

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Докт. техн. наук **БОГДАН Н. В.**, канд. техн. наук САФОНОВ А. И.,
асп. МАЗАНИК К. И.

Белорусская государственная политехническая академия

В настоящее время на городском пассажирском транспорте все большее распространение получает тяговый электропривод. По сравнению с двигателем внутреннего сгорания применение тягового электропривода на троллейбусах, трамвайных вагонах и вагонах метро имеет свои преимущества: отсутствие при работе продуктов сгорания топлива, загрязняющих атмосферу; улучшенный комфорт для пассажиров, достигаемый снижением уровня пола (троллейбус, трамвай), уменьшением шума, современной эргономикой и дизайном; снижение расхода электроэнергии при эксплуатации подвижного состава за счет использования рекуперативного торможения, внедрения современной элементной базы и установки оптимальных законов управления электроприводом; хорошие тягово-динамические характеристики; повышение надежности и долговечности. Поэтому совершенствование электропривода в целом и системы управления тяговым электродвигателем в частности позволит достичь значительной экономии электроэнергии, материальных ресурсов и улучшить состояние окружающей среды.

Непосредственной задачей систем управления является изменение режимов работы тягового электродвигателя (ТЭД), при этом осуществляется подключение ТЭД к контактной сети и отключение от нее водителем или автоматически; плавное или ступенчатое регулирование напряжения, подводимого к двигателям; переключение ТЭД с тяги на торможение и обратно; переключение одного вида торможения на другой (с рекуперативного на реостатное, с реостатного на механическое); выключение тяговых двигателей (переход на выбег режима тяги или торможения); реверсирование направления вращения ТЭД для изменения направления движения; отключение ТЭД при аварийных режимах.

В настоящее время на электрическом подвижном составе (ЭПС) городского пассажирского транспорта применяются системы управления тяговыми электродвигателями постоянного тока (ступенчатая реостатно-контакторная (РКСУ) и бесступенчатая тиристорно-импульсная (ТИСУ) системы управления) и переменного тока (бесступенчатые, используют в силовой цепи запираемые тиристоры GTO (Gate Turn Off) или модули IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, биполярный транзистор с изолированным затвором)).

В ступенчатых (реостатных) системах управления изменение среднего напряжения на двигателях происходит ступенями, причем так, чтобы ток в тяговых двигателях (следовательно, и сила тяги) менялся в заданных пределах от некоторого наименьшего значения до наибольшего. В плавных или бесступенчатых (тиристорно-импульсных, транзисторных) системах изменение среднего напряжения на двигателях происходит плавно или очень малыми ступенями. В таких системах ток и сила тяги в процессе регулирования напряжения поддерживаются практически постоянными.

Реостатно-контакторные системы управления ТЭД получили достаточно широкое распространение благодаря простоте регулирования коллекторного двигателя постоянного тока. Это определило более широкое внедрение такого типа электродвигателей на начальном этапе развития городского электротранспорта. В настоящее время производство ЭПС с такой системой управления сокращается в связи с большим расходом электроэнергии по сравнению с бесконтактными системами управления, ступенчатым изменением тока в ТЭД при разгоне, худшей плавностью хода. Несмотря на перечисленные недостатки, РКСУ является наиболее дешевой и серийно применяется на троллейбусах и трамвайных вагонах с тяговыми двигателями постоянного тока последовательного или смешанного возбуждения.

Плавность хода троллейбуса зависит от величины ступенчатого изменения тока в ТЭД, т. е. от сопротивления и количества реостатов, которые служат для снижения напряжения на ТЭД и изменения поля возбуждения последовательной и параллельной обмоток тягового двигателя. Принцип работы РКСУ подробно рассмотрен в [1–3].

Прогресс в области полупроводниковых технологий сделал силовые управляемые элементы (тиристоры и транзисторы) надежными и мощными коммутаторами. Они имеют сравнительно большой срок службы, высокий КПД, небольшие габариты и массу. Управляемые элементы позволяют подводить напряжение к тяговому двигателю короткими импульсами, при этом колебания тока в ТЭД значительно уменьшаются по сравнению с реостатным пуском. Применение импульсного регулирования дает возможность практически полностью устранить потери в пусковых и тормозных реостатах и осуществлять рекуперацию электроэнергии в контактную сеть почти до полной остановки троллейбуса. Вследствие значительной экономии электроэнергии (до 30–40 % расходуемой) заметно снижается нагрузка тяговых подстанций в часы «пик», благодаря чему повышается надежность всей городской транспортной сети. Системы бесконтактного управления позволяют упростить режимы вождения, повысить общее быстродействие схемы, что наряду с возрастанием надежности электрооборудования способствует повышению безопасности движения.

