервированные системы переменного тока, которые получают питание от двух преобразователей (рис. 1).

Два гальванически разделенных преобразователя образуют систему постоянного тока напряжением 400 В, которая связана с шиной, проходящей через весь поезд. К шине подключены два трехфазных инвертора 230/400 В, дополнительный инвертор, два зарядных агрегата (преобразователя) напряжением 110 В постоянного тока. Все инверторы выполнены с активным резервированием. Такой модульный принцип позволяет экономить расходы и затраты времени на разработку преобразователей, минимизировать риски проектирования благодаря использованию большого числа унифицированных компонентов. Основными преимуществами применения инверторов напряжения для питания трехфазных электродвигателей вспомогательного привода являются:

- повышение надежности вспомогательных электроприводов;
- исключение разрушительных и энергозатратных (энергоемких) переходных процессов;
- повышение качества напряжения питания вспомогательных электроприводов и реализация частотного пуска;
- снижение затрат электроэнергии на вспомогательный электропривод [4].

В наибольшей степени это касается электропривода компрессоров и насосов, нагрузка которых изменяется в зависимости от многих факторов. Поэ-

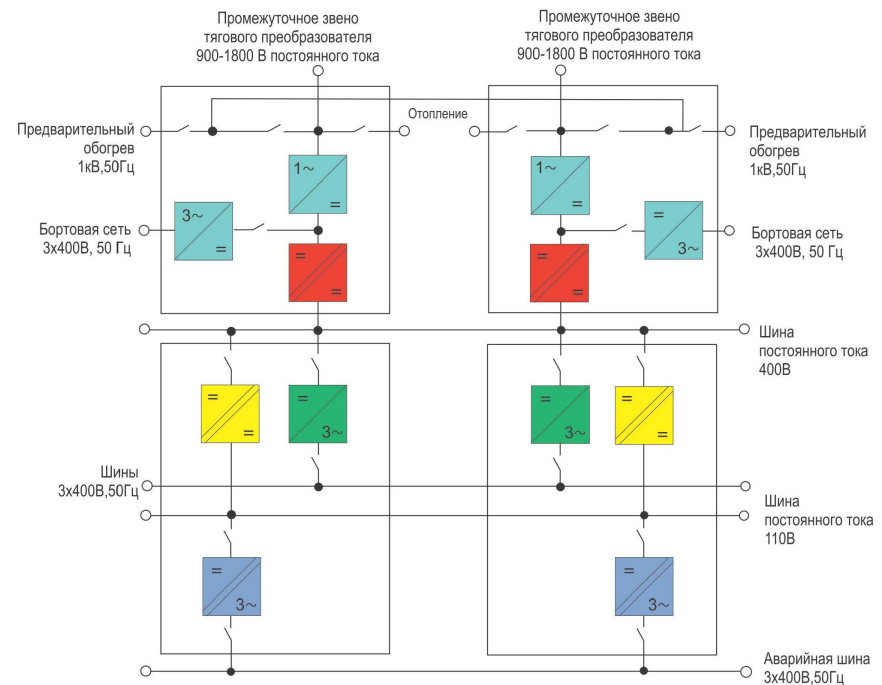


Рис.1. Преобразователь собственных нужд поезда Coradia Lirex

тому компрессор системы кондиционирования поезда Coradia Lirex получает питание напряжением регулируемой частоты от отдельного преобразователя. В отечественном локомотивостроении способ частотного регулирования напряжения питания асинхронного двигателя компрессора использован на электропоезде ЭП10, инверторы преобразователя собственных нужд формируют три рабочие ступени с выходным напряжением и частотой [5]:

- 1 ступень — 130 В, 17 Гц;
- 2 ступень — 250 В, 33 Гц;
- 3 ступень — 380 В, 50 Гц.

Для регулирования скорости вращения асинхронных двигателей используют разнообразные системы частотного управления питающего напряжения, которые можно разделить на два вида: скалярные и векторные.

При скалярном способе управления на обмотках статора формируется гармоническое напряжение, частота и действующее значение которого контролируются системой управления. Частота напряжения, подводимого к статору, и его амплитуда связаны аналитической зависимостью в соответствии с выбранным законом частотного управления.

