

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

А. В. Блинков

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. Н. Погуляев

Традиционно в качестве тягового электропривода использовался привод на основе двигателя постоянного тока. С развитием полупроводниковых технологий доминировать стали тяговые привода переменного тока. Выделим следующие типы двигате-

лей, конкурирующих между собой в качестве тяговых: асинхронный двигатель; синхронный двигатель с контактными кольцами; синхронный двигатель с постоянными магнитами; вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением (ВИД СВ); вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением (ВИД НВ).

Недостатками асинхронных двигателей являются: крупные габариты; сложность отвода тепла от ротора, в котором выделяется большая часть потерь; невозможность прямого замера температуры ротора и обеспечение своевременной защиты от перегрева.

Синхронный двигатель с контактными кольцами с точки зрения управления – это очень удобная машина, но наличие контактов увеличивает габариты и снижает надежность.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами имеет самый высокий КПД по сравнению с остальными типами машин, лучшие удельные массогабаритные показатели. Его существенный недостаток – поле возбуждения не регулируется. Редкоземельные магниты дороги, очень сложны в монтаже, хрупки, а также ограничивают перегрев машины вследствие риска их размагничивания, а также имеют свойство размагничиваться со временем.

Вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением имеет простейшую конструкцию. Отсутствие лобовых частей вследствие применения сосредоточенных обмоток позволяет уменьшить стоимость двигателя.

Недостатки ВИД СВ: для этих двигателей требуется специализированный силовой преобразователь для однополярного питания нужного количества фаз двигателя; повышенный шум, вибрация, пульсации момента вследствие явнополюсной структуры магнитопровода и как следствие инвертор рассчитывается на большой ток.

Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением по своим характеристикам сходен с синхронным двигателем с контактными кольцами. У этого вида двигателей кольцевая обмотка возбуждения расположена на статоре и не подвижна. Обмотку статора выполняют распределенной для применения векторной системы управления на больших скоростях вращения.

Вентильно-индукторный двигатель с независимым возбуждением обладает следующими преимуществами: отсутствие скользящего контакта; низкая стоимость изготовления; широкий диапазон постоянства мощности; отсутствие перемагничивания ротора, а значит и отсутствие потерь в нем; большая часть потерь выделяется на статоре, а с него отводить тепло проще; применение для управления машиной тех же алгоритмов, которые классически используются для синхронных машин (векторное датчиковое и бездатчиковое управление); использование стандартного трехфазного инвертора в управляющем преобразователе.

Вентильно-индукторному двигателю с независимым возбуждением присущ ряд недостатков: затруднен синтез бездатчиковой системы управления для сверхнизких и нулевых частот вращения; замыкание магнитного потока возбуждения по подшипниковым щитам, в обход магнитопровода статора. Наличие такого паразитного пути замыкания потока возбуждения может приводить к преждевременному выходу из строя подшипников качения. Для предотвращения этого применяют различные немагнитные материалы в конструкции машины. Однако в тяговом применении крепление двигателя часто осуществляется через подшипниковый щит (мотор-колесо, мотор-редуктор). Вследствие этого немагнитный материал для щита должен также обладать необходимой механической прочностью, что сильно затрудняет выбор материала и в конечном счете приводит к удорожанию машины; сложность установки опущенной обмотки возбуждения.

В данной работе в качестве тягового привода выберем двухпакетный односекционный ВИД НВ с опущенной обмоткой возбуждения и распределенной трехфазной обмоткой статора. Критериями выбора были надежность, массогабаритные показатели и диапазон регулирования с постоянством мощности.

Были рассмотрены две системы управления: вентильный режим с автокоммутацией по датчику положения ротора и векторное управление с датчиком положения.

Первый вариант системы управления легок в реализации. От нее требуется только блок коммутации фаз в зависимости от угла положения ротора и блок токоограничения. Вентильный режим имеет хорошую динамику 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). К недостаткам данного метода можно отнести 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 уменьшение 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 трудную задачу. Этому методу присущи шум и большие пульсации момента.

Также было рассмотрено векторное датчиковое управление с ПИ-регуляторами тока. По сравнению с режимом автокоммутации не требуется подбирать сложные нелинейные зависимости для обеспечения оптимальной работы. Векторное управление оперирует синусоидальными величинами, в результате чего момент двигателя имеет минимум пульсаций по сравнению с режимом автокоммутации.

Необходимо выбрать координату, по которой будет управляться привод при помощи педали акселератора. Тут были проанализированы возможность задания скорости, задания мощности, задания момента и задания тока статора. Выбор остановился на задании момента. При таком способе колеса транспортного средства могут вращаться с разной скоростью, момент на них будет одинаковый, что обеспечит нейтральную поворачиваемость.

Была синтезирована структура, преобразующая задание момента в задание токов I_d , I_q и I_f (ток вдоль оси d , моментобразующий ток статора и ток возбуждения соответственно). Важным моментом в этой структуре является совместное управление токами I_q и I_f . Традиционный режим ослабления поля, когда до определенной частоты вращения ток возбуждения равняется номинальному и остается постоянным, а выше этой частоты начинает уменьшаться, для тягового привода, двигателя которого предназначены для работы в перегрузе, не пригоден. Если за номинальный ток принять длительно допустимый, то двигатель не сможет развить максимальный момент. Если же за номинальный ток принять максимально допустимый, то обмотка возбуждения перегреется даже на холостом ходу. Кроме того, постоянно поддерживающийся на максимальном уровне ток возбуждения создает дополнительные потери и ухудшает КПД. Единственно-возможным является пропорциональное изменение тока статора и тока возбуждения (программная имитация машины последовательного возбуждения). Таким образом, синтезируемая система должна из задания момента сформировать пропорциональные величины задания токов $i_{q\text{зад}}$ и $i_{f\text{зад}}$.

Расширение диапазона регулирования частоты вращения вверх было достигнуто за счет управления током по оси d . Ток оси d не влияет на момент двигателя, однако создание отрицательного тока оси d позволит уменьшить прикладываемое

к двигателю напряжение, не уменьшив при этом момент. А 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. Он успешно применяется для синхронных машин с постоянными магнитами, для которых этот метод является единственно возможным при работе на высокой скорости. Для ВИД НВ этот метод нужен лишь для увеличения максимальной мощности в зоне высоких скоростей.

Синтезированная структура является надстройкой над традиционной векторной системой управления и обеспечивает возможность успешного применения ВИД НВ в электротяге.

Был рассмотрен ряд мер по повышению энергоэффективности тяговых приводов за счет уменьшения потерь в инверторе преобразователя. Первый способ основан на изменении частоты ШИМ в зависимости от тока статора. Вторым способом заключается в выборе нулевого вектора при использовании векторной ШИМ.

Первый способ. Для обеспечения желаемой тяговой характеристики требуется спроектировать преобразователь одновременно и на большой ток для обеспечения большого момента «внизу», и на большое напряжение и частоту для обеспечения требуемой мощности «наверху» тяговой характеристики. Для качественного формирования синуса напряжения инвертором требуется достаточная для этого частота ШИМ, превышающая более чем на порядок частоту формируемого напряжения. Потери в ключах возрастают с ростом частоты и величины коммутируемого тока. Согласно тяговой механической характеристике, на высокой частоте вращения не требуется большой ток, а на низкой частоте вращения не требуется высокая частота ШИМ. Рационально изменять частоту ШИМ в зависимости от тока или частоты вращения привода.

Второй способ. Обычно для работы выбирается какой-то один нулевой вектор (000 – все нижние ключи замкнуты, так называемая «привязка к нижней шине», или 111 – все верхние ключи замкнуты, так называемая «привязка к верхней шине»). Выбор того или иного нулевого вектора не влияет на выходное напряжение. Алгоритм снижения потерь анализирует токи фаз инвертора и выбирает тот нулевой вектор, при котором ключ этой фазы не будет коммутироваться.

На разработанной компьютерной модели тягового двигателя и его системы управления была проверена работоспособность синтезированных структур управления в пакете MATLAB/Simulink. Принятые меры по уменьшению динамических потерь в ключах инвертора позволили снизить потери в силовых транзисторах на 15–20 %.