

УДК 629.3.017.5

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЁСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Е. Б. Сарач, д. т. н., проф., С. А. Бекетов, д. т. н., проф. / МГТУ им. Н. Э. Баумана

И. А. Смирнов, к. т. н., нач. кафедры, С. М. Напреенков, адъюнкт / Военный институт (общевойсковой) ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ»

В последнее десятилетие применение тягового электропривода на наземных транспортных системах получило широкое развитие. Это обусловлено стремлением повысить экологические показатели и топливную экономичность в городском цикле движения автомобилей, а также снизить потери при передаче энергии на большие расстояния в полноприводных многоосных шасси гражданского и военного назначения.

К элементам тягового электропривода наземных транспортных средств (ТС) применяются различные требования. Например, тяговые электрические двигатели (ТЭД) выполняют не только функцию разгона ТС и поддержания постоянной скорости движения, но и торможения. При этом электрическая тормозная система может значительно разгрузить основную механическую тормозную систему ТС, а в некоторых режимах движения и полностью заменить её.

Среди работ по исследованию процессов, проходящих в электромеханической тормозной системе ТС, можно выделить исследование [1], в котором авторы с использованием имитационного математического моделирования определяют эффективность работы электромеханического тормозного управления колёсной машины на стадии проектирования с учётом тепловой напряжённости элементов механической тормозной системы.

Данная работа посвящена выбору параметров электрической тормозной системы наземного колёсного ТС с тяговым электроприводом, в частности мощности тормозных резисторов.

При торможении ТС вся его кинетическая энергия должна рассеяться в тормозных механизмах за достаточно короткий промежуток времени (за исключением случаев торможения ДВС). Причём если разгон тяжёлой машины исчисляется десятками секунд, то экстренное торможение — секундами. То есть исполнительные элементы тормозной системы всегда работают в условиях

высоких нагрузок, тепловой напряжённости и износа.

Исполнительные элементы механической тормозной системы современных колёсных ТС (тормозные диски или барабаны и тормозные колодки с суппортами) располагаются непосредственно в колёсах и занимают значительную их часть. Так как при использовании мотор-колёс ТЭД также размещаются в колёсах, то возникает необходимость уменьшения габаритов элементов механической тормозной системы путём снижения их нагруженности и передача части их функций электрической тормозной системе.

Известно, что у колёсных ТС можно выделить четыре тормозные системы [2]: рабочую, запасную, вспомогательную и стояночную.

Рабочая тормозная система предназначена для регулирования скорости ТС в любых условиях движения. Замедление, обеспечиваемое этой системой: $j_m \geq 4,0 \dots 5,0 \text{ м/с}^2$.

Запасная тормозная система используется для остановки ТС в случае отказа рабочей тормозной системы. Она обычно является контуром рабочей

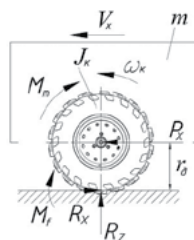


Рисунок 1. Схема качения колеса в тормозном режиме

тормозной системы, обеспечивающим не менее 30 % её эффективности. Максимальное замедление, обеспечиваемое этой системой: $j_m \geq 2,8 \text{ м/с}^2$.

Вспомогательная тормозная система предназначена для длительного торможения ТС на затяжных спусках без использования других тормозных систем. Максимальное замедление, обеспечиваемое этой системой: $j_m \geq 2,0 \text{ м/с}^2$.

Стояночная тормозная система предназначена для удержания полностью нагруженного ТС на заданном техническими характеристиками уклоне.

Из перечисленных тормозных систем электрическая тормозная система может выполнять функции вспомогательной тормозной системы, а также часть функций рабочей тормозной системы. Так как функции запасной тормозной системы возлагать на электрические тормоза нельзя вследствие их меньшей надёжности по сравнению с механическими тормозами, электрическая тормозная система может реализовывать не более 70 % от тормозных усилий рабочей тормозной системы.

