

УДК 629.4+62-83

Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Р.В. Ковалев, Т.В. Смородова

УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОЙ И ТОРМОЖЕНИЕМ ГИБРИДНОГО МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ¹

Изложены принципы построения системы управления асинхронным тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза на пределе по сцеплению колес с рельсами в режимах тяги и электрического торможения и порядок разработки комплексной электромеханической модели тепловоза. Приведены результаты моделирования динамики разгона локомотива при реализации предельных тяговых усилий.

Ключевые слова: тепловоз ТЭМ9Н, тяговый электропривод, асинхронные двигатели, система управления, совместное регулирование двигателей, предельные тяговые усилия, торможение, динамические нагрузки.

На современных отечественных локомотивах активно ведется внедрение асинхронных тяговых двигателей (АТД) взамен традиционных двигателей постоянного тока. Это требует разработки новых систем и алгоритмов управления. Наиболее полное использование потенциальных условий сцепления, а значит, и наибольшие тяговые усилия можно получить при индивидуальном регулировании асинхронных двигателей. Однако по экономическим соображениям и условиям размещения часто применяют совместное регулирование двигателей в пределах тележки. Такое регулирование обычно называют потележечным. В рамках пилотного проекта Людиновским тепловозостроительным заводом создан опытный образец четырехосного гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н с совместным управлением АТД в пределах каждой из двух тележек. В связи с этим необходимо искать пути повышения динамических и тяговых свойств электропривода при потележечном регулировании. Совместное исследование электрической и механической подсистем новых локомотивов в их динамическом взаимодействии и взаимовлиянии является сложной нелинейной задачей, и ее наиболее целесообразно решать с использованием комплексных электромеханических моделей [1;2].

Разработана модель экипажной части тепловоза ТЭМ9Н в программном комплексе (ПК) «Универсальный механизм» (УМ) [3]. Динамическая модель тепловоза имеет 66 степеней свободы. Кузов моделируется твердым телом с 6 степенями свободы, и по 30 степеней свободы имеют тела, образующие каждую из тележек (рис. 1). К модели тепловоза для имитации состава с целью правильного отображения перераспределения вертикальных нагрузок осей локомотива присоединены модели вагонов.

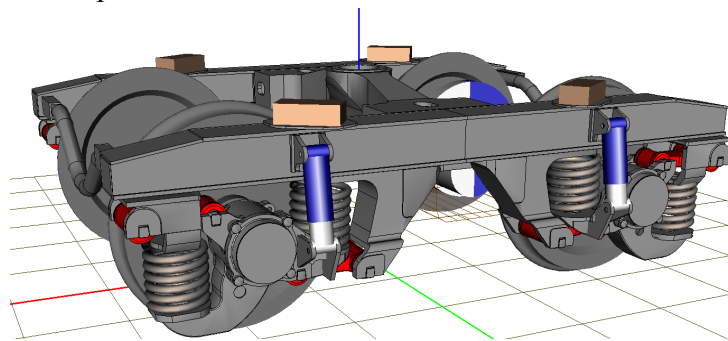


Рис. 1. Общий вид модели тележки ТЭМ9Н в ПК «УМ»

Модель выполнена с высокой степенью детализации и позволяет учесть такие факторы, как особенности конструкции ходовой части, перераспределение вертикальных на-

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (НИР № 1633 (06/62) «Прогнозирование динамических процессов в электромехатронных системах») и гранта РФФИ № 14-01-00662-а.

грузок осей локомотива в режиме тяги, профиль колес и рельсов, неровности пути и др., которые не учитываются в упрощенных моделях [2].

Ввиду своих особенностей асинхронный тяговый электропривод (АТЭП) является весьма сложным объектом управления даже при индивидуальном регулировании осей, параллельное же подключение АТД к одному инвертору еще более усложняет систему [4]. Предлагается вариант системы управления АТЭП ТЭМ9Н, позволяющий использовать наиболее динамичные алгоритмы управления асинхронными тяговыми двигателями при регулировании потокосцепления статора (рис. 2).

