

УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ТРОЛЛЕЙБУСА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Докт. техн. наук, проф. БОГДАН Н. В.,
канд. техн. наук САФОНОВ А. И., инж. НОВИЦКИЙ С. Н.

Белорусская государственная политехническая академия

Для повышения активной безопасности, а также уменьшения износа пар трения тормозных механизмов рабочей тормозной системы современные троллейбусы оборудуются вспомогательной тормозной системой (ВТС), в качестве которой используется электрическое торможение с помощью тягового электродвигателя.

Процесс электрического торможения троллейбуса определяется многими факторами, основным из которых является тормозной момент на валу двигателя, зависящий, в свою очередь, от типа и параметров самого двигателя и его системы управления, а также от скорости движения троллейбуса. В связи с этим представляет интерес характеристика вида $M_T = f(\omega)$, где M_T — развиваемый двигателем тормозной момент; ω — угловая скорость вала двигателя. Такая характеристика для опытного образца троллейбуса модели 333 производства ПО «Белкоммунмаш», оборудованного асинхронным двигателем переменного тока «Škoda» 2ML3550 K/4 с системой управления на IGBT (insulated gate bipolar transistor — биполярный транзистор с изолированным затвором) элементах, найдена в ходе проведения теоретических и экспериментальных работ и может быть использована при исследованиях процесса торможения указанного выше транспортного средства.

Система управления тяговым электродвигателем троллейбуса модели 333 обеспечивает бесступенчатое регулирование тормозного момента при перемещении тормозной педали и автоматическое поддержание его постоянства при нажатой и неизменно удерживаемой педали. Такое управление обеспечивается во всем диапазоне скоростей и моментов, ограниченном предельной характеристикой ABCDE (рис. 1) [4]. При

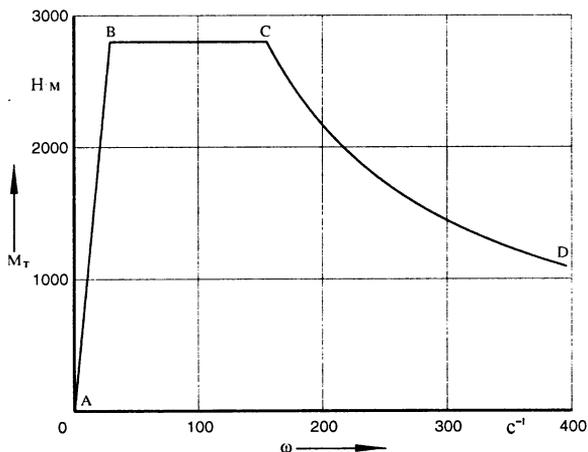


Рис. 1. Предельная механическая тормозная характеристика двигателя «Škoda» 2ML3550 K/4 с системой управления на IGBT элементах

этом положение точки D соответствует максимальной конструктивной скорости двигателя, которая равна $395,6 \text{ с}^{-1}$. На участке CD ограничивается максимальная мощность, и значение момента в этом случае для них находится по формуле

$$M_{CD} = \frac{432492,6}{\omega}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

участок BC ограничивает максимальный момент двигателя, равный

$$M_{BC} = 2800 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Участок AB соответствует торможению двигателя в режиме короткого замыкания, для которого момент определяется по зависимости

$$M_{AB} = 99,03\omega, \text{ Н} \cdot \text{м} [4].$$

Предельная характеристика ABCD, изображенная на рис. 1, соответствует максимальным значениям тормозного момента для указанного выше двигателя. Однако подобная система управления имеет возможность регулирования максимального момента двигателя. При этом с целью снижения нагруженности деталей трансмиссии его значение может быть уменьшено. В частности, в ходе экспериментальных исследований троллейбуса модели 333 установлено, что максимальный момент двигателя с учетом ограничений системы управления не превышает $1250 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Кроме того, в троллейбусе модели 333, как и в большинстве подобных конструкций, управление электрическим торможением и рабочей тормозной системой (РТС) осуществляется с помощью одной тормозной педали: в начале ее хода происходит управление моментом двигателя, а в конце — пневматическим приводом РТС. Оба эти диапазона управления имеют перекрытие, т. е. при положениях педали, соответствующих значениям момента двигателя выше $1009 \text{ Н} \cdot \text{м}$, уже начинает задействоваться пневматический привод. Таким образом, для исследования электрического торможения в чистом виде будем рассматривать значения тормозных моментов до указанной величины.