Скалярные системы управления просты в реализации и обеспечивают в установившихся режимах работы высокую перегрузочную способность асинхронного двигателя по моменту и

потере энергии на уровне номинальных. При постоянном отношении напряжения питания электродвигателя к частоте в номинальном режиме магнитный поток и развиваемый двигателем момент также постоянны. Однако магнитный поток при этом не будет соответствовать номинальным значениям в следующих случаях:

- а) при пуске и работе на очень низких частотах;
- б) при работе с изменяющимися нагрузками.

В первом случае необходимо дополнительное увеличение магнитного потока двигателя, а во втором — возможность регулирования магнитного потока ротора в соответствии с изменениями нагрузки.

При построении систем управления асинхронными двигателями на современной элементной базе большое распространение получил векторный подход к описанию параметров двигателя и управлению моментобразующих составляющих: током и магнитным потоком. Такой метод обеспечивает оптимальный угол между магнитными полями ротора и статора электродвигателя при изменении скорости вращения. При этом доступной управляемой переменной в асинхронном двигателе является только ток статора, который имеет составляющие, образующие магнитный поток и момент. Таким образом,

в асинхронном двигателе необходимо обеспечить одновременное управление амплитудой и фазой тока в обмотках статора, т. е. оперировать их векторными величинами.

Несмотря на относительную сложность реализации этот способ управления трехфазными двигателями переменного тока обладает следующими преимуществами:

- большим диапазоном регулирования скорости вращения;
- хорошей реакцией на изменение нагрузки;
- точным регулированием мощности;
- высоким крутящим моментом при изменении скорости двигателя в широком диапазоне;
- рабочими характеристиками, сравнимыми с характеристиками приводов постоянного тока.

Векторное управление асинхронными двигателями может быть реализовано различными способами, которые отличаются друг от друга измеряемыми параметрами для вычислений активного тока, тока намагничивания, магнитного потока и крутящего момента. Принцип векторного управления заключается в следующем. Определяется направление и угловое положение вектора потокосцепления двигателя в координатах d и q (x, y). Оси d и q ориентируют по потоку ротора двигателя. Вектор напряжения статора двигателя регулируют в координатах, при этом составляющая напряжения подводимого к статору двигателя по оси d регулирует величину тока по этой оси и амплитуду

ду вектора потока ротора. Вектор тока статора по оси q регулируется напряжением по этой оси и определяет момент, развиваемый двигателем. Таким образом, управление асинхронным двигателем становится подобным управлению двигателем постоянного тока, так, по оси d формируется поле двигателя, а ток по оси q управляет моментом. При векторном управлении главным потокосцеплением система управления двигателем упрощается и исключается чрезмерное насыщение магнитной системы. Параметры вектора главного потокосцепления определяются в неподвижной системе координат α и β . Переход из трехфазной системы в двухфазную (преобразование Кларка) называют переходом от реальной трехфазной машины к абстрактной, обобщенной двухфазной машине (рис. 2).

Дифференциальные уравнения, описывающие асинхронный двигатель, принимают простейший вид во вращающейся системе координат $d q$ (преобразование Парка). Поскольку вектор главного потокосцепления неподвижен относительно вращающейся системы координат, его амплитуда и фаза однозначно определяются проекциями на оси координат. Управление векторами потокосцепления и тока осуществляется двумя скалярными регуляторами проекций. Вращение системы вычисляют посредством формул координатных преобразований, измеряя или вычисляя угол ее поворота относительно неподвижной системы координат. В качестве критерия оптимизации энергетической эффективности, как правило, принимают

минимум тока статора, при котором двигателем вырабатывается необходимый момент, что обеспечивает минимальные потери.

После выполнения необходимых вычислений, в соответствии с принятым алгоритмом вектора напряжения и тока статора, преобразуется в неподвижную систему координат, связанную со статором, используя обратные преобразования Кларка и Парка, и реализуется посредством трехфазной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), силовых транзисторов инвертора, который вырабатывает трехфазное напряжение для питания обмоток асинхронного двигателя. Такая система электропривода строится со звеном постоянного тока, в которой на вход инвертора подается постоянное напряжение с выхода блока выпрямителя, объединяющего мостовой выпрямитель, и корректор коэффициента мощности. Блок выпрямителя обеспечивает стабилизацию величины напряжения подаваемого на инвертор при колебаниях напряжения в контактной сети, что также благоприятно влияет на энергоэффективность и надежность вспомогательного электропривода. На рис.3 приведена типовая функциональная схема электропривода с питанием асинхронного двигателя от инвертора [6]. Практика показала успешность применения в системах электропривода переменного тока как специализированных микроконтроллеров электропривода, так и микроконтроллеров общего назначения, использующих различные архитектуры (RISC, DSP, CISC) специализированные блоки