При работе электрической тормозной системы ТС с тяговым электроприводом ТЭД переходят в генераторный режим работы и вырабатывают электроэнергию. Предельная тормозная характеристика ТЭД обычно соответствует их предельной тяговой характеристике. Поэтому электрическая мощность, вырабатываемая ТЭД при торможении и зависящая от эффективности торможения, не может быть больше мощности ТЭД. Следовательно, суммарная мощность электроэнергии при торможении ТС не может быть больше суммарной мощности ТЭД с учётом их КПД.

Данная электроэнергия может быть запасена в накопителях энергии (конденсаторах большой ёмкости — молекулярных накопителях или аккумуляторных батареях) или рассеяна в тормозных резисторах. Остановимся на определении мощности тормозных резисторов, так как мощность накопителей энергии обычно определяется в тяговом режиме из условия обеспечения разгона или движения ТС без использования ДВС.

При определении мощности тормозных резисторов необходимо рассмотреть два отдельных режима: режим экстренного торможения с максимальной скорости и режим движения под уклон с постоянной скоростью.

Рассмотрим сначала режим экстренного торможения. Здесь необходимо отметить, что в настоящее время в связи с широким распространением ЭВМ и соответствующего программного обеспечения расчёты по определению параметров систем колёсного ТС целесообразно проводить с использованием имитационного математического моделирования.

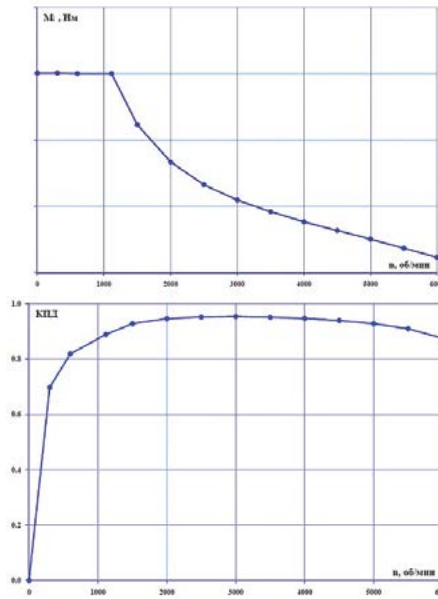


Рисунок 2.

Пример характеристик ТЭД: а) тормозной момент; б) КПД

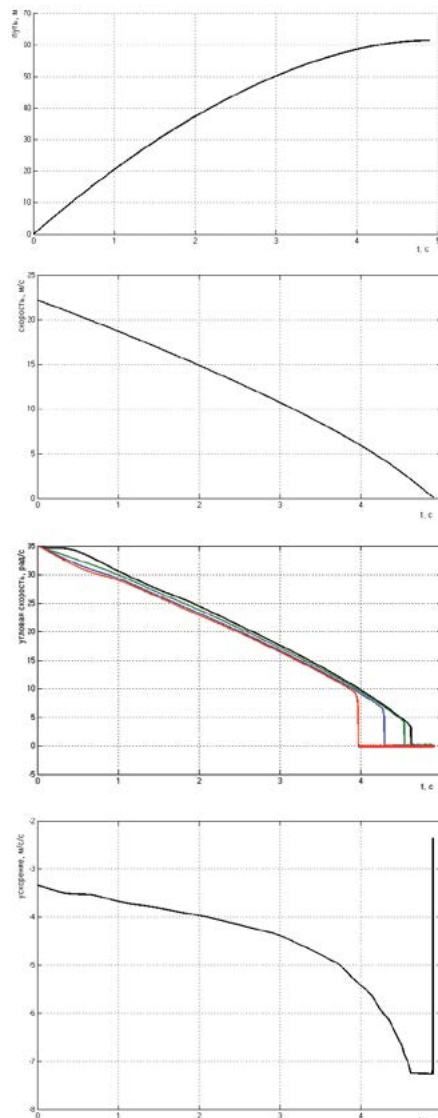


Рисунок 3.

