

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313.3

А. А. Корнеев, А. С. Третьяков, О. А. Капитонов

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ПРИВОДА

UDC 621.313.3

A. A. Karneyeu, A. S. Tretsiakou, O. A. Kapitonov

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SWITCHED RELUCTANCE DRIVE

Аннотация

Рассматриваются перспективы развития вентильно-индукторных приводов (ВИП). В результате анализа публикаций были определены следующие направления развития: совершенствование систем управления; обеспечение работы в аварийном режиме; создание приводов без датчика положения ротора; создание приводов с независимым возбуждением.

Ключевые слова:

вентильно-индукторный привод с самовозбуждением, законы управления, аварийные режимы работы, бездатчиковое управление, вентильно-индукторный привод с независимым возбуждением.

Abstract

The paper considers the prospects for the development of switched reluctance drives (SRDs). As a result of the analysis of publications, the areas of the development were identified, i.e. improving control systems, ensuring emergency operation, developing drives without a rotor position sensor, as well as drives with independent excitation.

Keywords:

switched reluctance motor with self-excitation, control laws, emergency operation modes, sensorless control, switched reluctance motor with independent excitation.

Введение

С развитием силовой электроники конструкторы вновь обратили внимание на вентильно-индукторные приводы (рис. 1), конструкция которых была описана еще в конце 30-х гг. XIX в. [1]. С 1980-х гг. до нашего времени наблюдается значительный рост публикаций на данную тему. Конструкция вентильно-индукторного привода с самовозбуждением включает в себя явнополюсный безобмоточный ротор, выполненный из листов электротехнической стали, явнополюсный статор с обмотками,

датчик положения ротора, преобразователь частоты, систему управления. Интерес к данным приводам вызван простотой их конструкции, высокой надежностью, хорошими массогабаритными показателями, малым моментом инерции, возможностью работы на высоких скоростях, возможностью работы при оборванной фазе. Однако у таких приводов имеется ряд недостатков: невозможность работы без преобразователя; вибрации и пульсирующий момент; наличие датчика положения ротора; отсутствие возможности использования стандартных силовых модулей, разра-



ботанных для существующих двигателей. Развитие вентильно-индукторных приводов (ВИП) заключается в полном

либо частичном устранении недостатков. Цель работы: определение перспектив развития ВИП.



Рис. 1. Вентильно-индукторный привод

Перспективы развития

Можно выделить следующие перспективы развития ВИП:

- совершенствование законов управления;
- обеспечение работы при аварийных режимах;
- создание бездатчиковых систем управления;
- создание приводов с независимым возбуждением.

Совершенствование законов управления

Совершенствование законов управления может позволить уменьшить пульсации момента, улучшить эффективность преобразования энергии. Методы управления ВИП можно разделить

на два вида [2]: управление средним значением момента и управление мгновенным значением момента. Совершенствование законов управления происходит за счет регулирования таких параметров, как напряжение, ток, углы подачи и снятия напряжения с фазы.

Управление средним значением момента подразумевает неконтролируемое изменение момента за время работы фазы. Управление осуществляется за счет регулирования значения токовой отсечки, углов подачи и снятия напряжения с фазы. Оптимизация данного вида управления позволяет уменьшить пульсации момента, увеличить эффективность преобразования энергии.

Суть метода можно рассмотреть на примере микроконтроллерной системы управления ВИП [3]. При запуске и на низких скоростях двигатель работает



в режиме токоограничения. Управление осуществляется за счет регулирования токовой отсечки, углов подачи и снятия напряжения с фазы. На высоких скоростях двигатель работает в одноимпульсном режиме, где управление осуществляется только за счет регулирования углов подачи и снятия напряжения с фазы. Микроконтроллерное управление ВИП может реализовываться с помощью обратной связи по скорости, обратной связи по моменту, комбинированной обратной связи по моменту и скорости. Микроконтроллер также отвечает за запуск двигателя, согласование режимов работы.