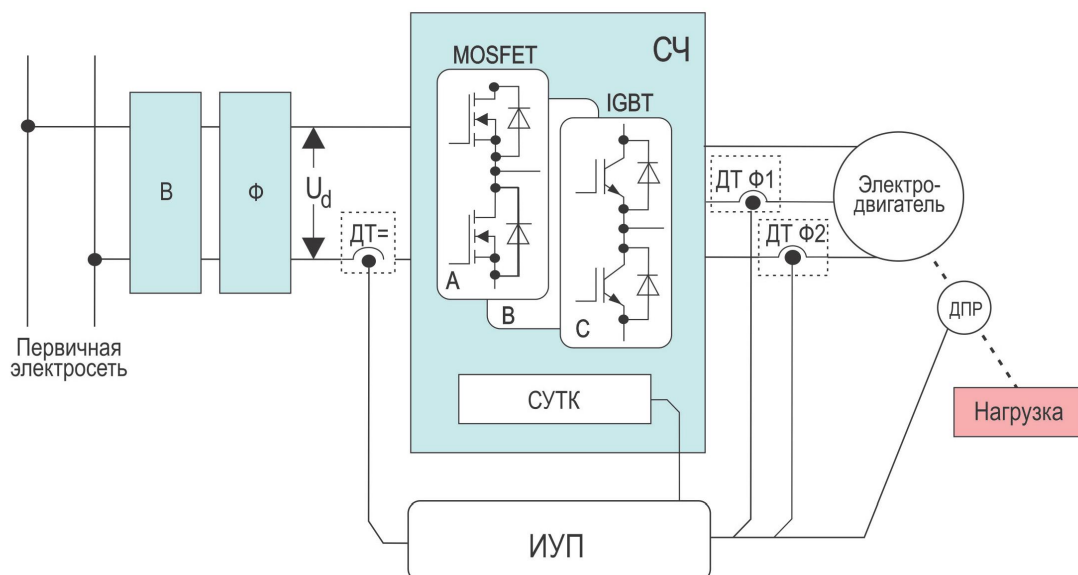


Рис. 2. Алгоритм прямого и обратного преобразования

управления ШИМ и другие. Для современных разработчиков регулируемого электропривода доступна широкая номенклатура специализированных контроллеров, драйверов, интеллектуальных силовых модулей от различных производителей: Texas Instruments, Freescale, Microchip, Atmel, Intel, Fuji, Infineon и других.

Применение готовых библиотек, набора программ и решений от производителей в значительной степени упростило задачу разработки аппаратной программной частей регулируемого электропривода. Помимо электронных компонентов, для построения систем управления электроприводами компании — разработчики электронной техники предлагают специализированные библиотеки функций и алгоритмов преобразования 2-координатной системы в 3-координатную и обратно используемых при построении систем векторного управления приводом. Базовые функции содержат набор необходимых тригонометрических и математических функций, функций вычисления текущей скорости ротора, угла поворота, задания величины нового угла поворота ротора и другие. Однако массовое использование показало ограниченность готовых решений, сложность внесения изменений и адаптации электропривода к условиям эксплуатации. Внесение изменений требует от разработчиков глубоких знаний теории электропривода и векторного управления.

Постоянное повышение требований к качеству управления электроприводом приводит к усложнению алгоритмов, повышению частоты выборки и степени интеграции, поэтому решения на базе RISC-, DSP-, CISC-процессоров становятся либо неэффективными, либо слишком дорогими. Перспективным решением этой задачи является использование специализированных интегральных схем смешанного сигнала. Такие контроллеры могут выполнять множество специальных аналоговых и логических функций, требуемых как для управления электроприводом, так и для работы выпрямителя и корректора коэффициента мощности (ККМ). Реализация высококачественного бездатчикового векторного управления непосредственно в ядре микроконтроллера послужила мощным стимулом для дальнейшего развития этих систем. Участие микроконтроллера в такой системе управления

