



УДК 621.313.17:519.87

МИНИМИЗАЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОМ ПРИВОДЕ

MINIMIZATION OF TORQUE RIPPLES IN THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Мещеряков Виктор Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой, кафедра электропривода,
факультет автоматизации и информатики,
Липецкий государственный технический университет
mesherek@yandex.ru

Марков Алексей Сергеевич

аспирант,
Липецкий государственный технический университет
malex0796@gmail.com

Meshcheryakov Viktor Nikolaevich

PhD in Engineering, Professor,
Head of the Department, Department of
Electric Drive,
Faculty of Automation and Computer Science,
Lipetsk State Technical University
mesherek@yandex.ru

Markov Alexey Sergeevich

Graduate Student,
Lipetsk State Technical University
malex0796@gmail.com

Аннотация. Вентильно-индукторный привод (ВИП) идеально подходит для промышленного применения на механизмах с регулируемой скоростью. ВИП наиболее предназначен для простых, и в то же время требующих регулирования скорости, операций. Основным недостатком электродвигателя является высокая пульсация крутящего момента, механическая вибрация и акустический шум. Из-за его нелинейности и двузначной структуры пульсация крутящего момента становится неизбежной. В статье представлен обзор вариантов минимизации пульсаций крутящего момента.

Ключевые слова: вентильно-индукторный привод, минимизация пульсаций, крутящийся момент.

Annotation. The switched reluctance motor (SRM) is ideal for industrial applications with adjustable speed. SRM is most designed for low-cost and regulated operations. The main disadvantage of an electric motor with adjustable resistance is high torque ripple, mechanical vibration and acoustic noise. Due to its non-linearity and two-digit structure, torque ripple becomes unavoidable. The article provides an overview of options for minimizing torque ripples.

Keywords: the switched reluctance motor, minimization of torque ripple.

Введение

Существует ряд исследований, предлагающих внедрение вентильно-индукторного привода (ВИП) в качестве исполнительного двигателя насосного агрегата, в том числе и для нефтегазовой отрасли. Имеющиеся разработки касаются преимущественно конструктивных особенностей ВИП и его модернизации [1].

Коммутируемый ВИП относится к простейшим электрическим машинам. ВИП отличается прочностью, а стоимость изготовления ниже по сравнению с другими электрическими машинами [2]. Статор и ротор ВИП имеют выступающие полюса. Обмотка статора создает магнитное поле, а ротор не имеет обмоток, коллектора и щеток. Скорость ВИП больше по сравнению с шаговым двигателем. В этом двигателе сочетаются предпочтительные качества приводов асинхронных двигателей и приводов постоянного тока [3]. Модель ВИП была сделана с использованием пакета Matlab Simulink и построена для сравнительного моделирования (рис. 1). Крутящий момент, создаваемый в этом двигателе, пропорционален квадрату тока обмотки (рис. 2). Благодаря своей простой конструкции, ВИП становится более привлекательным, чем другие типы двигателей для промышленного применения.