Согласно ГОСТу 22895—77 вспомогательная тормозная система транспортных средств категории М₃, к которой относится данная модель троллейбуса, должна обеспечивать спуск со скоростью $30 \pm 2 \text{ км/ч}$ на уклоне 7 % протяженностью 6 км. При оценке эффективности ВТС на горизонтальной дороге величина среднего замедления в диапазоне скоростей 35—25 км/ч должна быть не менее $0,6 \text{ м/с}^2$.

Для оценки эффективности вспомогательной тормозной системы опытного образца троллейбуса модели 333 проведены теоретические исследования процесса электрического торможения. При исследованиях была использована математическая модель динамики движения сочлененного транспортного средства, описанная в [3]. Данная модель позволяет исследовать динамику прямолинейного движения сочлененного троллейбуса на различных уклонах дороги с учетом сил сопротивления воздуха и качению колес. При расчетах эта модель была использована в комплексе с математической моделью трансмиссии, что позволило учесть кинетическую энергию не только поступательно движущихся

масс троллейбуса, но и вращающихся деталей двигателя, трансмиссии и колес, инерционность которых оказывает существенное влияние на показатели эффективности торможения. Система дифференциальных уравнений, описывающая динамику движения троллейбуса, решалась на ЭВМ с помощью численного метода Рунге-Кутты четвертого порядка.

В результате проведенных исследований получены значения замедлений троллейбуса при торможении ВТС на горизонтальном участке. При скорости движения 30 км/ч они составили 1,12 м/с² и 1,69 м/с² для полной и снаряженной масс троллейбуса соответственно. При торможении на уклоне 7 % ВТС может не только поддерживать скорость 30 км/ч, но и обеспечивать при этой скорости замедления, равные 0,48 м/с² для полной и 1,08 м/с² для снаряженной масс троллейбуса. Минимальная скорость, которую может поддержать ВТС на уклоне 7 %, равна 2,7 м/с и 2,3 м/с для соответствующих масс троллейбуса. Как видно из приведенных выше значений, установленная на опытном образце троллейбуса модели 333 вспомогательная тормозная система не только обеспечивает регламентированные требования эффективности, но и имеет значительный запас по создаваемому двигателем моменту. Несмотря на это, следует иметь в виду, что троллейбус предназначен для перевозки пассажиров в городских условиях, которые характеризуются высокой интенсивностью движения. При этом необходимо совершать частые остановки для высадки и посадки пассажиров. В таких условиях основной режим движения троллейбуса будет разгон—торможение. Как показали исследования [1], максимальные значения замедлений находятся в большинстве случаев в зоне 0,8...1,7 и могут достигать 2,8 м/с². Это свидетельствует о том, что для создания таких замедлений троллейбусом модели 333 потребуется достаточно часто задействовать рабочую тормозную систему, что может привести к нежелательному нагреву и износу ее фрикционных механизмов. В связи с этим предлагается повысить эффективность вспомогательной тормозной системы и тем самым свести к минимуму задействование РТС при служебных торможениях. Однако повышать тормозной момент до максимально возможного нецелесообразно по следующим причинам:

- 1) при торможении с высокой начальной скорости с эффективностью ВТС, близкой к максимальной, будет происходить значительное увеличение тормозного момента двигателя при снижении скорости, обусловленное участком CD предельной механической тормозной характеристики двигателя (рис. 1), что создаст определенные трудности при управлении водителем процессом торможения;

- 2) значение касательной тормозной силы на колесах ведущего моста будет превышать силы по сцеплению колес с мокрым асфальтобетонным покрытием для полной массы троллейбуса и с сухим — для снаряженной и приводить к потере устойчивости движения троллейбуса;

- 3) высокие значения тормозного момента на ведущих колесах, близкие к пределу по сцеплению, будут приводить к очень интенсивному износу шин. Поскольку износ пропорционален тормозному моменту в степени 2,6, т. е. $I_{ш} \sim M_{тк}^{2,6}$ [2], ограничение его высоких значений существенно увеличит срок службы шин.