Результаты торможения ТС: а) путь, пройденный ТС; б) линейная скорость центра масс ТС; в) угловые скорости колёс; г) линейное ускорение центра масс ТС

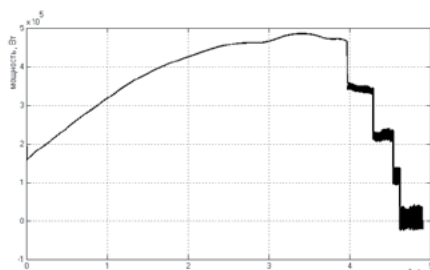


Рисунок 4.
Мощность, выделяющаяся в электро-трансмиссии при торможении

В работах [1, 3] подробно описаны математические модели движения колёсных машин. Аналогичная математическая модель использована и в данной работе.

Динамика колеса в тормозном режиме (см. рис. 1) без учёта сил воздушного сопротивления описывается уравнениями

$$m \cdot \dot{V}_{xk} = -R_x + P_x$$

$$J_k \cdot \dot{\omega}_k = R_x \cdot r_d - M_m - M_f$$

где m — масса автомобиля, приходящаяся на одно колесо; \dot{V}_{xk} — линейное ускорение центра масс; $\dot{\omega}_k$ — угловое ускорение колеса; J_k — момент инерции колеса; M_m — тормозной момент на колесе; M_f — момент сопротивления качению колеса; R_x — сила взаимодействия движителя с опорным основанием в продольном направлении; r_d — расстояние от оси колеса до опорной поверхности; P_x — продольная сила, приложенная к оси колеса.

Тормозной момент на колесе определяется по формуле

$$M_m = M_{ТЭД} + M_{МЭХ},$$

где $M_{ТЭД}$ — приведённый к колесу тормозной момент, создаваемый ТЭД; $M_{МЭХ}$ — тормозной момент, создаваемый механическими тормозами.

При экстренном торможении тормозная система работает на полную мощность, то есть одновременно происходит торможение и ТЭД в генераторном режиме, и механическими тормозами. Данный режим кратковременный (не более 10 секунд) и возникает однократно. То есть будем считать, что после возникновения экстренного торможения тормозная система успевает вернуться в исходное состояние: механические тормоза и тормозные резисторы успевают остыть.

Для определения мощности тормозных резисторов моделируется торможение ВМП с максимальной скорости на асфальтобетонном покрытии. Механическая тормозная система создаёт максимальный момент торможения на каждом колесе. При этом не допускается блокировка колёс — моделируется работа АБС (при приближении частоты вращения любого колеса к нулю данное колесо растормаживается).

Мощность, которую необходимо рассеять в тормозных резисторах, определяется по формуле

$$\sum_{i=1}^n M_{ТЭД_i} \cdot \omega_i \cdot \eta_i, \quad (1)$$

где $M_{ТЭД_i}$ — приведённый к i -му колесу момент, развиваемый ТЭД при торможении; ω_i — угловая скорость колеса; η_i — КПД привода; n — количество колёс.

КПД привода определяется из выражения

$$\eta_i = \eta_{ТЭД_i} \cdot \eta_{ТР_i},$$

где $\eta_{ТЭД_i}$ — КПД ТЭД для данного режима работы; $\eta_{ТР_i}$ — КПД трансмиссии.

На рис. 2 изображён график зависимости момента и КПД от оборотов вала типового ТЭД транспортной машины.

Таким образом могут быть оценены время торможения, замедление и тормозной путь. По этим параметрам можно оптимизировать характеристики электрической и механической тормозных систем.

Для примера рассмотрим торможение четырёхосной колёсной машины массой 48 тонн со скоростью 80 км/ч. Суммарная мощность ТЭД данной машины — 480 кВт. Механическая тормозная система может развивать максимальный тормозной момент 7 кН·м на каждом колесе. Результаты торможения ТС представлены на рис. 3 и 4.

Из анализа рисунков видно, что машина остановилась за 4,8 секунды, пройдя путь 62 метра, при этом замедление составило 3,3-7,3 м/с². Из графика угловой скорости колёс видно, что примерно с четвертой секунды, чтобы предотвратить полную остановку некоторых наиболее разгруженных колёс, начала работать АБС. С этого момента мощность, выделяющаяся в электротрансмиссии при торможении, начинает резко снижаться. Максимальная мощность за время торможения составила 480 кВт, что соответствует суммарной мощности ТЭД. Эту мощность необходимо рассеять в тормозных резисторах.

