

9. Чаплыгин Е.Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учеб. пособие. Москва: МЭИ, 2009.

Томасов Валентин Сергеевич — заведующий кафедрой электротехники и прецизионных электромеханических систем национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, доцент, канд. техн. наук. Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики в 1967 г. Защитил диссертацию по теме «Входные силовые фильтры транзисторных широтно-им-

пульсных преобразователей систем электропривода» в 1986 г.

Усольцев Александр Анатольевич — доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, канд. техн. наук. Окончил Северо-Западный заочный политехнический институт в 1973 г. Защитил диссертацию по теме «Исследование и разработка системы маловентильный полупроводниковый преобразователь-асинхронная машина» в 1982 г.

Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением

КОЗАЧЕНКО В.Ф., ОСТРИРОВ В.Н., ЛАШКЕВИЧ М.М.

Рассматриваются перспективы и опыт применения вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением для тягового электропривода. Возможность регулирования возбуждения позволяет приводу работать в широком диапазоне частот вращения при постоянстве мощности, при этом машина технологична и проста в изготовлении, а для управления подходит классический трехфазный инвертор.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением, тяговый привод, электротрансмиссия.

Для тягового применения в настоящее время используются различные двигатели переменного тока вместе с соответствующими силовыми преобразователями. Классические двигатели постоянного тока также все еще имеют свою нишу, но уже большей частью по историческим причинам, а не из-за технической целесообразности. Сравнивая различные электродвигатели переменного тока с точки зрения применения в электротяге, можно выделить следующие преимущества и недостатки каждого из типов двигателей:

Асинхронный двигатель относительно прост, надежен, дешев, очень хорошо исследован и освоен в производстве. Имеет проблемы с отводом тепла от ротора, обладает не лучшими массогабаритными показателями.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами имеет лучшие массогабаритные показатели, КПД. Хорошо исследован. Дорог и сложен в производстве, существует проблема надежного крепления магнитов при больших частотах вращения. Малая зона постоянства мощ-

It is considered application perspectives switched reluctance drive with independent external excitation for the traction electric drive. Possibility of regulation of excitation allows such drive to work in wide range of speeds at persistence of capacity, thus the machine is technological and simple in manufacture, and for control the classical three-phase inverter approaches.

Key words: perspectives switched reluctance drive with independent external excitation, traction electric drive.

ности, существует риск перенапряжений при отключении преобразователя в зоне искусственного ослабления поля.

Вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением (SRD) — самый простой, дешевый и технологичный в изготовлении, имеет хорошие массогабаритные показатели, большую зону постоянства мощности, хорошо изучен. Так как у него однополярное питание, требует специализированного силового преобразователя. Имеет заметные пульсации момента и вибрацию, с которыми разработчики борются различными методами.

Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением (ВИД НВ) — дешев, имеет хорошие массогабаритные показатели, большую зону постоянства мощности, малые пульсации момента. Относительно сложен в сборке (при использовании так называемой опущенной обмотки возбуждения [1]).

Из данных сравнительных характеристик видно, что ВИД НВ интересен для применения в качестве недорогого тягового электро-

привода. Большая зона постоянства мощности за счет наличия независимого возбуждения, отсутствие пульсаций момента при векторном управлении и распределенной обмотке статора делают его особенно привлекательным для тягового применения. Несмотря на это авторам неизвестны случаи применения ВИД НВ в электротяге, хотя примеров использования других типов двигателей достаточно. Данная статья описывает принцип действия ВИД НВ, его системы управления, опыт построения электротрансмиссии на его основе.

Принцип действия и конструкция ВИД НВ

ВИД НВ также известен как одноименно-полюсный индукторный двигатель с аксиальным возбуждением и уже рассматривался во многих работах [2, 3]. Свойства данной машины приближены к классической синхронной машине с возбуждением со стороны ротора и скользящим контактом. Однако конструктивно в рассматриваемой машине обмотка возбуждения расположена на статоре, а скользящий контакт отсутствует. На рис. 1 схематично показана геометрия ротора и магнитный поток обмотки возбуждения, а на рис. 2 изображено взаимодействие магнитных потоков статора и ротора, при этом ротор установлен в согласованное положение (момент равен нулю).