Управление мгновенным моментом основано на создании за время работы фазы момента определенной формы, что осуществляется за счет создания тока определенной формы. Оптимизация данного вида управления может использоваться для уменьшения пульсаций момента, для увеличения энергетической эффективности работы двигателя.

Суть управления мгновенным моментом излагается в [4]. В частности, описывается подход к достижению минимального среднеквадратичного значения тока фазы при заданном среднем значении момента. Данный подход основан на поиске оптимальной формы тока, протекающего в фазе, при заданной выходной мощности и скорости, а также при ограниченном напряжении питания и ограниченном максимальном значении тока. Моделирование показывает, что применение такого метода позволяет значительно увеличить среднее значение момента на низких скоростях, не увеличивая потребление энергии. Негативным фактором является возрастание уровня пульсаций.

Обеспечение работы при аварийных режимах

В ряде случаев, например во время полета самолета, нет возможности для

проведения ремонта вышедшего из строя оборудования. В такой ситуации высоко ценится возможность продолжения работы в аварийном режиме. Благодаря своей конструкции вентильно-индукторный привод может работать при выходе из строя одной или нескольких фаз (в зависимости от конструкции двигателя). Однако для работы в аварийных режимах система управления должна получать детальную информацию о неисправностях, чтобы выбрать верный алгоритм управления. В [5] рассматриваются методы определения неисправностей.

Перечислим возможные неисправности в двигателе:

- разрыв цепи в одной из обмоток фазы;
- короткое замыкание на стороне одной из обмоток фазы;
- ротор сдвинут от центра (не центрирован в статоре), что приводит к разному воздушному зазору.

Для определения вышеуказанных неисправностей в [6] было предложено использовать дополнительную пару обмоток (рис. 2).

Асимметричная трехфазная силовая схема преобразователя изображена на рис. 3. В плече данной схемы присутствуют два силовых транзистора и два шунтирующих диода. Например, в плече с катушкой L1 находятся транзисторы VT1, VT2 и диоды VD1, VD2.

Определим возможные неисправности, связанные с транзисторами и шунтирующими диодами:

- пробой верхнего или нижнего транзистора;
- несрабатывание верхнего или нижнего транзистора, т. е. постоянное нахождение в разомкнутом состоянии;
- одновременный пробой верхнего и нижнего транзисторов;
- короткое замыкание либо размыкание цепи по причине выхода из строя шунтирующих диодов.