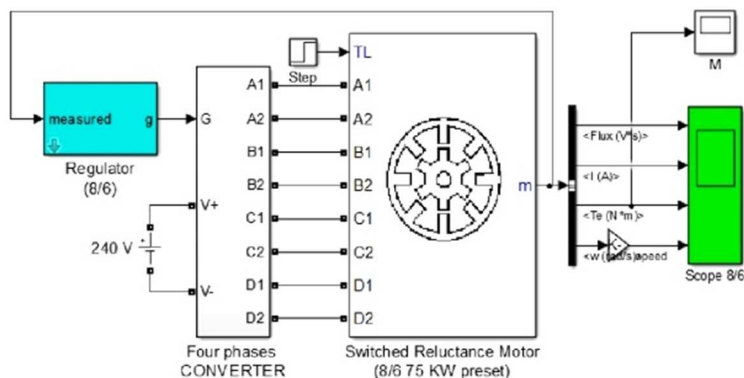


Рисунок 1 – Модель ВИП с использованием пакета Matlab Simulink

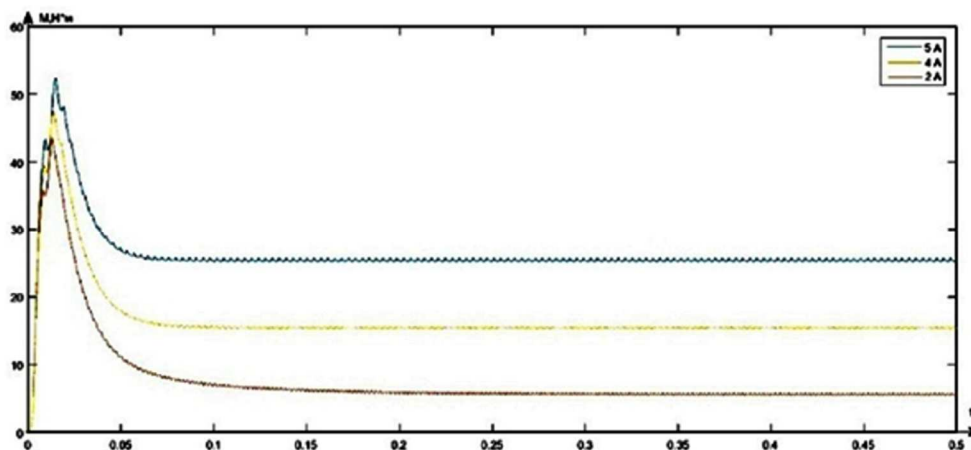


Рисунок 2 – Вращающий момент в функции от положения ротора при различной нагрузке

Основным недостатком ВИП является неравномерное и импульсное создание крутящего момента, которое приводит к его увеличению, что в свою очередь, вызывает вибрацию и акустический шум. Данное явление возникает из-за структурной деформации и гармонических магнитных моментов, наводящиеся в результате взаимодействия статора и ротора [2].

Пульсации крутящего момента

Минимизация пульсаций должна рассматриваться как в конструкции, так и в электронной контрольной точке [4]. В ВИП также может произойти несколько неисправностей во время его работы, которые могут быть электрическими и механическими. Электрические неисправности могут быть следующими: короткое замыкание в одной катушке фазы (все витки или несколько витков), вся катушка замкнута коротким замыканием, вся фаза закорочена, обрыв в одной катушке фазы, одной фазы обрыв, короткое замыкание между двумя разными фазами, короткое замыкание одной обмотки на массу [5]. Все эти неисправности могут увеличить пульсацию крутящего момента.

Одновременно с этим данное явление приводит к сокращению срока службы механических узлов. Сюда же добавляется относительное резкое изменение индуктивности в зависимости от положения ротора и нелинейного управления. Из-за протекания тока через фазную обмотку ротор имеет тенденцию совпадать со статором, он создает крутящий момент, который стремится выровнять ротор в положение с наименьшим сопротивлением. Крутящий момент обеспечивается способностью его универсальной части приспособляться к области значений меньшего сопротивления. По трем причинам в ВИП возникает выброс крутящего момента. Основная причина заключается в его магнитно-механической структуре. Вторая причина связана с его непрямыми атрибутами индуктивности, а третья причина – отрицательный крутящий момент из-за «хвостового» тока. Выражение для крутящего момента может быть получено с использованием производной энергии магнитного поля с положением ротора при заданном значении тока. В ходе преобразований [6] получается формула для определения крутящего момента в ВИП (форм. 1).

$$M = \frac{1}{2} \cdot i^2 \frac{dL}{d\theta}; \tag{1}$$

где i – заданное значение тока; θ – положение ротора.