Некоторое время применение силовой электроники для регулирования частоты вращения электроприводов ЭПС сдерживалось относительно малыми значениями токов, напряжений и частот переключений силовых полупроводниковых приборов и ограничением сложности алгоритмов управления, реализуемых в аналоговой форме или на цифровых микросхемах.

Появление тиристоров достаточной мощности позволило создать статические преобразователи для электропривода постоянного тока. Однако необходимость принудительного закрывания тиристоров по силовой цепи существенно усложняла создание автономных инверторов для частотно-управляемого электропривода переменного тока. Появление запираемых тиристоров GTO (Gate Turn Off) позволило создать преобразователи без коммутирующих цепей и значительно повысить надежность и экономичность привода. Однако запираемые тиристоры обладают рядом серьезных недостатков: применение довольно сложных и мощных устройств для управления, большие потери энергии на переключение, худшие частотные свойства. Данные недостатки были устранены при разработке мощных управляемых полевых транзисторов

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) и биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), что привело к бурному развитию преобразовательной техники и постоянному расширению сферы применения асинхронных электроприводов с преобразователями частоты. Другим фактором, обусловившим возможность массового внедрения частотно-управляемого электропривода, было создание однокристалльных микроконтроллеров достаточной вычислительной мощности.

К концу 70-х гг. в силовых преобразователях электрического подвижного состава были применены традиционные тиристоры SCR (Silicon Controlled Rectifier), которые заменили существовавшее до этого реостатное регулирование скорости тягового двигателя постоянного тока. В дальнейшем в силовых преобразователях ЭПС нашли применение тиристоры GTO, служащие для регулирования скорости асинхронных трехфазных электродвигателей переменного тока.

Тиристорно-импульсная система управления (ТИСУ) обеспечивает регулирование напряжения двигателя подачей на него импульсного напряжения постоянной амплитуды, ширина и/или частота которого может меняться по требуемому закону. Изменение среднего напряжения на ТЭД происходит плавно (очень малыми ступенями, величиной которых можно пренебречь). ТИСУ на основе SCR и GTO тиристоров применяется серийно на троллейбусах и трамваях отечественного и зарубежного производства с тяговыми двигателями постоянного тока последовательного или смешанного возбуждения либо асинхронными трехфазными двигателями переменного тока. Принцип работы ТИСУ троллейбусов рассмотрен в [1–3].

На рис. 1 приведена механическая характеристика тягового двигателя постоянного тока ДК-213 (троллейбус АКСМ-201, ПО «Белкоммунмаш», Беларусь), для которого характерны следующие зоны. В зоне I разгон троллейбуса осуществляется с поддержанием постоянного момента $M = \text{const}$ за счет регулирования напряжения якоря $U_a = \text{var}$. При этом магнитный поток тягового двигателя является полным и не регулируется $\Phi = \text{const} = \Phi_{\text{ном}}$.

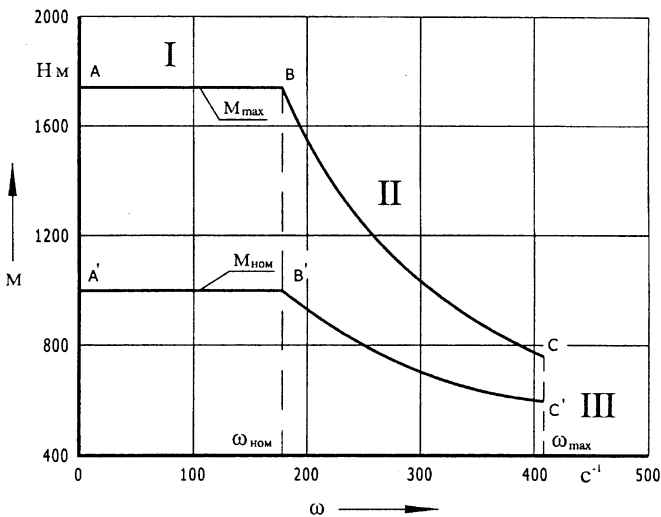


Рис. 1

После повышения напряжения на якоре двигателя до величины входного напряжения контактной сети (номинального напряжения двигателя) дальнейший рост его недопустим. Поэтому двигатель переходит во II зону регулирования, в которой изменение его скорости осуществляется за счет регулирования магнитного потока. При плавном уменьшении магнитного потока двигателя возрастает скорость вращения якоря. В этом случае регулирование осуществляется при постоянстве мощности $P = \text{const}$ (так как $U_{\text{я}} = \text{const}$; $I_{\text{я}} = \text{const}$), $\Phi = \text{var}$ (зона II).