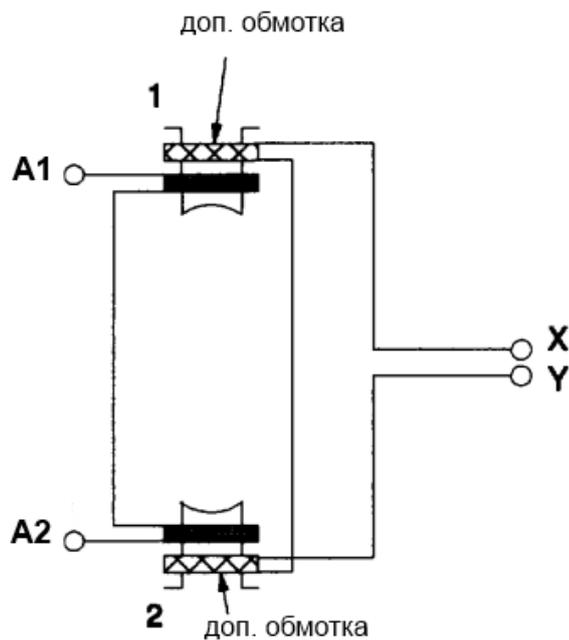


Рис. 2. Дополнительная пара обмоток

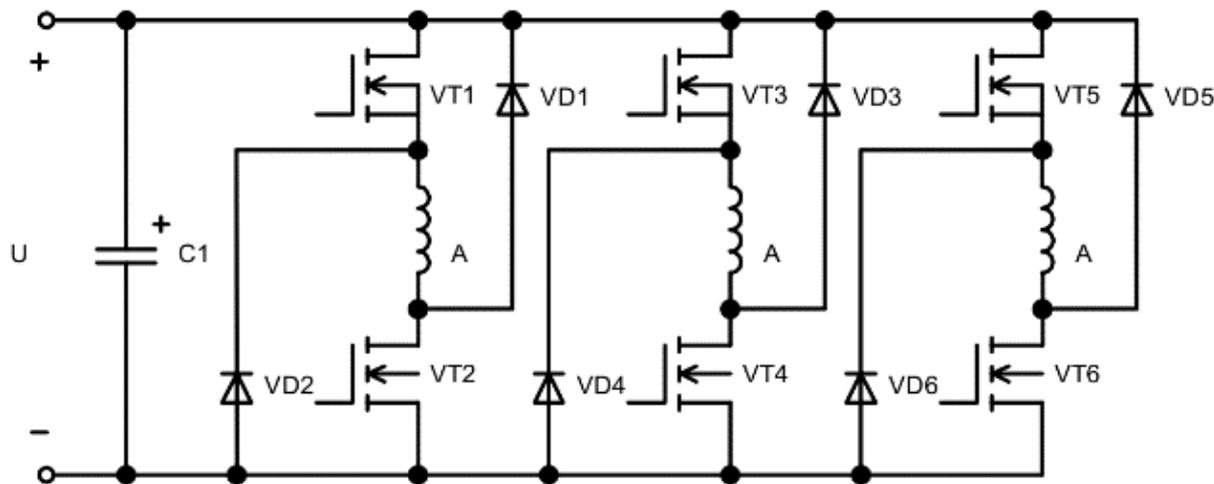


Рис. 3. Асимметричная трехфазная силовая схема

В [7] были предложены два метода диагностики неполадок силовой схемы преобразователя. Суть методов заключается в определении значения тока в режиме реального времени в определенной точке силовой схемы. Далее происходит обработка результата и указание места неисправности при её наличии.

Создание бездатчиковых систем управления

Определение позиции ротора – неотъемлемая часть системы управления ВИП. Возбуждение фаз двигателя должно быть синхронизировано с положением ротора для эффективного управления скоростью, моментом и пульсациями



момента. С этой целью в ВИП используется датчик положения ротора. Однако применение датчика положения ротора усложняет систему управления, увеличивает стоимость привода и уменьшает надежность всей системы. В [8] описаны различные бездатчиковые методы управления ВИП. Рассмотрим данные методы управления.

Методы, которые требуют применения дополнительных внешних схем.

В [9] описываются два способа определения положения ротора с использованием дополнительных внешних схем, однако без применения датчика положения ротора. Эти способы основаны на методах модуляции, которые обычно используются в системах связи. Мгновенное значение индуктивности в неработающей фазе определяется в кодированном виде с помощью модулятора, представляющего из себя дополнительную электронную схему. Далее сигнал декодируется и, в зависимости от значения индуктивности, определяется положение ротора. Таким образом описываются методы модуляции для определения положения ротора и их реализация с помощью схемы с использованием микроконтроллера.

Методы, определяющие положение ротора по заранее определенным магнитным характеристикам двигателя. Для всех ВИП существуют свои уникальные соотношения потокосцепления, тока в фазе и положения ротора.

В [10] предлагается высокоточный бездатчиковый метод определения положения ротора, использующий значение потокосцепления, тока для определения положения ротора. Алгоритм определения положения ротора использует нелинейные магнитные характеристики ВИП, т. е. заранее установленные зависимости тока, потокосцепления и положения ротора. Модель определения положения достаточно проста и точна, что способствует малой потребности в расчетах в режиме реального времени. Также был предложен способ

определения наиболее подходящей фазы для определения положения ротора в случае, когда более чем одна фаза проводит ток. Результаты моделирования и экспериментов были представлены и подтвердили работоспособность данного алгоритма.

