

Тяговый электропривод гусеничного промышленного трактора БЕЛАРУС 1502Э

Виноградов А.Б., канд техн. наук, Гнездов Н.Е., канд. техн. наук, Глебов Н.А., инженер, Чистосердов В.Л., канд. техн. наук, Журавлев С.В., инженер

Представлены результаты разработки электроприводов тяговых двигателей и мотор-генератора гусеничного промышленного трактора БЕЛАРУС-1502Э. Описаны методика и процесс наладки систем управления электроприводов. Особое внимание уделено проблемам настройки датчиковой системы, учета потерь в стали и обеспечения электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: тяговый электропривод, идентификатор параметров, потери в стали.

Traction Electric Drive of Caterpillar Industrial Tractor BELARUS 1502E

Vinogradov A.B., candidate of science, Gnezdov N.E., candidate of science, Glebov N.A., engineer, Chistoserdov V.L., candidate of science, Zhuravlev S.V., engineer

Results of traction electric motor and generator design for caterpillar industrial tractor BELARUS 1502E are presented. Method and process of electric drive control system are described. Special attention is devoted to problems of sensor system tuning, iron loss account and electromagnetic compatibility.

Key words: traction drive, parameter identification, iron loss.

В мире наблюдается бурный рост интереса и предложений транспортных средств с электрическим приводом. Кроме очевидных преимуществ – экономии топлива и снижения вредных выбросов, электрический привод способен обеспечить качественное улучшение эксплуатационных характеристик: повышение надежности и ремонтнопригодности, облегчение управления за счет исключения коробки передач, повышение точностных и динамических характеристик, реализация новых режимов (рекуперация энергии торможения, движение при выключенном ДВС, удержание и плавный старт на уклоне), меньшая зависимость от факторов окружающей среды (высоты над уровнем моря, состава воздуха и т.п.).

Наиболее полно эти преимущества раскрываются в общественном и коммерческом (грузовом, промышленном, сельскохозяйственном) транспорте. Концерн РУСЭЛПРОМ занимается разработкой и производством комплектов тягового электрооборудования и совместно с партнерами уже реализовал несколько проектов по созданию городского маршрутного автобуса и универсального пропашного трактора. Расширяя сотрудничество с Минским тракторным заводом, реализован проект ЭТ-160Г по созданию макета гусеничного промышленного трактора БЕЛАРУС 1502Э мощностью 160 л.с. и тягой на крюке до 10 тонн с электрической трансмиссией.

В тракторе реализована последовательная кинематическая схема силовой установки, когда ДВС не имеет механической связи с колесами и обеспечивает только вращение асинхронного мотор-генератора (МГ), регулирующего напряжение в звене постоянного тока (ЗПТ). Вращение приводных шестерен гусениц левого и правого борта обеспечивают приводы соответственно

левого и правого тяговых асинхронных двигателей (ТАД), инверторы которых питаются от ЗПТ МГ.

В связи с жесткими массо-габаритными, стоимостными требованиями и сроками разработки, созданные МГ, ТАД и макет преобразовательной части обладают следующими особенностями:

- широкий диапазон изменения параметров двигателей: индуктивности взаимной индукции L_m , активного сопротивления статора R_s и ротора R_r , постоянной времени ротора T_r ;
- максимальная частота напряжения статора 300 Гц;
- большой диапазон регулирования скорости вверх от номинальной – второй зоны (максимальная скорость в 5 раз выше номинальной);
- существенные потери в стали (угол потерь в стали в рабочих режимах достигает 40 градусов);
- несогласованный с расчетными параметрами двигателей силовой преобразователь SKAI-2, с номинальным током втрое превышающим номинальный ток ТАДов и с рабочим напряжением в ЗПТ на 100 В меньше требуемого;
- ограниченный набор интерфейсных сигналов и технических данных по SKAI-2;

В качестве базовой для реализации была выбрана оптимальная по потерям векторная система управления тяговым электроприводом с идентификатором параметров [1, 2]. Особенностями данной системы является оценка в реальном времени всех параметров двигателя и коэф-

фициентов алгоритма управления, претерпевающих существенные изменения в связи с изменениями внешних условий и режимов работы привода. Для настройки идентификатора параметров и определения оптимального оп потерям алгоритма управления разработана методика стеновой настройки электропривода.

Одним из базовых условий работоспособности принятых алгоритмов является высокая точность (погрешность не более 1%) измерительных каналов. Установлено, что погрешность каналов измерения фазных токов в SKAI-2 гиперболически нарастает и внизу рабочего диапазона привода достигает 12, а в некоторых фазах и 18% (рис. 1). Для повышения точности разработан и реализован нелинейный, но достаточно простой алгоритм коррекции измерений, обеспечивший требуемую точность.