Машина собрана из двух пакетов, между которыми установлена обмотка возбуждения, крепящаяся к статору. Зубцы ротора и статор выполнены из шихтованного железа, постоянные магниты отсутствуют. Обмотка статора распределенная (существуют варианты такого типа машин с сосредоточенной обмоткой [1]), трехфазная. Витки обмотки статора охватывают сразу оба пакета машины. Упрощенно

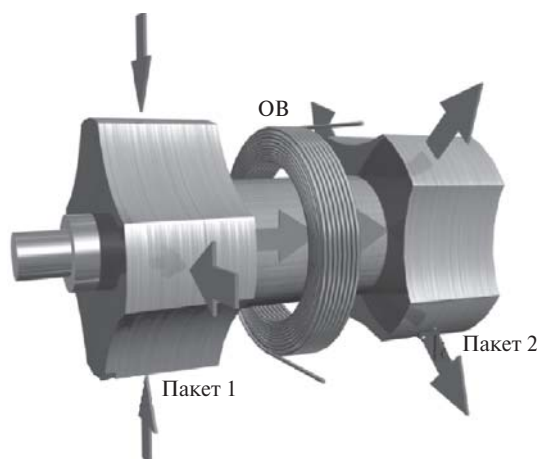


Рис. 1. Геометрия ротора и магнитный поток обмотки возбуждения

принцип работы можно описать следующим образом: ротор стремится повернуться в такое положение, при котором направления магнитного потока в статоре и роторе совпадут. При этом половина электромагнитного момента образуется в одном пакете, а половина – в другом. Следует отметить, что машина подразумевает разнополярное питание, электромагнитный момент активный и образован за счет взаимодействия поля, созданного током обмотки возбуждения с полем, созданным обмотками статора. Реактивный момент пренебрежимо мал, несмотря на явнополюсный ротор. По принципу работы эта машина отличается от классических SRD двигателей, в которых момент реактивный. С точки зрения управления машина эквивалентна синхронной машине с контактными кольцами. Таким образом, вентиляно-индукторный двигатель с независимым возбуждением обладает следующими преимуществами:

- отсутствие скользящего контакта;
- простота и технологичность конструкции;
- управляемое возбуждение;
- отсутствие перемагничивания ротора, а следовательно, и отсутствие потерь в нем;
- возможность применения для управления машиной классического векторного управления;
- использование стандартного трехфазного инвертора в управляющем преобразователе;
- отсутствие риска повреждения инвертора из-за возникновения завышенной ЭДС двигателя при работе в зоне ослабления поля (в синхронной машине с постоянными магнитами такой риск есть).

Несмотря на обилие преимуществ, ВИД НВ имеет ряд недостатков. В данном типе двигателей следует применять специальные меры для предотвращения замыкания магнитного потока возбуждения по подшипниковым щи-

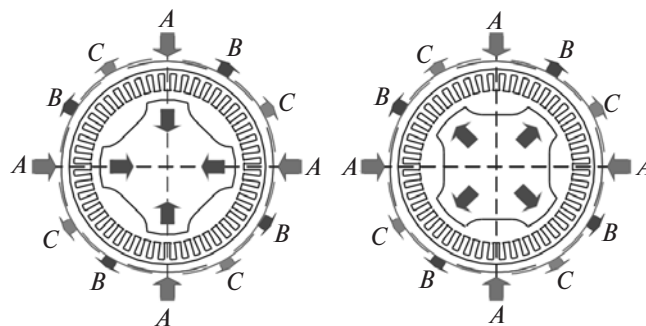


Рис. 2. Взаимодействие магнитных потоков статора и ротора: ротор установлен в точку синхронизации (нулевой момент)

там в обход магнитопровода статора [1]. Также существует проблема, связанная с отводом тепла от обмотки возбуждения, расположенной между пакетами ротора, — площади контакта её со статором может быть недостаточно. Требуется принимать специальные конструктивные меры для улучшения теплоотдачи либо для уменьшения потерь в обмотке. Эти недостатки могут быть конструктивно устранены при дальнейшем развитии данного привода.