III зона характеристики ($V = V_{\text{max}}$; $U_{\text{я}} = U_{\text{я ном}}$; $\Phi = \Phi_{\text{min}}$) для троллейбуса АКСМ-201 предусматривает ограничение максимальной скорости движения троллейбуса и частоты вращения вала тягового двигателя. Это обеспечивается выравниванием момента двигателя, определяемого максимальной степенью ослабления поля ТЭД и соответственно минимального момента, и момента сопротивления движению, а также ограничением частоты вращения системой управления тягового двигателя. При этом максимальная скорость троллейбуса с наибольшей нагрузкой составляет не менее 55 км/ч, а пустого — не более 65 км/ч, что является допустимым как для двигателя ($V_{\text{max}} = 75$ км/ч), так и для самого троллейбуса (максимальная конструктивная скорость — 65 км/ч).

Применение систем управления с использованием модулей IGBT позволило создать компактные системы управления асинхронными трехфазными электродвигателями, имеющими лучшие по сравнению с ТИСУ эксплуатационные показатели (энергосбережение, снижение расходов на обслуживание и ремонт ТЭД). Использование тяговых асинхронных электродвигателей (в том числе мотор-колес) позволило создать низкопольные троллейбусы с ровным полом по всей длине салона и транспортные средства с гибридной силовой установкой [4, 5]. Это повлияло на создание более гибких транспортных систем в городах разной величины.

В качестве тяговых двигателей переменного тока, получающих питание от контактной сети постоянного тока, применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Как известно, для регулирования скорости таких двигателей необходимо изменять амплитуду и частоту питающего статор напряжения. Для этого применяются специальные преобразователи частоты инверторного типа, которые одновременно являются и преобразователями постоянного тока в переменный.

Рассмотрим подобную систему управления асинхронным тяговым электродвигателем DGT 101, устанавливаемую на троллейбусе АКСМ-333 (ПО «Белкоммунмаш», Республика Беларусь), технические характеристики которой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики системы управления асинхронным тяговым электродвигателем DGT 101

Входное напряжение	600 ⁺¹²⁰ ₋₁₈₀ В
Длительная выходная мощность	220 кВт·А
Максимальная выходная мощность	750 кВт·А, $t < 30$ с
Напряжение питания системы управления	24 ^{+6,0} _{-7,2} В
Вид защиты	IP 00
Виброустойчивость	Согласно норме МЭК77
Охлаждение	Воздушное принудительное
Масса	370 кг

Опишем назначение составных частей привода переменного тока DGT 101 (рис. 2). Датчики DU1 и DT1 служат для измерения соответственно напряжения и тока контактной сети, потребляемого в режиме хода или рекуперированного в режиме торможения.

Диод VD1 исключает возможность подачи на привод напряжения обратной полярности. Тиристор VS1 обеспечивает возможность рекуперации энергии в контактную сеть при превышении напряжения на фильтровом конденсаторе C1, измеряемого датчиком напряжения DU2, по отношению к контактной сети. Резистор R1 необходим для обеспечения аварийного разряда фильтрового конденсатора C1 при отключении троллейбуса от контактной сети. Контактторы K1 и K2 служат для коммутации входного напряжения. Резистор R2 обеспечивает ограничение тока заряда фильтрового конденсатора C1. Силовые транзисторы V1–V6 формируют напряжение питания тягового двигателя M1. Силовой транзистор V7 обеспечивает сброс избыточной энергии на тормозной реостат R3. Датчики тока DT2 и DT3 измеряют ток фаз A и C тягового двигателя соответственно, а датчики напряжения DU3 и DU4 – линейные напряжения U_{AB} и U_{BC} тягового двигателя. Драйверы, служащие для управления IGBT транзистором, обеспечивают управление силовыми ключами, а также осуществляют контроль за их состоянием. В качестве тягового электродвигателя используется трехфазный асинхронный двигатель 2ML3550 K/4 фирмы ŠKODA. Импульсный датчик скорости BV1, установленный на валу ТЭД, служит для получения информации, необходимой для управления тяговым двигателем, вычисления скорости и ускорения движения троллейбуса.