Исходя из сказанного и на основании [1] можно заключить, что для данной модели троллейбуса достаточно эффективности ВТС, создающей замедление 1,8 м/с². Причем такое замедление целесообразно поддерживать во всем диапазоне изменения загрузки троллейбуса, т. е. тор-

множой момент двигателя должен изменяться пропорционально массе машины, что позволит избежать высоких скольжений и заноса колес ведущего моста в условиях недостаточного сцепления при уменьшении нормальной нагрузки на них. Возможны различные варианты для осуществления такого закона изменения тормозного момента. Один из них — использование в качестве обратной связи значений действительного замедления машины. Тогда тормозной момент необходимо регулировать таким образом, чтобы при перемещении тормозной педали пропорционально изменялось замедление машины, а при нажатой и неизменно удерживаемой педали создаваемое замедление поддерживалось по возможности постоянным во всем диапазоне изменения скорости движения троллейбуса.

Поскольку троллейбус является пассажирским транспортным средством, требования предъявляются не только к эффективности тормозных систем, но и к комфортабельности движения при торможении. Согласно ГОСТу 8802—78 скорость изменения замедления (рывок) $\frac{dj}{dt}$ при служебном торможении не должна превышать $1,5 \text{ м/с}^3$. При использовании ВТС этот параметр зависит прежде всего от скорости нарастания тормозного момента двигателя, которая для модели 333 составляет $\frac{dM_{\tau}}{dt} = 3600 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}}$. Кроме того, на комфортабельность движения сочлененного троллейбуса при торможении оказывают влияние взаимные продольные колебания звеньев тягача и прицепа. В этом случае замедление и рывок изменяются во времени, как изображено на рис. 2. Оценка результатов вычислительного эксперимента показала, что уменьшение массы троллейбуса приводит к более высоким значениям скорости изменения замедления. Таким образом, по результатам данных исследований при торможении ВТС комфортабельность движения троллейбуса с полной массой оказывается выше, чем со снаряженной. В связи с этим на рис. 2 и 3 приведены показатели только троллейбуса со

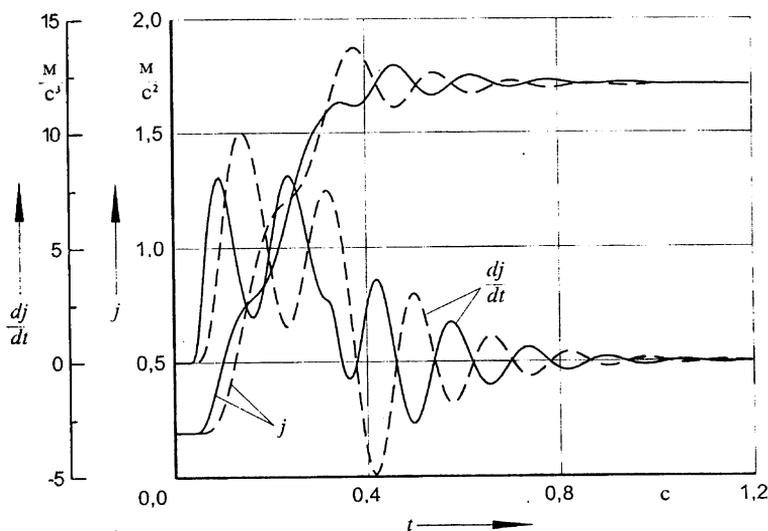


Рис. 2. Замедление и рывок центров тяжести тягача (сплошная линия) и прицепа (штриховая) снаряженного троллейбуса модели 333 при торможении двигателем с постоянной скоростью нарастания тормозного момента