Бездатчиковые методы управления ВИП, основанные на моделях.

Метод, основанный на использовании наблюдателей состояния. Данный метод применяется в [11], где описываются наблюдатели состояния, включая ряд наблюдателей состояния повышенной сложности, использующих значения тока и напряжения в фазе. Были продемонстрированы численное моделирование и результаты экспериментов, которые подтверждают стабильную работу этого метода.

В [12] рассматривается метод бездатчикового управления на малых скоростях либо при остановке. Суть заключается в том, что токовый синусоидальный сигнал высокой частоты (600 Гц) подается на фазу двигателя. Далее измеряется значение напряжения и оценивается мощность сигнала. Затем мощность сигнала сравнивается с заранее определенными, хранящимися в памяти значениями сигнала, соответствующими различным положениям ротора. Значение напряжения зависит от положения ротора. Работоспособность данного метода подтверждается результатами эксперимента.

В [13] рассматривается бездатчиковый метод управления ВИП, основанный на индукционной модели.

В предложенном методе измеряются параметры только активной фазы. Метод не требует дополнительного внешнего оборудования. Ожидается, что надежность схемы будет высокая, а стоимость не увеличится. Предварительное исследование показывает, что с применением данного метода можно определить положение ротора с высокой точностью на широком диапазоне скоростей. Представлены теоретические

основы вышеуказанного бездатчикового метода, а также результаты моделирования в Matlab-Simulink.

Создание приводов с независимым возбуждением

Помимо традиционных вентильно-индукторных приводов с самовозбуждением, существуют вентильно-индукторные привода с независимым возбуждением, которые рассматриваются в [14]. В отличие от ВИП с самовозбуждением данная машина изготавливается из двух или более пакетов, между которыми устанавливается обмотка возбуждения. Обмотка статора может быть как распределенной, так и сосредоточенной. Ротор и статор выполняются из листов электротехнической стали.

В сравнении с ВИП с самовозбуждением данная конструкция имеет ряд преимуществ: малые пульсации момента; возможность применения векторного управления; возможность использования стандартного трехфазного инвертора. Также у ВИП с независимым возбуждением хорошие массогабаритные показатели, большая зона постоянства мощности. Однако данный привод имеет ряд недостатков: он более сложен в изготовлении из-за наличия обмотки возбуждения; может возникнуть проблема с отводом тепла от обмотки возбуждения; существует поток возбуждения, проходящий через подшипниковый щит и подшипник, что приводит к преждевременному выходу из строя подшипника из-за вихревых токов.

Применение ВИП

ВИП применяются в различных областях [15]: транспорт, горнодобывающая техника, станкостроение, насосное, компрессорное оборудование, конвейеры.

Примером применения ВИП на транспорте является ВИП в составе электромеханической трансмиссии бульдозерно-рыхлительного агрегата ДЭТ-400 [16]. Данный бульдозер серийно производится на Челябинском тракторном заводе. Вентильно-индукторный привод был разработан на ООО «НПП «Эметрон».

По заявлениям производителей при увеличении мощности в данной модели было использовано на 500 кг меди меньше по сравнению с предыдущей моделью ДЭТ-320. Также уменьшились на 10...15 % массогабаритные характеристики. Отмечается лучшая ремонтпригодность. Для замены перегоревшей катушки статора двигателя нет необходимости демонтировать соседние. Электропривод имеет хорошую тяговую характеристику на всем тяговом диапазоне.

В [17] показан успешный опыт применения вентильно-индукторного привода с независимым возбуждением (ВИП НВ) в качестве тягового электропривода на макетном образце транспортного средства. Макетный образец имеет массу 22 т, восемь ВИП НВ по 35 кВт каждый и двигатель внутреннего сгорания 300 кВт обеспечивают индивидуальный привод колес.