Система управления ВИД НВ

Рассмотрим построение системы управления для ВИД НВ на базе инвертора напряжения с микропроцессорным управлением. В тяговом применении наиболее рационально управлять моментом привода, причем желательно обеспечивать малое время реакции на изменение задания для возможности реализовать тяговым приводом интеллектуальные системы помощи водителю, такие как антиблокировочная и противобуксовочная системы. Для управления моментом можно выделить две наиболее подходящих структуры.

1. Вентильное управление с автокоммутацией по датчику положения ротора.

Преимущества:

— простота реализации, от системы управления требуется только блок включения фаз в зависимости от угла положения ротора и блок токоограничения;

— хорошая динамика контура тока; за счет релейного управления токами фаз время отработки задания тока очень мало и ограничивается лишь физическим процессом нарастания тока, а не инерционностью системы управления (по сравнению с ПИ-регулятором и ШИМ).

Недостатки:

— неоднозначность настройки углов коммутации и уровня тока от частоты вращения и нагрузки; известно, что угол включения и выключения фазы можно настраивать по совершенно различным методикам — одни направлены на уменьшение шума, другие на уменьшения уровня тока, третьи на улучшение КПД, причем углы коммутации для обеспечения выбранного оптимума должны изменяться как от частоты вращения (классически), так и от нагрузки; вычисление или экспериментальное определение таких зависимостей представляет собой сложную задачу;

— шум и большие пульсации тока, при ограниченных быстродействии системы управле-

ния и частоте коммутации силовых ключей инвертора релейное поддержания токов фаз обычно приводит к увеличенным пульсациям тока в обмотках и шуму по сравнению с применением ШИМ.

2. Векторное датчиковое управление с ПИ-регуляторами тока и ШИМ.

Преимущества:

— линейность и однозначность настройки, по сравнению с режимом автокоммутации не требуется подбирать сложные нелинейные зависимости для обеспечения оптимальной работы;

— изменяемая частота ШИМ позволяет минимизировать шум и пульсацию тока; на высоких частотах вращения привода частота тока может достигать 500 Гц и выше; для качественного формирования синусоидального тока частота ШИМ при этом должна быть на порядок выше; современные IGBT-ключи легко позволяют получить частоту коммутации 10 кГц при относительно невысоких токах; при низкой частоте вращения, наоборот, требуемая частота ШИМ невысока, однако уровень тока для обеспечения требуемого на валу момента должен быть большим; чтобы снизить потери в преобразователе, рационально снижать частоту ШИМ на больших токах, обеспечивая оптимум между шумом, пульсациями тока и потерями в преобразователе, кроме того, рационально применять специальные алгоритмы векторной ШИМ для снижения потерь в инверторе [4].

Недостатки:

— уменьшение устойчивости на высоких частотах вращения, при повышении частоты тока в приводе становятся сильнее заметны задержки в системе управления — задержка АЦП по измерению токов, задержка ШИМ при воспроизведении заданного напряжения, задержка в модуле датчика положения, задержка на расчет процессором структуры управления и т.п.; все эти задержки вызывают искажение фазы векторов, с которыми работает система векторного управления, и уменьшают устойчивость, кроме того, с ростом частоты усиливается взаимосвязь между осями d и q , что также отрицательно сказывается на устойчивости.

Обобщая все преимущества и недостатки обеих систем управления, можно заключить, что векторная система управления более современна и перспективна для ВИД НВ.

Векторная система управления позволяет регулировать моментобразующий ток статора I_q , а также ток по оси возбуждения I_d . Но у ВИД НВ имеется еще контур возбуждения, задание тока которого требуется связать с заданием момента. Обратимся к рис. 3, где показана зависимость момента ВИД НВ от тока статора и тока возбуждения.

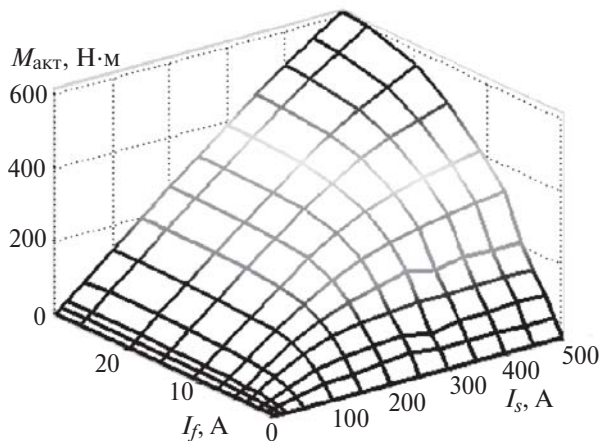


Рис. 3. Зависимость электромагнитного момента ВИД НВ от амплитуды тока статора I_s и тока возбуждения I_f при оптимальной фазе тока статора