Теперь рассмотрим режим движения ТС на затяжном спуске. При движении под уклон на затяжном спуске тормозная система должна поддерживать

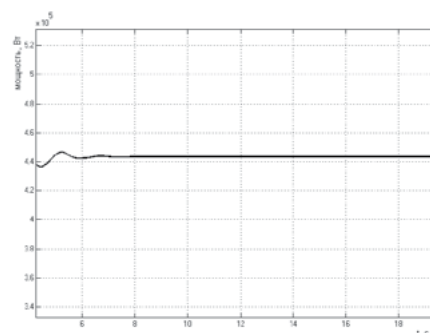


Рисунок 5.
Мощность, выделяющаяся в электро-трансмиссии при движении ТС под уклон 15 градусов со скоростью 30 км/ч

постоянную скорость машины, не давая ей разогнаться. При этом чем больше скорость машины, тем большая мощность должна поглощаться тормозной системой. Так как движение под уклон на затяжных спусках может быть достаточно длительным (десятки минут), то задействовать здесь основную механическую тормозную систему не представляется возможным вследствие её перегрева и выхода из строя. Поэтому расчёт целесообразно вести только для электрического торможения с использованием ТЭД. В этом случае электрические тормоза будут выполнять функции вспомогательной тормозной системы.

Для определения мощности тормозных резисторов моделируется движение ТС под уклон 10, 15 и 20 градусов по грунтовой дороге хорошего состояния с различными скоростями.

Мощность, которую необходимо рассеять в тормозных резисторах, определяется по зависимости (1). При расчёте контролируется выполнение условия

$$M_{г\Omega} \leq N_{ТЭД},$$

где $N_{ТЭД}$ — мощность ТЭД.

В итоге для рассматриваемого ТС при движении под уклоны 10, 15 и 20 градусов максимальные скорости составили 64, 30 и 19 км/ч соответственно, а мощности — 395, 443 и 418 кВт соответственно. На рис. 5 представлен график мощности, выделяющейся в электротрансмиссии при движении ТС под уклон 15 градусов.

Таким образом, из данного исследования можно сделать вывод, что тормозные резисторы многосных ТС с электротрансмиссией и их системы охлаждения должны быть подобраны так, чтобы можно было рассеивать 90-100 % суммарной мощности ТЭД, установленных на ТС.

Здесь необходимо отметить, что данный вывод не соответствует указаниям ГОСТ Р 41.13 по выбору параметров тормозной системы длительного действия при торможении ТС на затяжном спуске [4]. Пункт 1.6.1 данного ГОСТа гласит, что на затяжном спуске тормозная система должна обеспечивать движение под уклон 6 % длиной 6 километров со средней скоростью 30 км/ч.

Однако результаты математического моделирования показали, что при движении на таком уклоне тормозные резисторы вообще не требуются, вся энергия будет рассеиваться за счёт потерь в ТЭД и их редукторах. То есть определить характеристики данного устройства в таком режиме движения невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Горелов В. А., Котиев Г. О., Мирошниченко А. В. Математическая модель электромеханического тормозного управления колёсной машины // Журнал автомобильных инженеров. — 2012. — № 2. — С. 38-43.
2. Проектирование полноприводных колёсных машин: учебник для вузов: в 3 т. / Б. А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, А. Ф. Жеглов и др. / под ред. А. А. Полунгяна. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — Т. 3. — 432 с.
3. Котиев Г. О., Горелов В. А., Мирошниченко А. В. Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колёсной машины // Известия вузов. Машиностроение. — 2012. — № 1. — С. 19-29.
4. ГОСТ Р 41.13-2007. Единообразные предписания, касающиеся транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения (Правила ЕЭК ООН № 13). — Стандартинформ, 2009. — 165 с.