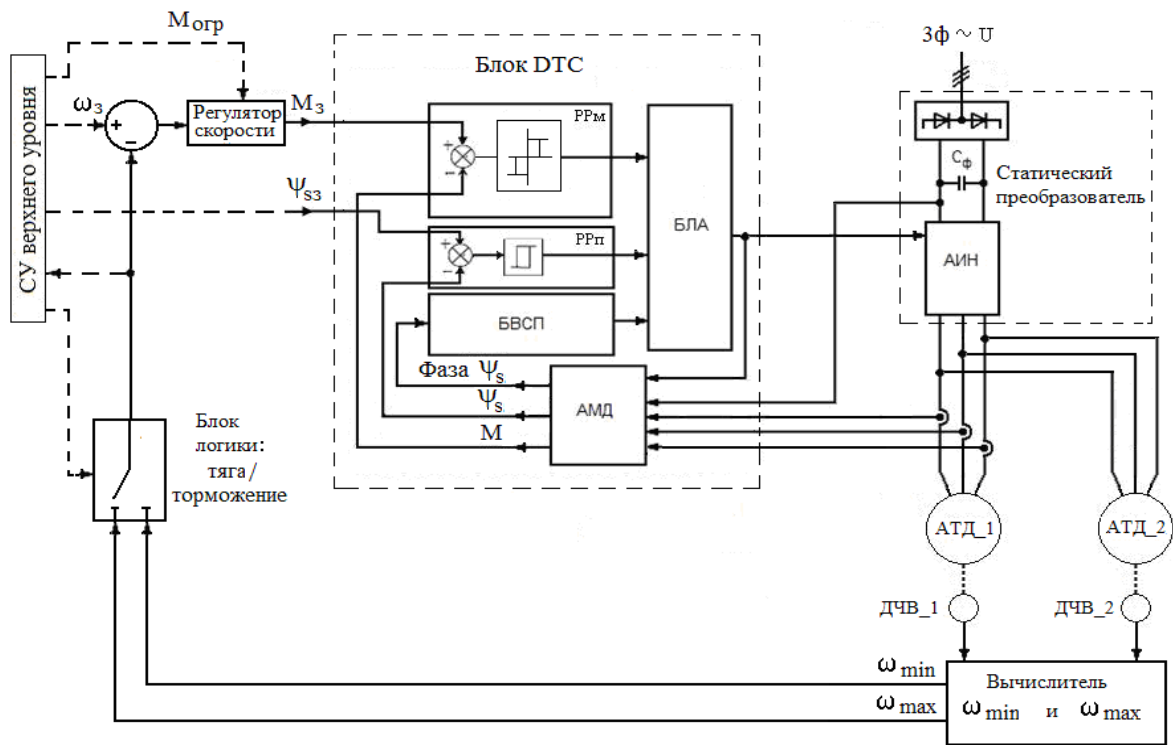


Рис. 2. Функциональная схема системы управления двигателями на пределе по сцеплению

За основу в этой системе принят известный принцип привязки задания на ускорение двигателя к ускорению локомотива, приведенному к валу двигателя, позволяющий реализовать максимальные тяговые и тормозные усилия. Задание на угловую скорость определяется путем интегрирования задания на ускорение. Выходной сигнал регулятора скорости является входным для контура момента, для регулирования АТД используется система прямого управления моментом (Direct Torque Control – DTC), на вход которой подается задание на электромагнитный момент M_3 (рис. 2).

Двигатели тележки подключены параллельно к одному автономному инвертору напряжения (АИН), и, в принципе, управление в режиме тяги можно вести как по двигателю, имеющему большую угловую скорость, так и по двигателю с меньшей скоростью вращения [4]. В данной схеме предлагается управление в режиме тяги с применением в адаптивной модели двигателя (блок АМД на рис. 2) параметров первого по ходу движения тележки АТД (АТД_1) и использованием в системе управления сигнала большей скорости вращения двигателей тележки в режиме тяги и меньшей скорости вращения в режиме электрического торможения [5]. Это снижает вероятность буксования в режиме тяги и юза в режиме торможения.

Модель системы управления (СУ) (рис. 2) выполнена в основной библиотеке ПК MatLab/Simulink с использованием уравнений АТД на основе обобщенной машины и уравнений, описывающих функционирование DTC и регуляторов скорости роторов АТД. Моделировались пропорциональные и пропорционально-интегральные регуляторы скоро-

сти. Модель СУ соединена с моделью механической подсистемы тепловоза в «УМ» при помощи специального интерфейса CoSimulation [2]. Интерфейс CoSimulation экспортирует из «УМ» в MatLab/Simulink модель механической части, которая включается в модель электрической подсистемы в виде стандартного блока – S-функции, и с точки зрения пользователя весь процесс моделирования происходит в MatLab/Simulink.