Из рис. 3 видно, что токи статора и возбуждения нужно изменять совместно, тогда момент увеличивается пропорционально произведению токов. Увеличение одного тока без увеличения другого не приводит к росту момента из-за особенностей магнитной системы ВИД НВ. Таким образом, система управления должна согласованно изменять задания тока I_q векторной структуры и тока I_f контура управления возбуждением, рассчитывая их из задания момента.

Дополнительная задача, решаемая системой управления — расширение диапазона регулирования частоты вращения вверх за счет управления током по оси d . Согласно линейной математической модели синхронного двигателя (которая в определенных пределах справедлива и для ВИД НВ), ток I_d не влияет на момент двигателя, однако создание отрицательного тока по оси d позволяет уменьшить прикладываемое к двигателю напряжение, не уменьшив при этом момент. Значит при нехватке напряжения на инверторе на высокой частоте вращения создание отрицательного тока по оси d позволит реализовать заданный момент, несмотря на первоначальную нехватку напряжения. Такой метод называется ослаблением поля двигателя током статора и успешно применяется для синхронных машин с посто-

янными магнитами, для которых этот метод является единственно возможным при работе на высокой частоте вращения. Для ВИД НВ этот метод нужен лишь для увеличения максимальной мощности в зоне высоких частот вращения. Таким образом, в систему управления двигателем необходимо включить блок, создающий задание на ток I_d векторной структуры управления при нехватке напряжения на инверторе.

Экспериментальные исследования

Для проведения испытаний тяговых ВИД НВ и электротрансмиссии на их основе были изготовлены несколько экземпляров двигателей мощностью 35 кВт. При лабораторных испытаниях на заводе-изготовителе была экспериментально подтверждена теоретическая зависимость момента от токов статора и возбуждения (рис. 3), получено практически полное совпадение с теоретическим расчетом.

После прямо-сдаточных испытаний восемь образцов данных двигателей были установлены на макетный образец транспортного средства для комплексного испытания электротрансмиссии на их основе. Параметры макетного образца: масса 22 т, индивидуальный привод колес (восемь двигателей ВИД НВ по 35 кВт каждый, ДВС мощностью 300 кВт), приводящий во вращение генератор типа ВИД НВ с сосредоточенными обмотками, молекулярный накопитель энергии, служебные источники питания. Двигатели установлены в корпусе транспортного средства, вращение на колеса передается через карданную передачу. На рис. 4 графически показана схема электротрансмиссии (гибридной трансмиссии) макетного образца.

В процессе испытаний получены следующие результаты [5]:

- макетный образец достиг максимальной скорости 97 км/ч;
- преодолен подъем 30° на бетонном покрытии;
- успешно проверены все специальные режимы — движение «от молекулярного накопителя» с заглушенным ДВС, запуск ДВС от генератора, режим «торможения дизелем», накопление энергии торможения в молекулярный накопитель.

По результатам ходовых испытаний построена тяговая характеристика двигателей, показанная в сравнении с заданной на рис. 5. Следует отметить, что экспериментальная ха-

