

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Требования, предъявляемые к системам управления тяговыми двигателями (ТАД) и мотор-генераторами (МГ) транспортных средств с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) и гибридных транспортных средств существенно отличаются от требований, обычно предъявляемых к регулируемым электроприводам общепромышленных механизмов, большинство из которых может быть построено на основе немного доработанного асинхронного двигателя основного исполнения (укрепленная изоляция, независимая вентиляция, датчик на валу) и универсального преобразователя частоты, питаемого от стандартной 3-фазной сети. Эти особенности связаны, прежде всего, с высокими требованиями, предъявляемыми к системе электропривода и к электрическим машинам, среди которых отметим следующие:

- минимизация массы и габаритов электрических машин и преобразовательных устройств;
- повышенная стойкость к воздействию внешних климатических и механических факторов;
- широкий диапазон регулирования скорости ТАД в режиме постоянства мощности ( $>5$ );
- высокий КПД электромеханической трансмиссии от вала МГ до вала ТАД и надежность.

Чтобы удовлетворить этим требованиям при сохранении определяемой рынком экономической привлекательности ЭМТ в сравнении с традиционными механическими трансмиссиями, при проектировании электрических машин приходится делать следующее:

- расширять рабочий диапазон температур обмоток до  $-40..200$  °С;
- повышать максимальную частоту выходного напряжения до нескольких сотен Гц, а предельное рабочее напряжение в звене постоянного тока преобразователя до 900В при силовых ключах 12-го класса и 1300В при ключах 17-го класса;
- выполнять расчет электромагнитной части с учетом оптимизации типовых режимов работы машины по суммарным потерям, что автоматически подразумевает высокую степень насыщения стали на предельных моментах первой зоны регулирования скорости;
- применять датчики скорости на основе зубчатых колес с относительно небольшим числом зубцов;
- использовать материалы с низкими удельными потерями, эффективные системы жидкостного и комбинированного воздушно-жидкостного охлаждения.

Это определяет следующие особенности ТАД и МГ как объектов управления:

- широкий диапазон изменения активных сопротивлений от температуры (изменяются в 2 раза) и взаимной индуктивности от тока намагничивания (изменяется в 2-3 раза);
- существенное влияние процессов в стали на взаимную ориентацию векторных переменных (на максимальных скоростях угол потерь в стали может превышать 40 градусов);
- нелинейная зависимость снижения взаимной индуктивности до 30% и более в функции частоты при фиксированном токе намагничивания, проявляющаяся на высоких частотах и малых потоках вследствие эффектов, обычно не учитываемых в существующих методиках проектирования электрических машин;
- отсутствие повторяемости количественных параметров двух предыдущих пунктов от машины к машине, а также при замене обмотки статора.

В связи с вышеуказанным к системе управления электроприводом предъявляются следующие требования:

- инвариантность характеристик привода к указанным диапазонам изменения активных сопротивлений и индуктивностей, а также к процессам в стали;
- минимизация потерь в системе «преобразователь – двигатель»;
- статическая и динамическая точность отработки задания электромагнитного момента во всех рабочих режимах привода при указанном диапазоне изменения его параметров не должна превышать  $\pm 10\%$ ;
- время отработки приводом задания момента не должна превышать единиц миллисекунд в приводе МГ (за исключением его работы на накопитель энергии) и десятков миллисекунд в приводе ТАД, что исключает возможность применения в них не векторных систем управления;
- первоначальная автоматическая настройка параметров системы управления на параметры силового канала привода, выполняемая как в стендовых, так и в «полевых» условиях, в частности, после замены электрической машины, а также элементов ее электромагнитной части или датчиковой системы;
- система управления должна надежно обрабатывать любые аварийные ситуации в преобразователе и двигателе, фиксируя их предысторию и прогнозируя их развитие, в частности, деградацию изоляции обмоток электрических машин;
- система управления приводами должна реализовывать полный набор технологических ограничений, накладываемых на режимы работы КТЭО, предотвращая развитие аварийной ситуации даже при неадекватных задающих воздействиях, поступающих со стороны контроллера верхнего уровня. Очевидно, что этот набор мо-

жет существенно изменяться в зависимости от вида транспортного средства и состава КТЭО.