снаряженной массой, как более неблагоприятной по условиям комфортабельности. Максимальные значения $\frac{dj}{dt}$ для полной и снаряженной масс составили соответственно 7,5 и 10,0 м/с³, что значительно превышает установленную ГОСТом величину. Для достижения регламентируемого показателя комфортабельности можно снизить величину $\frac{dM_T}{dt}$. Однако при этом значительно возрастет время, за которое тормозной момент двигателя достигнет своего максимального значения, что обусловлено линейным характером его изменения. Более благоприятное сочетание показателей комфортабельности и времени достижения максимальной эффективности ВТС может быть достигнуто при другом законе управления двигателем, реализующем не постоянство $\frac{dM_T}{dt}$, а постоянство скорости изменения углового замедления вала двигателя, т. е. $\frac{d\varepsilon_{дв}}{dt} = \text{const}$. Величина $\frac{d\varepsilon_{дв}}{dt}$ в данном случае должна определяться исходя из условий обеспечения регламентированного значения $\frac{dj}{dt}$ троллейбуса. Характер изменения замедления и рывка транспортного средства при таком способе управления показан на рис. 3. Из рисунка видно, что при управлении двигателем по скорости изменения его замедления достигаются высокие показатели комфортабельности движения при удовлетворительном времени выхода ВТС на максимальную эффективность.

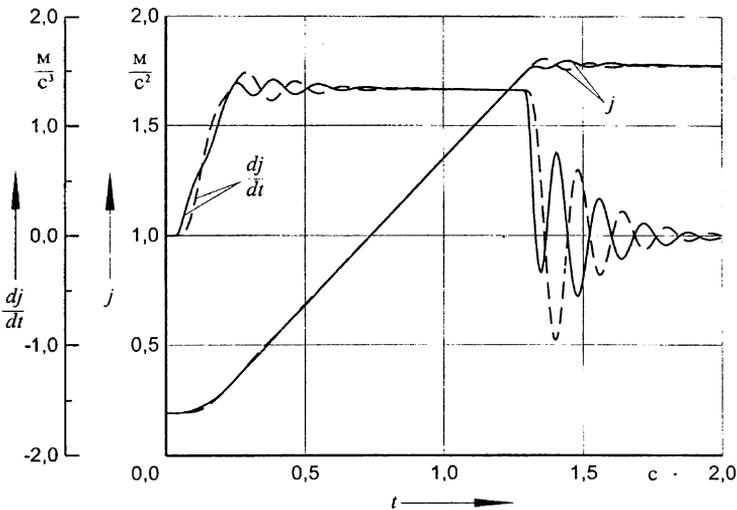


Рис. 3. Замедление и рывок центров тяжести тягача (сплошная линия) и прицепа (штриховая) снаряженного троллейбуса модели 333 при торможении двигателем с поддержанием постоянной скорости изменения замедления двигателя

Как отмечалось выше, управление вспомогательной и рабочей тормозными системами в троллейбусе осуществляется с помощью одной педали. При работе РТС вспомогательная тормозная система не отключается, а продолжает совместно с ней работать. В результате этого к ве-

душим колесам троллейбуса подводится не только тормозной момент, создаваемый фрикционными механизмами РТС, но и момент от двигателя, состоящий из противоположно направленных инерционного (вращающихся масс деталей двигателя и трансмиссии) и электромагнитного тормозного. В случае преобладания инерционного к колесам от трансмиссии будет подводится момент, направленный по ходу движения транспортного средства и, следовательно, препятствующий торможению. А в случае преобладания электромагнитного к ведущим колесам подводится дополнительный тормозной момент от двигателя, который затрудняет регулирование тормозных сил на колесах ведущего моста рабочей тормозной системой (в том числе антиблокировочной системой), а в условиях недостаточного сцепления с дорогой может вызвать блокировку ведущих колес. При совместной работе ВТС и РТС наиболее целесообразным будет создание двигателем такого тормозного момента, который бы полностью компенсировался инерционностью вращающихся деталей двигателя и трансмиссии. При этом момент, подводимый к ведущим колесам от трансмиссии, должен быть равен нулю. Величина создаваемого двигателем момента при его торможении совместно с РТС в этом случае будет определяться по выражению

$$M_T = I_{вр} \epsilon_{дв},$$

где $I_{вр}$ — момент инерции вращающихся масс двигателя и деталей трансмиссии, приведенный к валу двигателя;

$\epsilon_{дв}$ — угловое замедление вала двигателя.