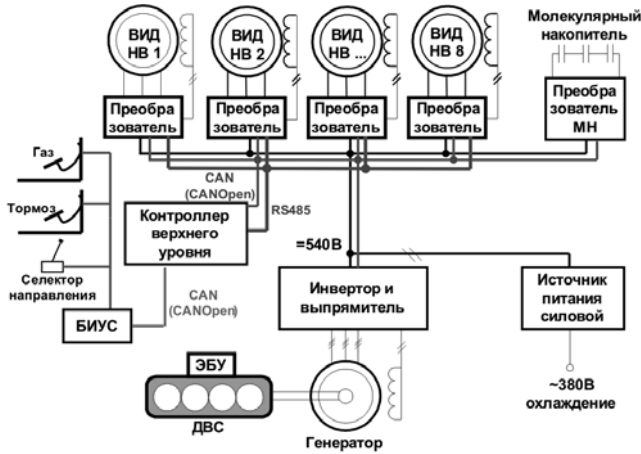


Рис. 4. Схема электротрансмиссии (гибридной трансмиссии) макетного образца

рактическая характеристика в некоторой зоне проходит ниже заданной вследствие ограниченной мощности источника питания (дизель-генератора), а не ограничений двигателя или преобразователя. Большой максимальный момент достигнут благодаря увеличению токов на 10% по сравнению с расчетными, так как номинального момента не хватало для преодоления подъема 30° из-за сильной пробуксовки передних четырех колес. Диапазон работы в зоне постоянства мощности составил 10:1.

На рис. 6 представлена одна из осциллограмм, в которой комплексно продемонстри-

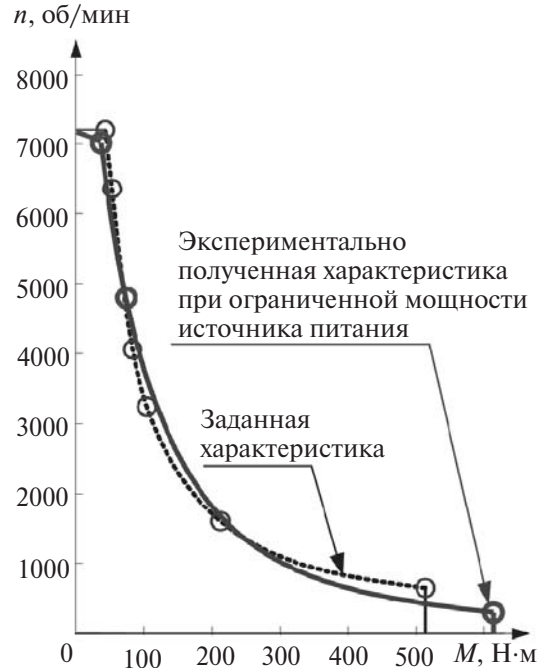


Рис. 5. Экспериментально полученная тяговая характеристика ВИД НВ 35 кВт при питании от источника ограниченной мощности в сравнении с заданной

рована работа всей электротрансмиссии. На ней происходит разгон макетного образца до 60 км/ч и последующее электрическое и механическое торможение. В верхней части рисунка приведены частоты вращения тяговых двигателей, мощности, токи статора и возбуждения, текущий момент. При этом графики всех