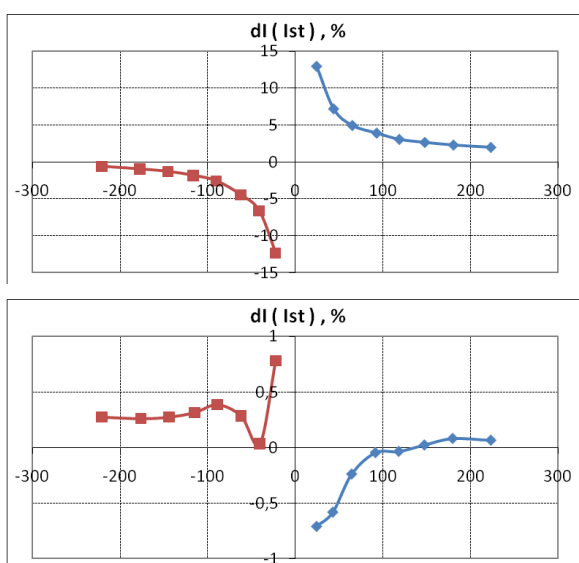


Рис.1. Погрешность датчиков тока SKAI-2 до (вверху) и после (внизу) коррекции измерений

Несмотря на небольшое значение длительности «мертвого» времени в SKAI-2, равное 2,5 микросекунды, отсутствие его компенсации вносит неприемлемую погрешность в формируемый вектор напряжения статора и ограничивает его максимальное значение. Для преодоления этих недостатков разработан оригинальный алгоритм и методика пофазной компенсации «мертвого» времени. Их применение позволило обеспечить формирование напряжения статора с требуемой точностью, в том числе на низких уровнях напряжения (рис. 2).

Определение кривой намагничивания (рис. 3) показало её изменение в 2 раза в диапазоне рабочих токов. При этом особое внимание было уделено начальному участку (при токе 8-20 А), поскольку именно он является наиболее используемым в силу раннего наступления ограничения по напряжению статора, обусловленного возможностями SKAI-2. Для исключения погрешностей, связанных с ограниченной точностью измерений и влиянием потерь в стали процедура

определения индуктивности была доработана. В результате стало возможным не только точно определить L_m , но и идентифицировать потери в стали на разных уровнях тока намагничивания и частоты напряжения статора. Фактически можно говорить о методике экспериментальной ориентации системы в рабочей точке.

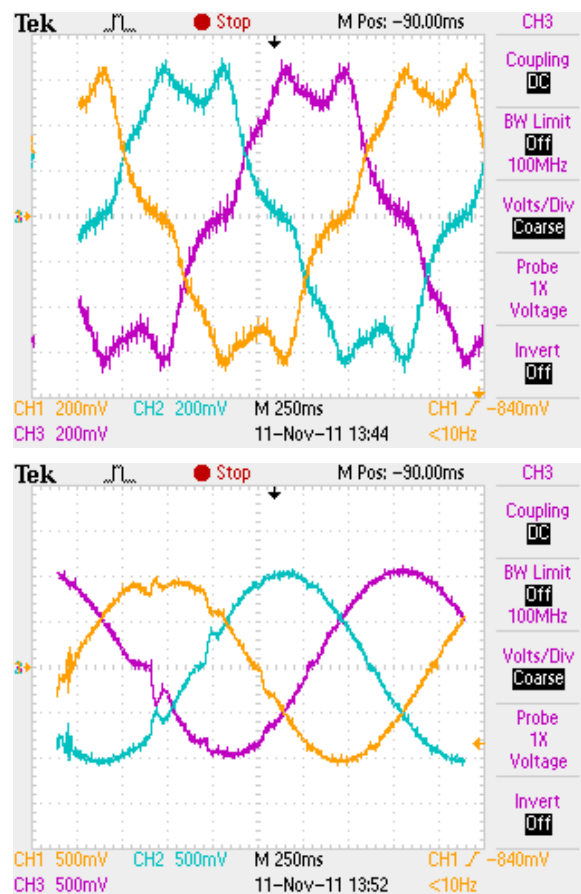


Рис.2. Осциллограммы токов ТАД до (вверху) и после (внизу) применения компенсации «мертвого» времени

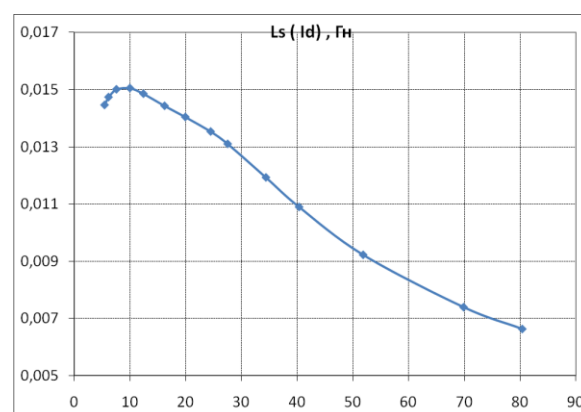


Рис.3. Кривая намагничивания ТАД ЭТ-160Г

После учета потерь в стали в модели поля ротора и алгоритмах идентификатора [3, 4], а также настройки коэффициента компенсации запаздывания управления были получены следующие характеристики электроприводов ТАД и МГ:

- полное обеспечение требований ТЗ по реализуемым моментам во всем диапазоне скоростей;
- работоспособность электропривода (непревышение регулируемыми переменными определенных значений), во всех, в том числе в динамических, режимах работы;
- погрешность вычисления электромагнитного момента не более 10% от реального значения;
- погрешность идентификации параметров двигателя не более 10%.