Педали хода и торможения имеют по 15 позиций. При этом следует отметить, что пневматический тормозной привод включается при перемещении тормозной педали выше 12 позиции.

Все сигналы, поступающие в привод или выводимые из него, имеют гальваническую развязку, которую обеспечивают блоки гальванической развязки логических входных и выходных сигналов, блоки гальванической развязки аналоговых входных сигналов. Первичная обработка сигналов с датчика скорости производится в блоке датчика скорости. Обмен информацией с блоком центрального процессора осуществляется через блоки ввода–вывода логической и аналоговой информации.

Блок управления содержит три управляющих блока: центрального процессора, управления тяговым двигателем и управления и оптической развязки драйверов. Блок центрального процессора выполняет следующие функции: объединение в единое целое всех блоков системы управления (управление системой управления в целом), сбор информации о всей системе, анализ полученной информации, выдача управляющих воздействий на привод, обеспечение диагностики привода, хранение индивидуальных настроек и параметров системы, часы реального времени, ведение и хранение статистических данных.

По исходным данным (информация с датчиков тока DT2 и DT3, напряжения DU3 и DU4, импульсного датчика скорости BV1, встроенного в ТЭД датчика температуры DTEM) блок вычисляет электромагнитный момент ТЭД, который поддерживается равным заданному моменту, поступающему с блока центрального процессора. Блок управления тяговым двигателем формирует управляющие сигналы на блок управления и оптической развязки драйверов.

Блок управления и оптической развязки драйверов обеспечивает формирование сигналов на драйверах силовых ключей V1–V7, VS1, получает и анализирует информацию о их состоянии (напряжение питания драйвера, наличие короткого замыкания в цепи силового ключа и т. д.), обеспечивает гальваническую развязку между цепями питания драйверов и системы управления.

Блок аппаратного контроля работы привода обеспечивает аппаратный (не программный) контроль за состоянием привода. При этом также контролируются недопустимые комбинации входных и выходных сигналов. В случае их возникновения блок выдает сигнал, блокирующий работу привода.

На рис. 3 приведена полученная экспериментальным путем механическая характеристика тягового асинхронного электродвигателя 2МЛ3550 К/4 мощностью 185 кВт, которым управляет цифровая система на транзисторах IGBT. На начальной стадии разгона происходит ограничение тягового момента до определенной величины. Дальнейшее увеличение скорости осуществляется исходя из условия постоянства мощности до максимальной частоты вращения вала тягового двигателя. Анализ характеристик (рис. 1 и 3) ТИСУ и системы управления на IGBT модулях показывает их качественное сходство, что позволяет судить о возможности обеспечения требуемой тяговой характеристики как для тягового двигателя постоянного, так и для ТЭД переменного токов.

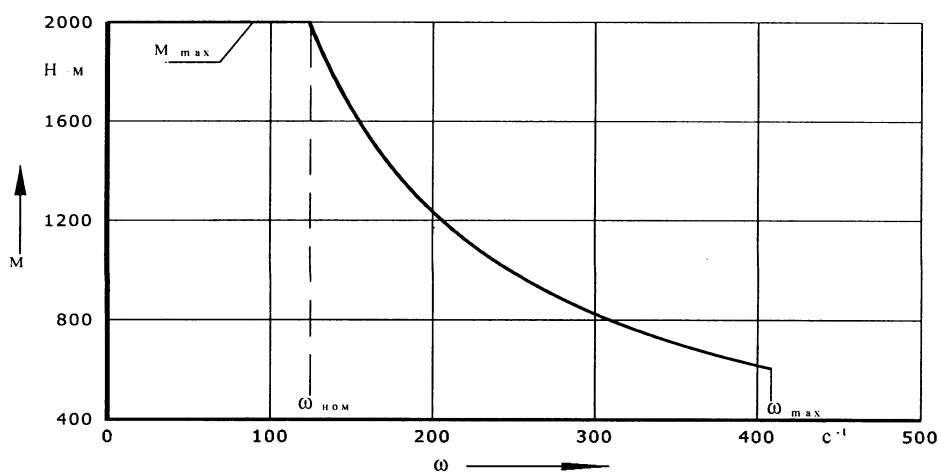


Рис. 3

Применение тиристоров и транзисторных модулей IGBT позволяет создать преобразователи, решающие ключевые проблемы электротяги, обеспечивающие высокий КПД во всех режимах работы, высокое качество и плавность регулирования скорости. Существует возможность получить практически любую требуемую бесступенчатую пусковую характеристику троллейбуса. Особенностью использования систем на основе транзисторов IGBT является применение на современных троллейбусах асинхронных трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором. При данном способе управления тяговым двигателем исключаются

основные потери энергии при разгоне и торможении по сравнению с РКСУ.