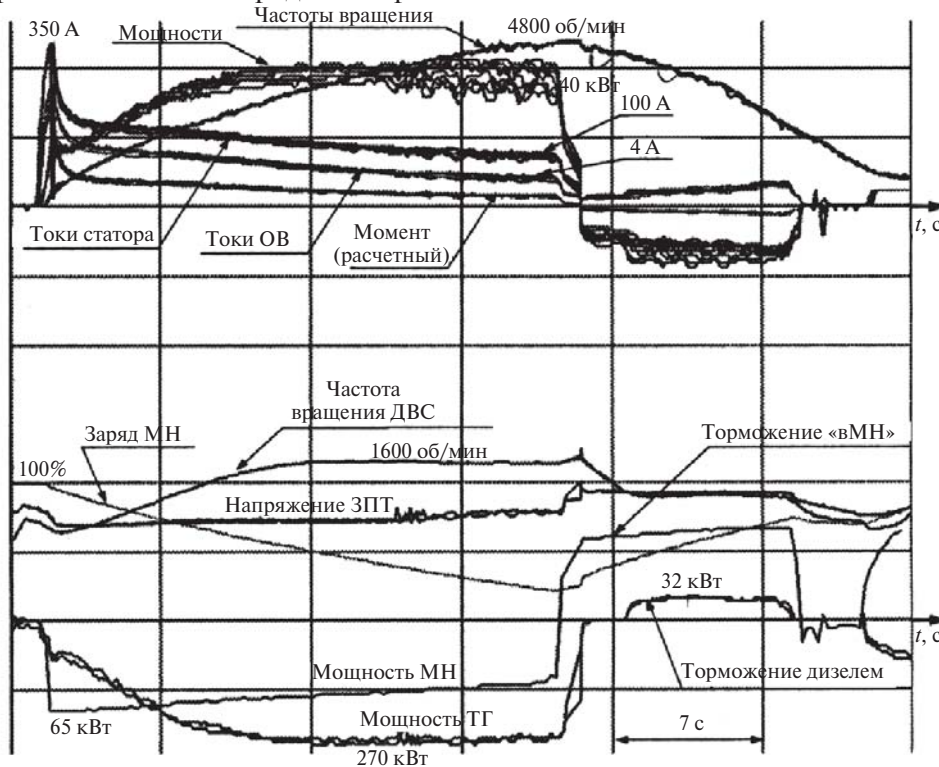


Рис. 6. Осциллограмма разгона макетного образца и последующее торможение

8 двигателей наложены друг на друга. На нижней части осциллограммы приведена частота вращения ДВС, заряд молекулярного накопителя в процентах, напряжение на звене постоянного тока, мощность молекулярного накопителя, мощность тягового генератора.

При разгоне мощности накопителя и генератора отрицательны, что говорит об отдаче ими энергии, а мощность двигателей положительна, что говорит о потреблении энергии. Мощность накопителя составляла 65–70 кВт, генератора 265–270 кВт. При торможении знаки мощности меняются — двигатели отдают энергию, накопитель и генератор принимают энергию. При этом накопитель мгновенно переходит из режима отдачи энергии в режим приема, а генератор, из-за инерционности контура возбуждения, сначала плавно снижает отдаваемую мощность, а затем переходит в двигательный режим. При этом мощность приема энергии накопителем составляет 65 кВт, а генератора 32 кВт рассеиваемой в ДВС мощности.

Следует особо отметить, что преодоление 30-градусного подъема не было бы возможно без качественной противобуксовочной системы, реализованной в контроллере верхнего уровня. Частоту цикла опроса скорости/задания момента между контроллером верхнего уровня и всеми приводами колес удалось поднять до 500 Гц при использовании выделенного интерфейса связи RS485 для этой задачи. Вместе с векторной системой управления, оперативно обрабатывающей заданный момент, это позволило реализовать специальные алгоритмы управления проскальзывающими колесами, удерживая их на границе проскальзывания и используя для создания тяги всё, что может дать сцепление с дорогой конкретного колеса.

Кроме положительных результатов испытаний можно выделить и обнаруженные недостатки. Изменение аксиального потока возбуждения ВИД НВ вызывает вихревые токи в нешихтованной части магнитопровода машины (вал, корпус), которые препятствуют изменению этого потока. В результате регулирование потока ВИД НВ обмоткой возбуждения осуществляется не так быстро, как хотелось бы — постоянная времени изменения потока для ВИД НВ 35 кВт составляет около 0,3 с. Быстрое изменение потока машины может требоваться только для работы антиблокировочной и противобуксовочной систем помощи водителю, когда, в зависимости от сцепления колеса

с дорогой контроллер верхнего уровня релейно изменяет задание момента от нулевого до полного. При этом ВИД НВ оперативно обрабатывает сброс момента за счет быстрого уменьшения тока статора, но долго — нарастание момента, если поток машины уже успел сильно упасть. Однако применение специальных непрерывных алгоритмов АБС/ПБС вместо классических релейных позволяет избежать необходимости работы привода в режиме «полный момент/нулевой момент», в результате чего затяжное регулирование потока возбуждения двигателя перестает быть заметным.

Более серьезную проблему представляет затяжное регулирование потока генератора. В данном макетном образце генератор также вентильно-индукторный с независимым возбуждением и имеет те же свойства контура возбуждения. Генератор работает на неуправляемый выпрямитель, выпрямленное напряжение регулируется как частотой вращения ДВС, так и током возбуждения генератора. Вследствие мягкой внешней характеристики генератора при резком сбросе нагрузки (водитель резко отпустил педаль газа) напряжение в звене постоянного тока начинает расти до точки ХХ внешней характеристики, которая может быть на 30–40% выше по напряжению, чем номинальная точка под нагрузкой. При этом рост напряжения, продолжающийся около 20 мс, нельзя остановить ни управлением током возбуждения из-за инерционности изменения потока машины, ни, тем более, изменением частоты вращения ДВС. Решением проблемы является использование тормозных резисторов или молекулярного накопителя, которые примут на себя избытки энергии генератора при сбросе нагрузки. Несмотря на указанную проблему, вентильно-индукторный генератор имеет одно важное преимущество, помимо дешевизны, перед генератором на постоянных магнитах (традиционного для данных задач). За счет регулировки выходного напряжения контуром возбуждения, частота вращения ДВС может задаваться всегда оптимальной для текущей потребляемой мощности, в отличие от нерегулируемого генератора, где напряжение зависит только от частоты вращения. Это свойство генератора, вместе со специальными алгоритмами управления частотой вращения ДВС, позволило добиться высокой топливной экономичности макетного образца.