Выводы

Перспективы развития ВИП заключаются в совершенствовании законов управления, обеспечении работы при аварийных режимах, создании бездатчиковых систем управления и приводов с независимым возбуждением. Результатом развития ВИП может стать улучшение его характеристик, повышение надежности, уменьшение стоимости, а также расширение сферы применения.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Miller, T. J. E.** Switched Reluctance Motor and Their Control / T. J. E. Miller. – Oxford : Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993. – 205 p.
2. **Корнеев, А. А.** Возможность применения вентильно-индукторных приводов в подъемных установках / А. А. Корнеев, А. П. Сериков // Информационные технологии и системы 2017 (ИТС 2017) : материалы Междунар. науч. конф. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 32–33.
3. Microcomputer control of switched reluctance motor / B. K. Bose [et al.] // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1986. – Vol. IA-22. – P. 708–715.
4. **Lovatt, H. C.** Computer-optimized current waveforms for switched-reluctance motors / H. C. Lovatt, J. M. Stephenson // Proc. Inst. Elect. Eng. Power Applicat. – 1994. – Vol. 141, № 2. – P. 45–51.
5. **Корнеев, А. А.** Неразрушающий контроль вентильно-индукторных приводов с применением компьютерных технологий / А. А. Корнеев, А. С. Третьяков, А. П. Сериков // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 492–495.
6. **Stephens, C. M.** Fault detection and management system for fault tolerant switched reluctance motor drives / C. M. Stephens // IAS Annu. Meeting. – 1989. – P. 574–578.
7. **Chen, H.** Fault Diagnosis Digital Method for Power Transistors in Power Converters of Switched Reluctance Motors / H. Chen, S. Lu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60, № 2. – P. 749–763.
8. **Ehsani, M.** Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives: state of the art and future trends / M. Ehsani, B. Fahimi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49, iss. 1. – P. 40–47.
9. New modulation encoding technique for indirect rotor position sensing in switched reluctance motors / M. Ehsani [et al.] // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1994. – Vol. 30. – P. 584–588.
10. **Lopez, G.** High-grade position estimation for SRM drives using flux linkage/current correction model / G. Lopez, P. C. Kjaer, T. J. E. Miller // IEEE-IAS Annu. Meeting. – 1998. – Vol. 1. – P. 731–738.
11. **Lumsdaine, A.** State observers for variable reluctance motors / A. Lumsdaine, J. H. Lang // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1990. – Vol. 37. – P. 133–142.
12. Sensorless control of a SRM at low speeds and standstill based on signal power measurement / A. Brosse [et al.] // IEEE IECON'98. – 1998. – P. 1538–1543.
13. Inductance based position encoding for sensorless SRM drives / G. Suresh [et al.] // IEEE PESC'99. – 1999. – Vol. 2. – P. 832–837.
14. **Козаченко, В. Ф.** Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения / В. Ф. Козаченко, М. М. Лашкевич // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 3. – С. 138–139.
15. **Птах, Г. К.** Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г. К. Птах // Электротехника. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 23–33.
16. Челябинский тракторный завод. Бульдозерно-рыхлительный агрегат ДЭТ-400 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chtz-uraltrac.ru/catalog/items/198.php>. – Дата доступа: 30.05.2018.
17. **Козаченко, В. Ф.** Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением / В. Ф. Козаченко, В. Н. Остриров, М. М. Лашкевич // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 54–60.

Статья сдана в редакцию 4 июня 2018 года

Алексей Анатольевич Корнеев, аспирант, Белорусско-Российский университет.
E-mail: alex06by@gmail.com.
Артем Сергеевич Третьяков, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: loggie121@gmail.com.
Олег Александрович Капитонов, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: kapitonov1987@gmail.com.

Aliaksei Anatolyevich Karneyeu, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: alex06by@gmail.com.
Artsiom Sergeyevich Tretsiakou, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: loggie121@gmail.com.
Oleg Aleksandrovich Kapitonov, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: kapitonov1987@gmail.com.