С использованием разработанной комплексной электромеханической модели ТЭМ9Н выполнено исследование динамических процессов реализации локомотивом предельных тяговых усилий. В качестве примера на рис. 3 приведены графики перераспределения вертикальных динамических нагрузок колес тепловоза в процессе разгона локомотива (N – вертикальные нагрузки колес, t – время).

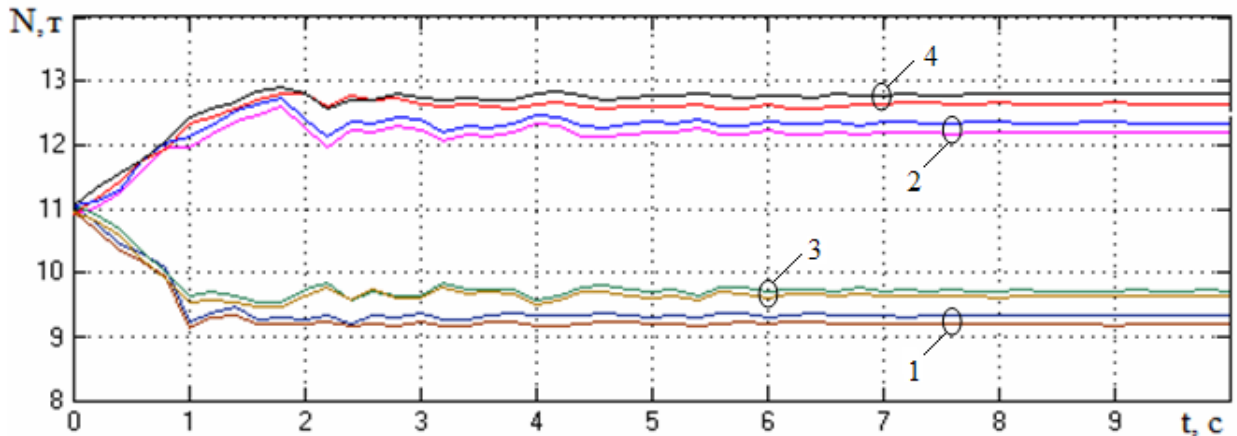


Рис. 3. Результаты моделирования перераспределения вертикальных нагрузок колес 1- 4-й осей локомотива

Из графиков следует, что в начале разгона ($t=0$) вертикальные нагрузки колес составляют 11 т и равны статическим нагрузкам. Далее по мере разгона, нарастания электромагнитных моментов АТД и тяговых усилий соответственно перераспределяются нагрузки: 2-я и 4-я оси локомотива нагружаются, а 1-я и 3-я – разгружаются. При этом средняя разница между вертикальными нагрузками колес составляет в пределах тележки 3200 т, а между вертикальными нагрузками осей – 6400 т (в то же время между вертикальными нагрузками 1-й и 3-й, а также 2-й и 4-й осей разница минимальна). Такое перераспределение вертикальных нагрузок в режиме тяги соответствует конструкции ходовой части (рис. 1). Статические нагрузки осей также соответствуют аналитическим расчетам, что подтверждает достоверность результатов моделирования.

Столь существенная разница вертикальных нагрузок осей в пределах тележки затрудняет реализацию предельных тяговых и тормозных усилий при потележечном регулировании двигателей. Как известно, сила тяги определяется по формуле

$$F = N\psi_0 k, \quad (1)$$

где F – сила тяги; ψ_0 – потенциальный коэффициент сцепления; k – коэффициент сцепления в относительных единицах.

$$k = \psi / \psi_0,$$

где ψ – коэффициент сцепления в абсолютных единицах (обычно говорят просто «коэффициент сцепления»).

Потенциальный коэффициент сцепления является максимально возможным в данных условиях, он зависит от многих факторов и имеет некоторый случайный разброс от среднего значения, но в целом снижается при увеличении скорости локомотива. Коэффициент сцепления в абсолютных единицах определяется в зависимости от скорости проскальзывания колес относительно скорости локомотива на основе нелинейной зависимости – характеристики сцепления.

Предельная сила тяги реализуется при таком проскальзывании колес, при котором коэффициент сцепления равен потенциальному коэффициенту сцепления, т. е. $k=1$. При

этом говорят, что потенциальные условия сцепления используются на 100 % или коэффициент использования потенциальных условий сцепления равен 1 (локомотив работает на максимуме характеристики сцепления). В этом случае каждый тяговый двигатель реализует предельную силу тяги и соответственно предельный по сцеплению электромагнитный момент. Так как вертикальные нагрузки осей в режиме тяги различны, то и предельные силы тяги (a значит, и моменты АТД) в соответствии с формулой (1) тоже должны быть различны.