Указанным требованиям в полной мере удовлетворяют адаптивно-векторные системы управления приводами [1,2,3], разработанные и внедренные в КТЭО следующих транспортных средств: колесного трактора «БЕЛАРУС – 3023» мощностью 300 л.с. Минского тракторного завода; гибридных автобусов Ликийского автобусного завода (ЛИАЗ 5292ХХ), ОАО «Белкоммунмаш» (42003), республика «Беларусь», корпорации «Богдан» (А70112), Украина, автобусного завода «Волжанин», Россия (данные проекты находятся в стадии постановки серийного производства), карьерного самосвала БелАЗ-240 грузоподъемностью 240 тонн; гусеничного трактора «Беларус-1502Э» мощностью 160 л.с. (данные проекты находятся в стадии испытания опытных образцов). Общими особенностями этих систем управления являются:

- идентификация сопротивления ротора и взаимной индуктивности в реальном времени работы привода и перерасчет всех зависящих от них параметров системы управления;

- обработка сигналов энкодера в идентификаторе механической части привода;

- учет при управлении приводами процессов в стали активных зон электрических машин;

- вычисление ориентирующего угла в математической модели двигателя;

- оптимизация приводов по закону КПД=max во всем диапазоне скоростей и нагрузок;

- высокая точность отработки задания момента.

За счет быстродействующей векторной системы регулирования напряжения на шине DC (постоянная времени настройки контура – около 1мс) в тракторных КТЭО выполнена минимизация ее суммарной емкости без использования узла резистивного торможения. Типовой диапазон КПД электромеханической трансмиссии трактора «БЕЛАРУС – 3023» при нагрузках, превышающих половину номинальной, составляет 85..88%. Среди его основных характеристик [5] в сравнение с традиционной механической трансмиссией отметим следующее:

- снижение расхода топлива на единицу выполненной работы;

- улучшение технико-экономических показателей трактора и снижение динамических нагрузок на его узлы;

- бесступенчатое регулирование скорости, снижение эксплуатационных расходов и повышение надежности;

- эффективное управление режимами работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в зависимости от потребляемой мощности;

- наличие режимов удержания трактора на подъеме и спуске, точного перемещения на заданное малое расстояние, электроторможения с передачей энергии в ДВС;

- возможность опционального подключения автономной станции электроснабжения [4].

Трактор получил серебряную медаль на выставке Агритехника-2009 в Ганновере и при полевых испытаниях показал повышение производительности на 20% и экономию топлива на пахоте более 25%.

В гибридном автобусе, который на сегодняшний день представляет самый эффективный вариант экологичного и экономичного городского транспорта, обеспечивается:

- снижение на порядок уровня выбросов при езде в городском цикле и экономия топлива около 50%;

- снижение мощности ДВС на 25-30% при сохранении момента на колесах;

- возможность запуска ДВС, генерации и рекуперации энергии;

- работа в оптимальных по топливной эффективности и выбросам режимах ДВС;

- повышение комфортности автобуса (шум, вибрация, управляемость), его надежности и ресурса работы.

#### Список литературы

1. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 320 с.
2. Виноградов, А.Б. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, Н.А. Глебов // Электротехника. – 2010. – №12. – С. 12–19.
3. Виноградов, А.Б. Тяговый электропривод гусеничного промышленного трактора БЕЛАРУС 1502Э / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, Н.А. Глебов, В.Л. Чистосердов, С.В. Журавлёв // Труды VII Междунар. (XVIII Всероссийской) конфер. по автоматизир. электроприводу АЭП-2012.– Иваново, 2–4 октября 2012г. – С.445–448.
4. Виноградов, А.Б. Управление станцией автономного электроснабжения в составе транспортного средства / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, А.А. Коротков // Электричество. – 2009. – №9. – С. 49–55.
5. Флоренцев, С.Н. Результаты и планы создания комплектного тягового электрооборудования электромеханических трансмиссий транспортных средств / С.Н. Флоренцев, Д.Б. Изосимов // Труды VII Междунар. (XVIII Всероссийской) конфер. по автоматизир. электроприводу АЭП-2012.– Иваново, 2–4 октября 2012г. – С.438–445.