Из (1) видно, что крутящий момент не зависит от направления тока, он зависит только от полярности $\frac{dL}{d\theta}$. Когда ротор совмещен со статором, создается положительный (двигательный) крутящий момент, независимо от направления тока. Когда ротор выходит из центровки, крутящий момент отрицательный (тормозной или рекуперативный). Ток должен включаться и выключаться синхронно с положением ротора. Период проводимости не должен превышать угол ступеньки. В момент коммутации желательно допустить небольшое перекрытие, чтобы свести к минимуму выброс крутящего момента в виде выемок на мгновенной форме волны крутящего момента. Слишком большое перекрытие коммутации приводит к положительным импульсам крутящего момента, что увеличивает средний крутящий момент и усиливает переходные процессы на муфте, валу и нагрузке [7]. По этой причине из-за изменения тока между фазными обмотками ВИП имеет очень высокую пульсацию крутящего момента, которая в основном зависит от углов включения и выключения.

Пульсации крутящего момента также можно определить, как разницу между максимальным и минимальным мгновенным крутящим моментом, выраженную в процентах от среднего крутящего момента во время устойчивого состояния [6].



Методы минимизации пульсаций

1. Текущее профилирование ВИП

В [2] исследуется 4 способа минимизации пульсаций крутящего момента в ВИП: гистерезисное регулирование тока ВИП с ПИ-регулятором скорости, метод управления ШИМ, мгновенное управление крутящим моментом ВИП с ограничением тока и ПИ-регулятором скорости и текущее профилирование ВИП. Последний метод контроля, описанный в этой статье, означает, что форма волны фазного тока модулируется таким образом, чтобы достичь плавного крутящего момента без пульсаций. Текущие профили рассчитываются в автономном режиме и сохраняются в таблице как ток в зависимости от крутящего момента и положения ротора. Фактическое значение крутящего момента интерполируется из существующих значений за заданное время. Это может занять больше памяти в процессоре. Для расчета профилей тока использовались статические характеристики крутящего момента по результатам измерений из-за точности этого метода, но для определенных условий, описанных в данной статье по этому методу ВИП не может создавать крутящий момент.

2. Интеллектуальная техника управления

В [7] произведен обзор методов косвенного управления пульсациями крутящего момента. У каждого из рассмотренных им методов есть свои преимущества и недостатки, а также выбор метода зависит от области применения системы.

В системах с нечеткой логикой, нейронными сетями и нейро-нечеткими системами проводятся наблюдения и формируются определенные правила. Управление крутящим моментом на основе ANFIS было предложено в [8]. Профили тока генерируются для конкретного задания крутящего момента путем онлайн-обучения, чтобы уменьшить пульсации крутящего момента. В текущем управлении контроле управления скоростью к выходу ПИ-регулятора добавляется компенсационный сигнал, так что был проведен анализ эффектов изменения функций принадлежности нейро-нечеткой компенсации. Метод с применением интеллектуальных техник управления, в отличие от рассмотренного с ПИД регулятором, позволяющем снижать пульсации на 21 %, сокращает пульсации крутящего момента на 52 %. В рассмотренном примере пульсации крутящего момента ВИП составляют 77 % и к примеру, с одним лишь только прямым управлением крутящим моментом, пульсации будут сокращены всего на 10 % [7].

3. Контроллер Continuous Solutions для ВИП

Инженеры Continuous Solutions разработали детальные модели перспективных вариантов ВИП, определенных программой оптимизации в ANSYS Maxwell. Использовался шаблонно-ориентированный инструмент проектирования RMXprt для быстрого определения геометрии двигателя. Использовались возможности параметрического проектирования в RMXprt для определения магнитной системы ВИП: количество полюсов, обмоточные данные и т.д.[9]

Вместо поиска конструкционного решения для минимизации пульсаций момента, вибрации, был разработан алгоритм управления для подачи тока в обычно неактивные обмотки в точное время, чтобы нейтрализовать отклоняющиеся векторы силы от активных полюсов. Алгоритм управления сделан в своих собственных аналитических инструментах и встроено в обычный инвертор ВИП, собранный в ANSYS TwinBuilder. Инвертор был подключен к модели двигателя ANSYS Maxwell, рассматривалось взаимодействие ВИП со схемой управления с разработанным алгоритмом. Результаты замеров подробно рассматриваются в [9]. Графики нестационарного режима позволили сгладить колебания вращающегося момента: как только ротор ВИП собирается дергаться влево, контроллер вводит сигнал для рывка вправо, подавляя сопротивление движению в нужном направлении, удаляя волну пульсаций вращающегося момента,

Заключение

В статье представлен обзор различных методов минимизации пульсаций крутящего момента. Объясняется причина концепции создания крутящего момента, а также рассматриваются методы косвенного управления крутящим моментом.