При определении $I_{вр}$ рекомендуется не учитывать момент инерции ведущих колес, чтобы создать равные условия для рабочей тормозной системы по затормаживанию колес 1, 2 и 3-го мостов, поскольку РТС обеспечивает не только замедление поступательно движущихся масс троллейбуса, но и вращающихся масс колес. Для троллейбуса модели 333 $I_{вр} \approx 1,39 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, следовательно, требуемый тормозной момент двигателя при его совместном использовании с РТС будет определяться по выражению

$$M_T = 1,39 \epsilon_{дв}. \quad (1)$$

Однако управление тормозным моментом двигателя по такому закону должно осуществляться лишь в области достаточно высоких замедлений, создаваемых РТС, а в начальный период совместного торможения момент на валу двигателя должен уменьшаться вплоть до значений, определяемых по зависимости (1), только одновременно с повышением эффективности РТС таким образом, чтобы при постепенном нажатии на тормозную педаль обеспечивался постоянный рост суммарной тормозной силы от действия ВТС и РТС. При этом исходить нужно из условия обеспечения по возможности наиболее плавной статической тормозной характеристики зависимости замедления машины от перемещения тормозной педали. Степень задействования РТС в этом случае следует оценивать не по перемещению педали тормоза, а по величине давления воздуха в тормозных камерах мостов либо по создаваемому замедлению, что позволит исключить влияние запаздывания пневмати-

ческого привода рабочей тормозной системы и обеспечить плавность тормозной характеристики как в статике, так и в динамике. При таком способе управления выполнять перекрытие диапазонов управления ВТС и РТС по ходу тормозной педали становится уже нецелесообразным, поскольку формирование переходного участка от ВТС к РТС статической тормозной характеристики будет обеспечиваться за счет алгоритма управления ВТС, в котором предусмотрено плавное снижение эффективности торможения двигателем при росте тормозной силы, создаваемой РТС.

Преимуществом предложенного способа управления является то, что согласование работы ВТС и РТС при их совместном использовании осуществляется посредством регулирования выходных параметров только одной из двух систем — ВТС. Рабочая тормозная система в этом случае остается без изменений и работает как независимая, что обеспечивает ее высокую надежность в эксплуатации. При этом для функционирования алгоритма управления, кроме перемещения педали тормоза, достаточно лишь одного дополнительного входного параметра — угловой скорости вала двигателя, дифференцированием которой по времени определяются ее первая и вторая производные — замедление и рывок, необходимые для реализации указанных законов управления вспомогательной тормозной системой.

Таким образом, использование предложенных законов управления двигателем позволит повысить активную безопасность троллейбуса как за счет увеличения эффективности ВТС, так и за счет обеспечения более высокой устойчивости движения при совместном торможении ВТС и РТС.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г у р е в и ч Л. В. Некоторые результаты экспериментального определения режимов работы тормозных систем в эксплуатации // Автомобильная промышленность.— 1972.— № 3.— С. 20—22.

2. З а п о р о ж ц е в А. В., К л е н н и к о в Е. В. Износ шин и работа автомобиля / Науч.-исслед. ин-т информации автомоб. пром.-ти.— М., 1971.— 52 с.

3. Н о в и ц к и й С. Н. Выбор системы отсчета при математическом моделировании динамики движения сочлененных транспортных средств.— М., 1999. — Деп. в ВИНТИ 30.07.99. № 2511.

4. Н о в и ц к и й С. Н. Тормозные характеристики троллейбусных электродвигателей.— М., 1999. — Деп. в ВИНТИ 30.07.99. № 2510.

Представлена кафедрой
гидропневмоавтоматики
и гидропневмопривода

Поступила 27.07.2000