Совместная работа приводов МГ, левого и правого ТАДов выявила необходимость решения проблемы электромагнитной совместимости. Коммутации в инверторах ТАДов вызывают всплеск напряжения в общем ЗПТ. Периодическое совпадение таких всплесков с моментом измерения напряжения приводом МГ приводит к искажению измеренного значения. Поскольку МГ работает в режиме регулирования напряжения ЗПТ, появляются, как показал эксперимент, медленные периодические колебания напряжения (рис. 4). При этом МГ этих колебаний «не видит» и считает, что поддерживает постоянное заданное напряжение в ЗПТ. Уровень этих колебаний недопустим – он нарушает работу приводов ТАД.

Устранить указанную проблему можно установив одинаковую (или кратную) частоту модуляции и синхронизировав начала каждого периода модуляции во всех инверторах. Однако сделать это возможно только при тактировании микроконтроллеров, формирующих ШИМ, от одного кварцевого генератора. В разработанной системе такой возможности нет. Для решения проблемы разработан особый алгоритм обработки измеренных значений напряжения в ЗПТ. Его применение позволило на порядок снизить колебания напряжения (рис. 4) и устранить их негативное влияние на работу приводов ТАД.

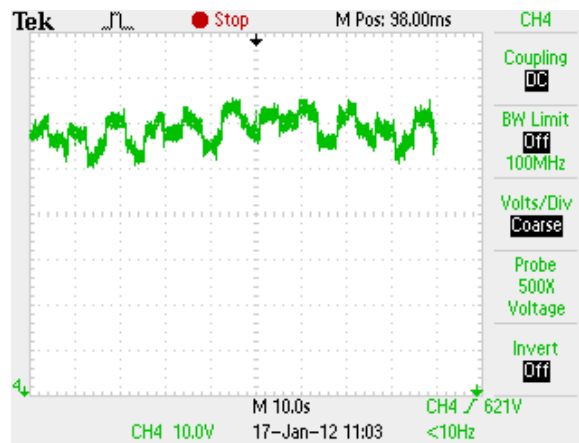
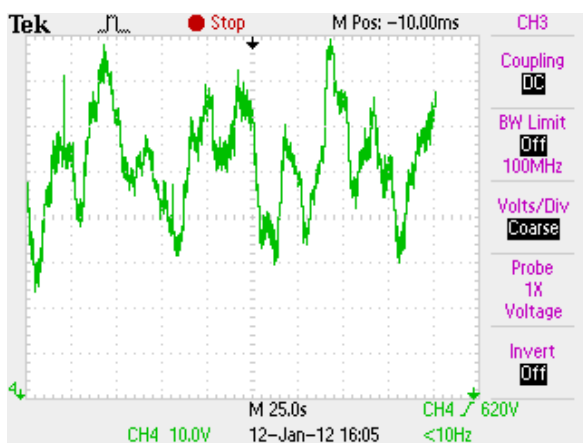


Рис.4. Пульсации в ЗПТ до(вверху) и после (внизу) решения проблемы асинхронности коммутаций инверторов

Ходовые испытания трактора БЕЛАРУС 1502Э (рис. 5) подтвердили работоспособность и показатели комплекта тягового электрооборудования, полученные на стенде.



Рис.5. Внешний вид трактора

Список литературы

1. **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.
2. **Виноградов, А.Б.** Система оптимально-векторного управления асинхронным электроприводом на основе идентификатора параметров / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, Н.А. Глебов // Известия ТулГУ.– Тула: Издательство ТулГУ. Технические науки, 2010.– Выпуск 3, Ч.1.– С. 66–72.
3. **Виноградов, А.Б.** Учет потерь и насыщения стали при оптимальном векторном управлении тяговым асинхронным электроприводом / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, Н.А. Глебов, С.В. Журавлев // Вестник ИГЭУ.– Иваново, 2012.– № 1.– С. 35–41
4. **Виноградов, А.Б.** Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – №5. – С. 57–61.

Виноградов Анатолий Брониславович,
ООО «РУСЭЛПРОМ-Электропривод»,
кандидат технических наук, начальник лаборатории систем управления ООО «РУСЭЛПРОМ-Электропривод»,
научный руководитель НТЦ «Электропривода «Вектор» Ивановского гос. энергетического университета
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru

Гнездов Николай Евгеньевич,
ООО «РУСЭЛПРОМ-Электропривод»,
кандидат технических наук, инженер-конструктор,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru

Глебов Николай Алексеевич,
ООО «РУСЭЛПРОМ-Электропривод»,
инженер-программист,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru

Чистосердов Валерий Львович,
ООО «РУСЭЛПРОМ-Электропривод»,
кандидат технических наук, инженер-программист,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru

Журавлев Сергей Вячеславович,
ООО «РУСЭЛПРОМ-Электропривод»,
инженер-программист,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru