

МАЗАНИК К. И., БНТУ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТОРМОЖЕНИЯ ДВУХОСНОГО ТРОЛЛЕЙБУСА

*Рассмотрены вопросы торможения троллейбуса рабочей тормозной системой как с подключенным тяговым электродвигателем, так и при его отключении. Приведены основные конструктивные отличия троллейбуса, включая характеристики электродвигателя в режиме торможения. Изложена методика дорожных испытаний, проанализировано сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.*

*The article describes the questions of braking of trolleybus by working braking system with connected and disconnected electric drive motor. Main constructive differences of trolleybuses are shown including characteristics of electric drive motor in the mode of braking. Methods of road test are given. Comparison of the theoretical and experimental research has analyzed.*

В настоящее время вопросы исследования динамики торможения мобильных машин являются достаточно актуальными. Особенно это касается городского пассажирского транспорта и, в частности, троллейбусов. Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с участием городского пассажирского транспорта приводят к многочисленным травмам среди пассажиров, а в некоторых случаях – их гибели. Поэтому улучшение тормозной динамики, а также устойчивости при торможении на криволинейных участках, вызванное применением специальных автоматических систем управления тормозным процессом, снижает вероятность возникновения ДТП, повышает производительность, комфортабельность и экономический эффект перевозок.

При рассмотрении динамики торможения необходимо учесть, что троллейбус по сравнению с автобусом (несмотря на функциональную общность, ряд общих нормативно-технических документов и предъявляемые требования) имеет ряд конструктивных особенностей трансмиссии и тормозной системы, приведенных в табл. 1.

Основное отличие состоит в типе использованного двигателя – тягового электрического (ТЭД) в троллейбусе и внутреннего сгорания (ДВС) в автобусе. ТЭД постоянно подключен к ведущему мосту и имеет сравнимый с ДВС момент инерции. Это влияет на дина-

Таблица 1. Конструктивные отличия трансмиссии и тормозной системы типовых двухосных троллейбусов и автобусов

Троллейбус	Автобус
<i>Трансмиссия</i>	
<i>Коробка переключения передач</i>	
Нет	Есть
<i>Передаточное число ведущего моста</i>	
9...12	4...7
ТЭД постоянно связан с ведущими колесами	ДВС отключается от ведущих колес сцеплением
<i>Тормозная система</i>	
Вспомогательная тормозная система функционирует переводом ТЭД в генераторный (тормозной режим)	Вспомогательная тормозная система функционирует переводом ДВС в режим компрессора
Привод вспомогательной и рабочей тормозных систем от одной педали, вначале происходит торможение ТЭД, при большем ходе педали – совместное торможение ТЭД и рабочей тормозной системой	Привод вспомогательной и рабочей тормозных систем от разных педалей
Торможение ТЭД имеет значительную эффективность, развиваемый тормозной момент сопоставим с тяговым моментом ТЭД	Торможение вспомогательной тормозной системой имеет малую эффективность

мику движения троллейбуса в целом. К тому же, ТЭД позволяет развивать значительный тормозной момент в широком диапазоне скоростей движения, численно сопоставимый

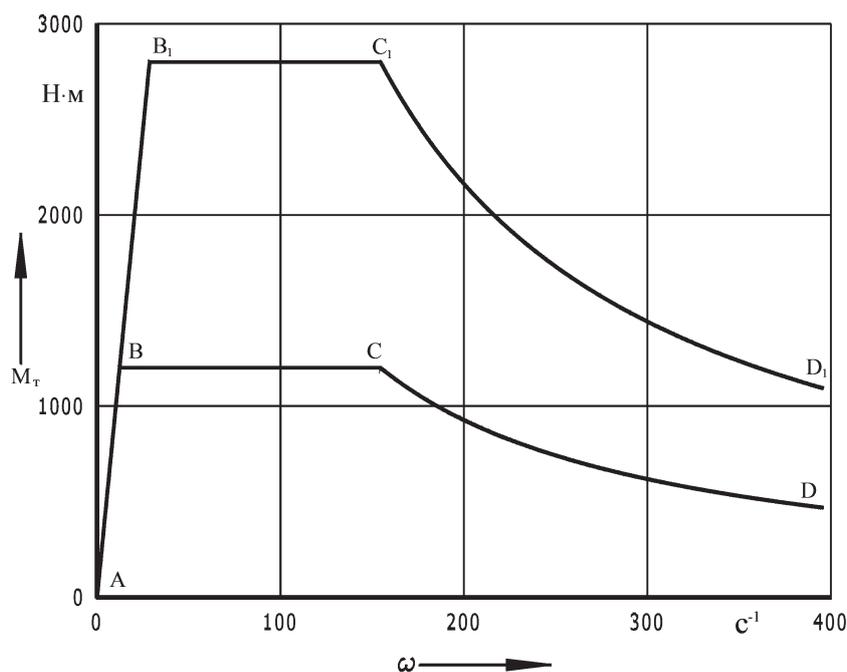


Рис. 1. Тормозная характеристика асинхронного ТЭД 2ML3550 К/4 троллейбусов АКСМ-321 и АКСМ-333

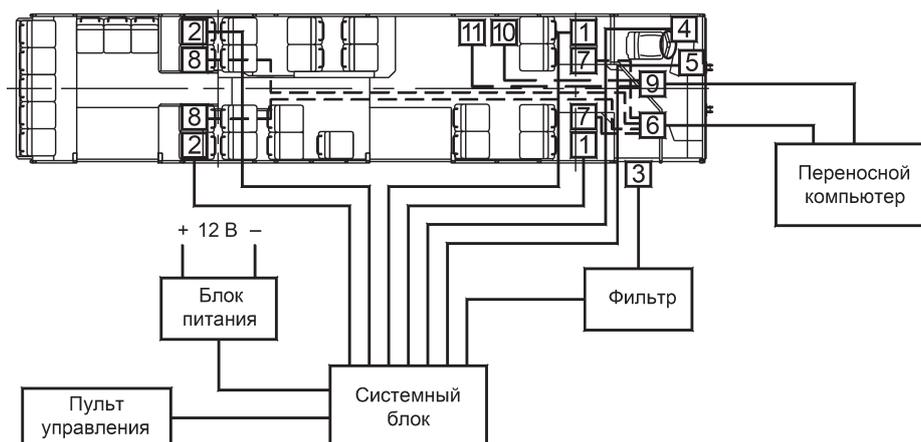


Рис. 2. Схема измерительно-регистрающей аппаратуры: 1 – датчики давления воздуха в рабочих тормозных камерах переднего моста; 2 – датчики давления воздуха в рабочих тормозных камерах заднего моста; 3 – оптический датчик движения; 4 – датчик начала нажатия на тормозную педаль; 5 – цифровой индикатор; 6 – блок управления антиблокировочной системы тормозов; 7 – датчики частоты вращения колес переднего моста; 8 – датчики частоты вращения колес заднего моста; 9 – блок системы управления тяговым двигателем; 10 – датчик частоты вращения тягового электродвигателя; 11 – датчик крутящего момента на валу тягового электродвигателя

с тяговым моментом. На рис. 1 приведена тормозная характеристика асинхронного ТЭД, устанавливаемого на троллейбусах АКСМ-321 и АКСМ-333 (производство ПО «Белкоммунмаш», Беларусь) с цифровой системой управления ТЭД на транзисторных модулях IGBT [1].

На рис. 1 показаны кривые тормозных моментов ТЭД, при этом линия  $AB_1C_1D_1$  соответствует максимальному тормозному моменту ТЭД. Однако цифровая система управления позволяет ввести ограничения на его величину.

К тому же значение развиваемого тормозного момента устанавливается положением нажатой тормозной педали, что создает целое семейство аналогичных кривых (например, ABCD), расположенных под кривой максимального тормозного момента.

Для исследования динамики торможения был проведен комплекс испытаний. За основу был взят серийно выпускающийся двухосный троллейбус АКСМ-321. На нем был установлен комплекс контрольно-измерительного оборудования, представленный на рис. 2. Для из-

мерения показателей (перемещение, скорость и ускорение троллейбуса, время исследуемого процесса, давление в тормозных камерах каждого моста) применялся измерительный комплекс Datron EEP-3, включающий оптический датчик перемещения, скорости и ускорения, датчики давления, адаптер, переносной компьютер, печатающее устройство.

Для измерения показателей (перемещение педалей хода и торможения, частота вращения и момент на валу тягового электродвигателя, напряжение и сила тока в тяговом электродвигателе) применяется специальный адаптер и программное обеспечение фирмы-производителя системы управления тяговым электродвигателем, которые с помощью мобильного компьютера записываются в файл данных, который впоследствии обрабатывается различным программным обеспечением.

При формировании схемы измерительно-регистрирующей аппаратуры совместно с комплектом измерительной аппаратуры фирмы Datron была использована встроенная система DGT 101 управления и диагностирования тягового двигателя. Ее технические характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики встроенной системы DGT 101 управления и диагностирования тягового двигателя

Входное напряжение	$600_{-180}^{+120}$ В
Длительная выходная мощность	220 кВА
Максимальная выходная мощность	750 кВА, $t < 30$ с
Напряжение питания системы управления	$24_{-7,2}^{+6,0}$ В
Вид защиты	IP 00
Виброустойчивость	согласно норме МЭК77
Охлаждение	воздушное принудительное
Вес	370 кг

Также были проведены теоретические исследования, в результате которых разработана пространственная многомассовая математическая модель двухосного троллейбуса, которая позволяет рассчитать основные параметры движения троллейбуса при торможении. Модель учитывает параметры ТЭД и трансмиссии, колебания кузова и мостов с колесами, микронеровности дороги и коэффициент сцепления под каждым колесом, а также пневма-

тический привод рабочей тормозной системы (РТС).

Испытания проводились при начальной скорости торможения 54 км/ч на ровном участке дороги с сухим асфальтобетонным покрытием. Данные были получены от датчика измерений перемещения, скорости и ускорения и от системы управления тяговым электродвигателем. Торможение осуществлялось перемещением тормозной педали в последнее положение с максимальной интенсивностью, таким образом производилось экстренное торможение. Водителем корректировка рулем не производилась. В данном случае троллейбус не вышел за границы полосы движения при торможении. Юза не наблюдалось.

При торможении с отключенным электродвигателем наблюдается следующее. В трансмиссии троллейбуса отсутствует сцепление, то есть тяговый электродвигатель постоянно связан с ведущими колесами. Это приводит к тому, что в данном случае двигатель создает на ведущих колесах тяговой момент при торможении троллейбуса, и тормозным механизмам требуется выполнить работу не только по остановке мобильной машины, но и по торможению крутящегося ротора электродвигателя. Как следствие, это приводит к некоторому увеличению тормозного пути, в данном случае он составляет 23,45 м (эксперимент) и 23,56 м (расчет). Время процесса составляет 2,7 с (эксперимент) и 2,8 с (расчет). Характер кривых схож, погрешность сравнения экспериментальных и расчетных данных составляет менее 5% (рис. 3). Погрешность зависит от значения коэффициента корреляции, рассчитанному по методике [2].

При совместном торможении электродвигателем и рабочей тормозной системой происходит следующее. Двигатель и рабочая тормозная система независимо друг от друга создают тормозной момент на ведущих колесах, где он суммируется. Причем тормозной момент тягового электродвигателя зависит от скорости вращения ведущих колес, то есть от скорости вращения ротора электродвигателя (рис. 4 и рис. 5).

Как следствие, это приводит к некоторому уменьшению тормозного пути по сравнению с торможением при отключенном тяговом электродвигателе, в данном случае он составляет

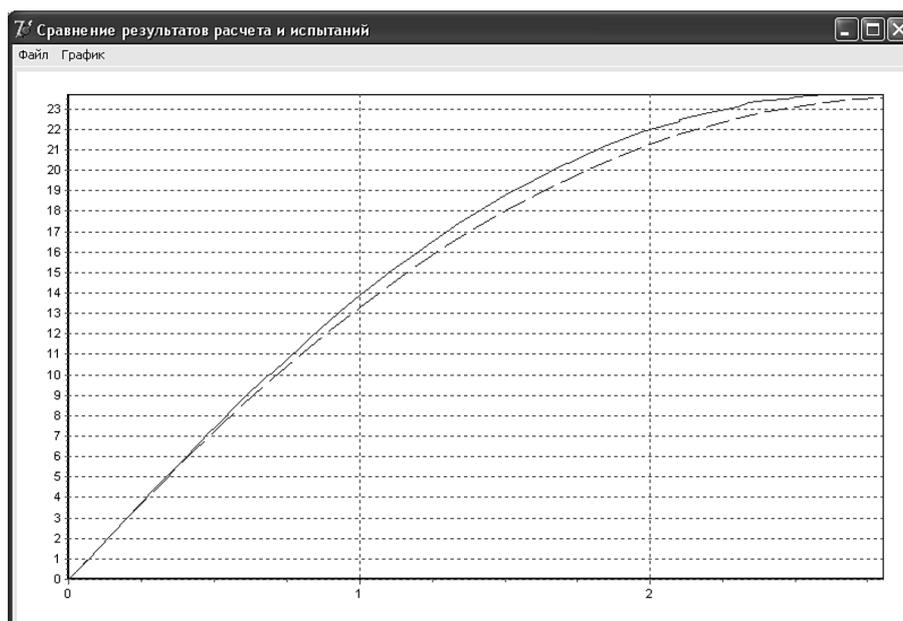


Рис. 3. Сравнение зависимости пройденного пути от времени при экстренном торможении, тяговый электродвигатель отключен (сплошная линия – данные испытаний, прерывистая – расчетные данные)

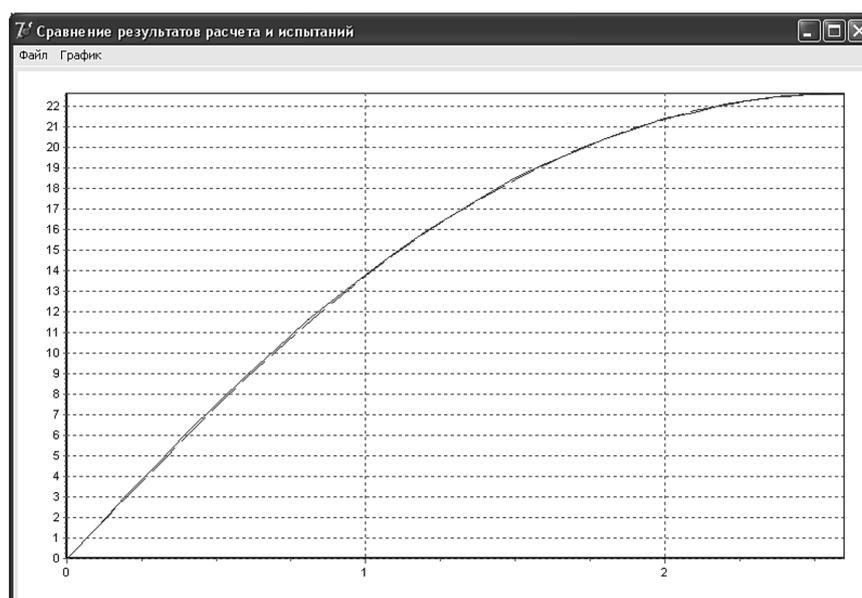


Рис. 4. Сравнение зависимости пройденного пути от времени при экстренном торможении, совместное торможение тяговым электродвигателем и рабочей тормозной системой (сплошная линия – данные испытаний, прерывистая – расчетные данные)

22,6 м (эксперимент) и 22,63 м (расчет). В начале периода торможения (эксперимент) наблюдается незначительное увеличение скорости (сплошная кривая на рис. 5), вызванное инерционностью мобильной машины и ее элементов до начала действия тормозной системы. Время процесса одинаково и составляет 2,6 с для эксперимента и расчета. Характер кривых схож, более того, кривые на рисунках 4 и 5 практически совпадают. Это подтверждает

и то, что погрешность сравнения экспериментальных и расчетных данных составляет менее 5% [2].

Проведенные исследования и анализ процесса торможения двухосного троллейбуса АКСМ-321 (ПО «Белкоммунмаш», г. Минск) позволяют сделать следующие выводы.

1. Проведены натурные испытания троллейбуса на заданных участках дорог и программный эксперимент.

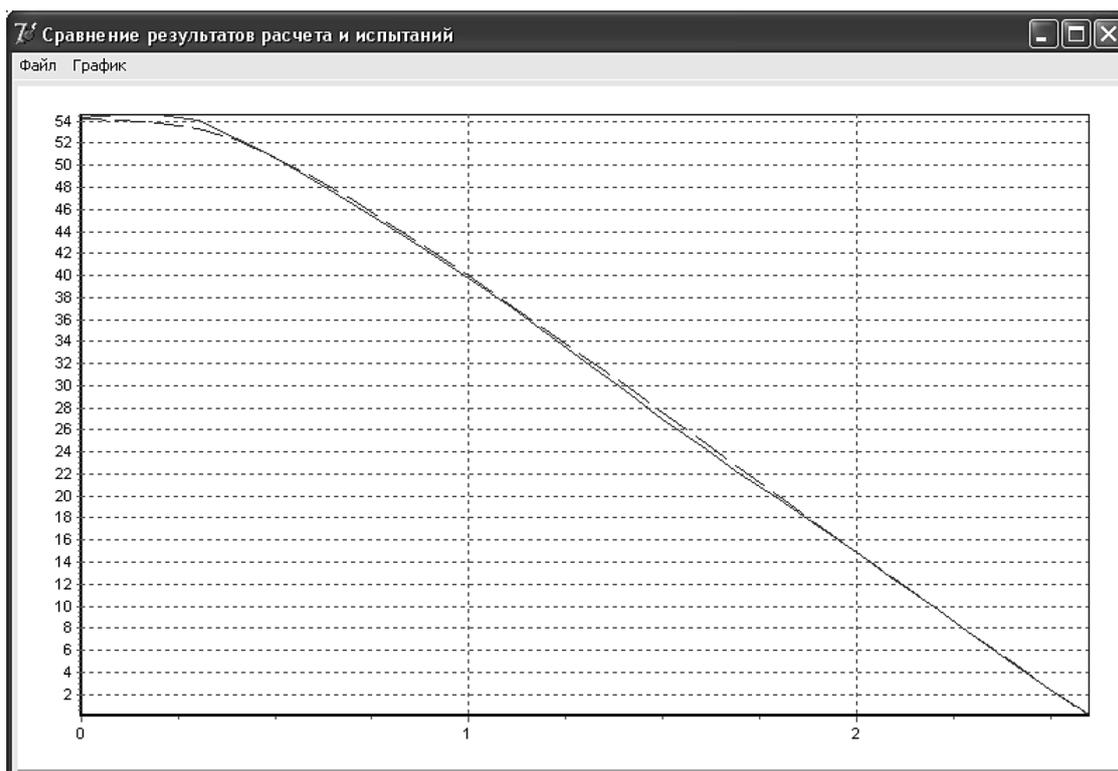


Рис. 5. Сравнение зависимости скорости движения от времени при экстренном торможении, совместное торможение электродвигателем и рабочей тормозной системой (сплошная линия – данные испытаний, прерывистая – расчетные данные)

2. Выполнено сравнительное исследование результатов компьютерного моделирования и натурных испытаний.

3. Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой адекватности математической и программной моделей реальному объекту.

4. Расхождение результатов компьютерного моделирования и натурных исследований не превышает 5% для различных критериев.

5. Исследован процесс совместного торможения тяговым электродвигателем и рабочей тормозной системой. Установлено, что при совместном торможении повышается тормозная эффективность троллейбуса по сравнению с отключенным двигателем во время торможения. В частности, время торможения сокращается с 2,8 до 2,6 с, а тормозной путь изменяется при начальной скорости 54 км/ч с 23,7 до 22,6 м. Расчетные данные подтверждены натурным экспериментом.

### Литература

1. Богдан Н. В., Сафонов А. И., Мазаник К. И. Современные системы управления тяговыми электродвигателями городского электрического транспорта// Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 4.
2. Сато Ю. Обработка сигналов. Первое знакомство. – М.: Додека XXI, 2002.