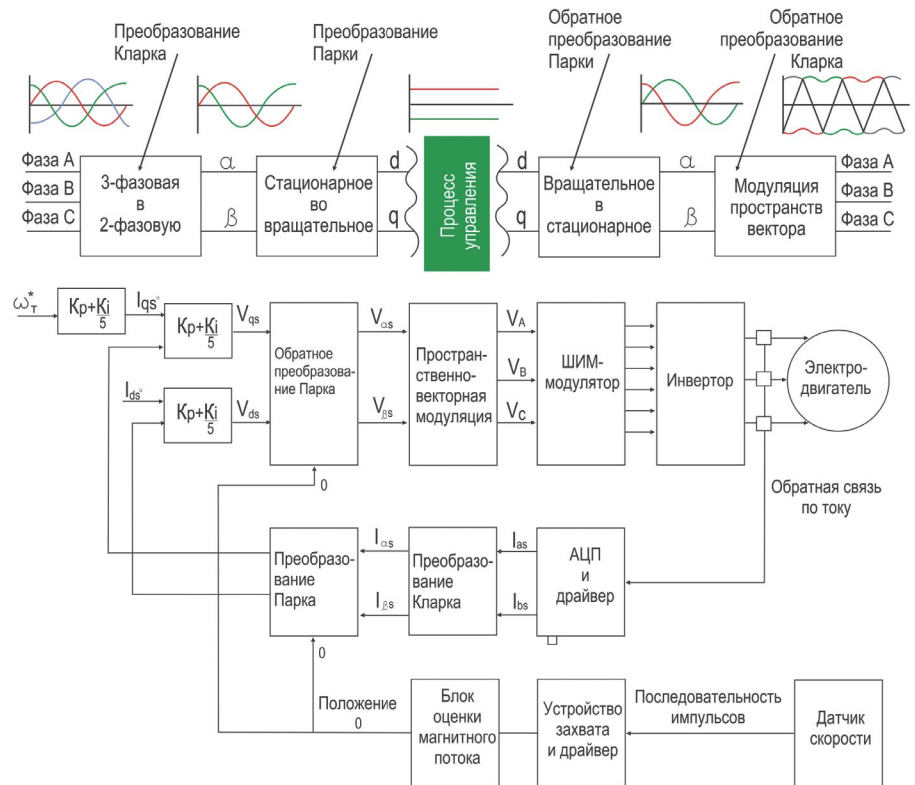


Рис. 3. Функциональная схема электропривода

электроприводом заключается только в конфигурировании параметров через графический интерфейс. Аппаратная реализация векторного управления позволяет получить сочетание высокого быстродействия, точности и устойчивости алгоритмов управления при низкой стоимости контроллера.

Модернизация систем вспомогательного привода позволит существенно улучшить энергоэффективность системы. В современных системах управления электродвигателями активная коррекция коэффициента мощности является одним из обязательных требований, т.к. электродвигатели представляют собой нелинейную нагрузку для цепей переменного тока. Действующие стандарты требуют применения во вспомогательном приводе более эффективных электродвигателей и усовершенствованных методов коррекции коэффициента мощности и снижения уровня гармоник в сетевом токе. Продвижение современных методов преобразования числа фаз и управления асинхронным электроприводом способствует снижению эксплуатационных затрат, увеличению межремонтных пробегов электроподвижного состава, позволяет существенно снизить потребление энергии и уменьшить вредные выбросы в окружающую среду. ■

Литература

1. Анализ энергетических характеристик в системе питания вспомогательных машин электровозов переменного тока серии «ЕРМАК» / Г. Н. Шестоперов, О. Г. Ариски, А. А. Тишкин, И. В. Синяевский // Вест. Всерос. научно-иссл. и проектно-констр. ин-та электровозостроения. 2011. № 1 (61). С.38–49.
2. Вспомогательный привод электровозов переменного тока / А. М. Рутштейн // Вест. Всерос. научно-иссл. и проектно-констр. ин-та электровозостроения. 2008. №2 (56). С. 162–171.
3. Энергетические характеристики рашпителей фаз / Ю. А. Федюков // Электровозостроение: сб. науч. Тр. Всерос. Науч.-исслед. и проектно-констр. ин-та электровозостроения. 2001. № 43. С.104–112.
4. Экономия энергии на подвижном составе с новым преобразователем собственных нужд / Д. Виммер // Железные дороги мира. 2007. №6. С. 44–48.
5. Система вспомогательного привода электровоза двойного питания типа ЭП10 / А. И. Лещев, С. С. Матекин, С. А. Усвицкий, В. Н. Поздняков // Электровозостроение: сб. науч. Тр. Всерос. Науч.-исслед. и проектно-констр. ин-та электровозостроения. 2000. №42.
6. Electric motor efficiency depends upon power factor Part 1,2. / Richard Newell / www.industrialcontroldesignline.com.