Согласно проведенным экспериментальным и теоретическим исследованиям троллейбус в режиме городского цикла движется с частыми разгонами в среднем до 40–50 км/ч и последующими торможениями до остановки в среднем за 35–60 с. Система управления тяговым электродвигателем с применением транзисторов IGBT позволяет рекуперировать при определенных условиях до 90 % кинетической энергии троллейбуса при торможении тяговым двигателем практически до полной остановки, что выражается в дополнительной экономии электроэнергии до 15 % (в среднем на 5–7 % больше, чем аналогичный показатель у тиристорно-импульсной системы управления с ТЭД постоянного тока). Показатель удельного расхода электроэнергии для этих двух систем при разгоне троллейбуса практически одинаков. Таким образом, общая экономия электроэнергии составляет до 30 % для троллейбусов с ТИСУ и до 40 % – для троллейбусов с системой управления на IGBT транзисторах по сравнению с РКСУ. Это подтверждается приведенными на рис. 4 графиками потребления энергии для троллейбусов с различными системами управления ТЭД и рассчитанными показателями среднегодового расхода электроэнергии.

Расход электроэнергии	РКСУ	ТИСУ	Система управления на IGBT транзисторах с ТЭД переменного тока
	100 %		Экономия, %
		20–30	20–30
70 %			Дополнительная экономия при рекуперативном торможении до 12 %
58 %	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/км		
	3,559	2,850	2,660
	Средний годовой расчетный расход электроэнергии, кВт·ч		
	142360	114000	106400

Таким образом, с возрастанием требований к электроприводу в целом по таким показателям, как надежность, точность, быстродействие, эффективность, ресурсоемкость, экономичность появляется необходимость совершенствования всех его составляющих, наблюдается тенденция использования мотор-колес на подвижном составе [4, 5], что в первую очередь может быть достигнуто за счет более эффективного способа управления силовым преобразователем, т. е. применения ТИСУ и систем управления тяговыми электродвигателями переменного тока с ис-

пользованием транзисторов IGBT. С помощью этих систем можно получать требуемые бесступенчатые электрохимические характеристики ЭПС. Кроме того, использование транзисторов IGBT позволяет создать компактные системы управления асинхронными трехфазными электродвигателями, имеющие лучшие по сравнению с ТИСУ технико-эксплуатационные показатели (высокая плотность тока, доступная только в биполярном транзисторе, простота и экономичность управления транзисторами, легкость параллельного соединения нескольких транзисторов для работы на общую нагрузку, снижение расходов на обслуживание и ремонт ТЭД). Использование тяговых асинхронных электродвигателей, в свою очередь, позволяет создавать низкопольные троллейбусы с ровным полом по всей длине салона и транспортные средства с гибридной силовой установкой. Однако достаточно высокая стоимость систем управления на IGBT транзисторах все еще остается основным недостатком. В дальнейшем, учитывая ряд перечисленных достоинств подобных систем, можно ожидать повышения спроса, что обеспечит рост производства и снижение стоимости.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Е ф р е м о в И. С., К о с а р е в Г. В. Теория и расчет троллейбусов. — М.: Высш. шк., 1981. — Ч. 1 и 2.
2. К о г а н Л. Я., К о р я г и н а Е. Е., Б е л о с т о ц к и й И. А. Устройство и эксплуатация троллейбуса.— М.: Высш. шк., 1978.
3. Т р о л л е й б у с ы: Устройство и техническое обслуживание / Н. В. Богдан, Ю. Е. Атаманов и др.; Под ред. Н. В. Богдана. — Мн., 1997.
4. С а ф о н о в А. И., М а з а н и к К. И. Тенденции развития энергосберегающего тягового привода городского пассажирского транспорта // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1998. — № 6. — С. 37—45.
5. П е р с п е к т и в н ы е направления развития городского рельсового электрического транспорта / Н. В. Богдан, В. П. Николаев, А. И. Сафонов.— Мн.: Ураджай, 1999.

Представлена кафедрой
гидропневмоавтоматики
и гидропневмопривода

Поступила 2.11.2000