Из рассмотренных источников информации особо отмечены метод минимизации с использованием интеллектуальных контроллеров. Пульсации крутящего момента также можно минимизировать с помощью текущего профилирования, но метод ограничивается определенными условиями функционирования ВИП, но тем не менее метод может быть использован в будущем для управления во многих промышленных приложениях или электромобилях с приводом ВИП. Минимизация пульсаций должна рассматриваться как в конструкции, так и в электронной контрольной точке. А также целесообразно продолжить исследования минимизации пульсаций крутящего момента с использованием с учетом взаимной индуктивности и использования композитного материала для конструкции статора в ВИП.



Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

Литература:

1. Нгуен Куанг Кхоа. Исследование электромеханического комплекса: вентильно-индукторный электропривод – центробежный насос // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016.
2. Dubravka P. «Control Techniques for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives under Faults» // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2016.
3. Miller T.J.E. «Switched Reluctance Motors and their Control» // Magna Physics, 1992.
4. Jebarani Evangeline. S. «Torque ripple minimization of switched reluctance drives – a survey» // 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), 2010
5. Christos Mademalis, Iordanis Kioskeridis, «Performance Optimization in Switched Reluctance Motor Drives with online commutation angle control» // IEEE Transaction on Energy Conversion, 2003. – Vol.18. – № 3.
6. Miller T.J.E. «Electronic Control of Switched Reluctance Machines» // Oxford (U.K.): Newnes, 2001.
7. Mahalakshmi G., Ganesh Dr.C. «A Review of Torque Ripple Control Strategies of Switched Reluctance Motor» // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562. – 2018. – Vol. 13. – № 7. – P. 4688–4692.
8. Fei Peng, Jin Ye, Ali Elmadi. «A Digital PWM Controller for Switched Reluctance motor Drives» // IEEE Transactions on Power Electronics, 2015. – Vol. 31. – № 10.
9. Электронный ресурс // Следующее поколение электродвигателей электромобилей. Бесшумная обработка. – URL : <https://www.ansys.com/about-ansys/advantage-magazine/volume-xiii-issue-1-2019/next-generation-of-electric-vehicle-motors> (дата обращения: 3.03.2021).

References:

1. Nguyen Quang Khoa. Investigation of electromechanical complex: valve-inductor electric drive – centrifugal pump // Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2016.
2. Dubravka P. «Control Techniques for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives under Faults» // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2016.
3. Miller T.J.E. «Switched Reluctance Motors and their Control» // Magna Physics, 1992.
4. Jebarani Evangeline. S. «Torque ripple minimization of switched reluctance drives – a survey» // 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), 2010.
5. Christos Mademalis, Iordanis Kioskeridis, «Performance Optimization in Switched Reluctance Motor Drives with online commutation angle control» // IEEE Transaction on Energy Conversion, 2003. – Vol. 18. – № 3.
6. Miller T.J.E. «Electronic Control of Switched Reluctance Machines» // Oxford (U.K.): Newnes, 2001.
7. Mahalakshmi G., Ganesh Dr.C. «A Review of Torque Ripple Control Strategies of Switched Reluctance Motor» // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562. – 2018. – Vol. 13. – № 7. – P. 4688–4692.
8. Fei Peng, Jin Ye, Ali Elmadi. «A Digital PWM Controller for Switched Reluctance Motor Drives» IEEE Transactions on Power Electronics, 2015. – Vol. 31. – № 10.
9. Electronic resource // The next generation of electric motors for electric cars. Silent processing. – URL : <https://www.ansys.com/about-ansys/advantage-magazine/volume-xiii-issue-1-2019/next-generation-of-electric-vehicle-motors> (accessed 3.03.2021).