На локомотивах с индивидуальным регулированием осей возможно максимально приблизиться к полному использованию потенциальных условий сцепления, регулируя электромагнитный момент и скорость вращения двигателя каждой оси. При потележечном регулировании двигатели тележки подключены параллельно к одному инвертору и регулируются совместно, поэтому степень использования потенциальных условий сцепления очень существенно зависит от распределения вертикальных нагрузок и способа (и алгоритмов) управления двигателями. Предложенная система управления (рис. 2) позволяет в значительной степени скомпенсировать неравномерность распределения вертикальных нагрузок осей тележки, что подтверждают результаты моделирования (рис. 4). Моделирование выполнено на прямолинейном участке пути при отсутствии неровностей.

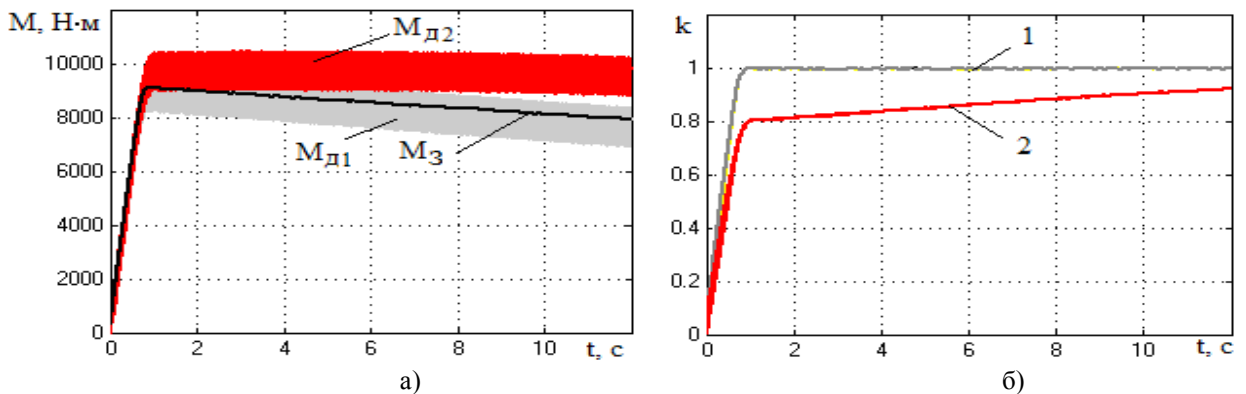


Рис. 4. Результаты моделирования реализации предельных тяговых усилий тепловозом ТЭМ9Н при разгоне локомотива с составом: а – электромагнитные моменты двигателей первой ($M_{д1}$) и второй ($M_{д2}$) осей и задание на электромагнитный момент ($M_з$); б – коэффициенты сцепления первой (1) и второй (2) осей в относительных единицах

Результаты моделирования показывают, что электромагнитный момент первого двигателя $M_{д1}$ (рис. 4а) регулируется практически на пределе по сцеплению ($k \approx 1$, рис. 4б). При этом электромагнитный момент двигателя второй оси больше задания на момент $M_з$, что позволяет повысить коэффициент использования потенциальных условий сцепления для второй оси в среднем до 0,83 (рис. 4б), а для локомотива в целом – до 0,9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федяева, Г.А. Оценка динамических нагрузок тягового привода на электромеханических моделях перспективных тепловозов/ Г.А. Федяева, Д.Ю. Погорелов// Тяжелое машиностроение.- 2007.- № 10. - С. 30-35.
2. Федяева, Г.А. Математическая модель механической подсистемы тяговой электропередачи маневровывозного тепловоза ТЭМ9Н/ Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Г.С. Михальченко, Н.Н. Сидорова// Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. - 2013.- № 4. - С. 139-142.
3. Universalmechanism.com. - Официальный сайт Лаборатории вычислительной механики БГТУ.
4. Колпахчян, П.Г. Управление двумя асинхронными тяговыми двигателями при питании от одного инвертора/ П.Г. Колпахчян// Изв. вузов. Электромеханика. - 2006.- № 2.- С. 45- 51.
5. Способ управления асинхронными тяговыми двигателями, подключенными параллельно к одному инвертору: пат. РФ на изобрет. RU 2428326/ Федяева Г.А., Федяев Н.А., Матюшков С.Ю., Роговцев Г.В.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели.– Оpubл. 10.09.11, Бюл. № 25.

Материал поступил в редколлегию 8.09.14.