Выводы

1. Вентильно-индукторные двигатели с независимым возбуждением позволили макетному образцу реализовать все требования, обеспечивая заданную тяговую характеристику. ВИД НВ с разработанной системой управления показывает себя как перспективный тяговый электропривод переменного тока. Как объект управления ВИД НВ также удобен по сравнению с другими типами электродвигателей: независимое управление током статора и током возбуждения позволяет получить широкую зону постоянства мощности. Экспериментальные данные по испытаниям двигателей оказались близки к теоретическим. Это говорит о хорошей расчетной базе конструкторов двигателей, а значит об уверенности в возможности проектирования двигателей другой конфигурации.

2. Разработанная система управления ВИД НВ также работоспособна и проверена экспериментально на макетном образце транспортного средства. Все заложенные идеи — векторная система управления двигателями, пропорциональное изменение тока статора и тока возбуждения, взаимосвязанная работа устройств трансмиссии, управление моментом каждого двигателя от контроллера верхнего уровня — нашли свое экспериментальное подтверждение.

3. Имеет смысл продолжать исследования в этой области: экспериментально получить тяговую характеристику ВИД НВ на лабораторном стенде, точно вычисляя КПД двигателя и преобразователя во всех точках, найти оптимальное соотношение тока статора и тока возбуждения, провести тепловые испытания и т.п. С точки зрения улучшения системы управления стоит приложить усилия для синтеза бездатчикового векторного управления

двигателями с возможностью определения положения ротора вплоть до нулевой частоты вращения — как этого требует тяговый привод. Исключение датчика положения значительно повысило бы надежность привода.

Список литературы

1. Алямкин Д.И. Разработка и исследование двухфазного вентильно-индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д.И. Алямкин. М., 2011.
2. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Русаков А.М., Дроздов А.В., Сорокин А.В., Крылов Ю.А. Новое направление в электроприводе — мощный многосекционный вентильно-индукторный электропривод с векторным управлением // Электронные компоненты. Электропривод. 2006. №11. С. 30–35.
4. Русаков А.М. Разработка вентильных электродвигателей на базе магнитных систем индукторных машин.: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / А.М. Русаков. М., 1982.
5. Ануцин А.С. Широтно-импульсная модуляция методом реализации мгновенных фазных потенциалов для трехфазных инверторов напряжения // Труды V Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2007. СПб, 2007. С.263–265.
6. http://rosinform.ru/2013/07/17/konstruktory-vpk-sozdali-shassi-krymsk-s-gibridnoy-energoustanovkoy-dlya-perspektivnogo-bronetransportera_01/

Козаченко Владимир Филиппович — генеральный директор ООО «НПФ ВЕКТОР», профессор ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ», доктор техн. наук. Окончил МЭИ в 1976 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Создание серии высокопроизводительных встраиваемых микроконтроллерных систем управления для современного комплектного электропривода» в 2007 г.

Остриров Вадим Николаевич — генеральный директор ООО «НПП Цикл+», профессор ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ», доктор техн. наук. Окончил МЭИ в 1975 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Создание гаммы электронных преобразователей для электропривода на современной элементной базе» в 2003 г.

Лашкевич Максим Михайлович — аспирант кафедры АЭП ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ», инженер-программист ООО «НПФ ВЕКТОР». Окончил МЭИ (ТУ) в 2010 г.

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах:

- полные имена и отчества всех авторов;
- место работы и должность;
- какой факультет, какого вуза, когда окончен;
- тема диссертации и когда защищена.