

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 629.33.062

А.И. Сафонов

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ  
РАЗГОНА И ТОРМОЖЕНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСА

*Описываются разработанные алгоритмы управления противобуксовочной и антиблокировочной системами троллейбуса, обеспечивающими оптимальные параметры режимов разгона и торможения.*

**Введение**

Целью данных разработок является создание единой автоматической системы управления тяговым электрическим и тормозным пневмоприводами троллейбуса, функционирующей на принципах противобуксовочной (ПБС) и антиблокировочной систем (АБС).

Отличительной особенностью троллейбусной трансмиссии по сравнению с автомобильной является отсутствие муфты сцепления и наличие электрического тягового двигателя. Это обстоятельство можно выгодно использовать при создании автоматических систем управления тяговым приводом троллейбуса как при разгоне, так и в тормозном режиме благодаря возможности формирования любой оптимальной механической характеристики двигателя. При этом проведенные исследования показали, что наиболее оптимальным выходным параметром, осуществляющим обратную связь и отображающим корректность выбранного алгоритма, является буксование (скольжение) ведущих колес троллейбуса.

**1. Алгоритмы управления процессом торможения троллейбуса**

В троллейбусе, как известно, управление рабочей и вспомогательной (торможение двигателем) тормозными системами осуществляется одной педалью, при этом существуют режимы их совместного использования. Очевидно, что без алгоритма согласования действий этих систем процесс замедления троллейбуса не всегда будет эффективным, а его параметры оптимальными. Необходимость такого алгоритма объясняется тем, что стандартный подход в проектировании рабочей тормозной системы (РТС) исключает «вмешательство» в ее работу вспомогательной тормозной системы (ВТС) [2, 4, 13], эффективность которой тоже достаточно высока. В итоге суммарное воздействие зачастую приводит к потере устойчивости и управляемости машины из-за повышенного скольжения ведущих колес [11]. В существующих разработках такой алгоритм отсутствует [1, 2, 12, 13].

В связи с повышенным скольжением ведущих колес актуальна также проблема управления торможением троллейбуса, оборудованного стандартной АБС, поскольку в алгоритме ее работы не учтено влияние ВТС, т. е. двигателя, на процесс замедления [1, 12, 13]. Таким образом, алгоритма совместной работы стандартной АБС и вспомогательной тормозной системы тоже не существует.

Кроме того, эффективность ВТС в существующих аналогах алгоритмов регулируется только тормозной педалью и не корректируется в зависимости от степени загрузки троллейбуса, дорожно-сцепных качеств, особенностей использования на сочлененных машинах, хотя подобные алгоритмы существуют для пневматических и гидравлических приводов рабочих тормозных систем мобильных машин [1, 2, 4]. Разработанные и описанные далее алгоритмы (некоторые частично, некоторые комплексно) решают обозначенные проблемы и позволяют оптимизировать процесс торможения троллейбуса.

Одним из возможных направлений в согласовании рабочей и вспомогательной тормозных систем может являться снижение, вплоть до отключения, тормозной эффективности двига-

теля в процессе их совместной работы. Наиболее рациональным вариантом этого направления будет алгоритм, в котором двигатель создает такой тормозной момент, который компенсировал бы инерционность вращающихся деталей двигателя и трансмиссии. В этом случае тормозной момент, подводимый к ведущим колесам от трансмиссии, будет близок к нулю, а рабочая тормозная система самостоятельно выполнит требования по эффективности торможения, как это предусмотрено только ее алгоритмом работы. При этом система управления должна обеспечивать создание тормозного момента двигателя

$$M_{\text{дв.т}} = I_{\text{вр}} \cdot \epsilon_{\text{дв}},$$

где  $I_{\text{вр}}$  – момент инерции вращающихся масс двигателя и деталей трансмиссии, кроме колес, приведенный к валу двигателя;  $\epsilon_{\text{дв}}$  – угловое замедление вала двигателя. Очевидно, что текущее значение  $M_{\text{дв.т}}$  будет находиться в пределах значений, определяемых тормозной характеристикой данного двигателя  $M_{\text{дв.т}}^* = f(stup, \omega_{\text{дв}})$  в зависимости от положения  $stup$  тормозной педали и текущей угловой скорости  $\omega_{\text{дв}}$  вала двигателя [2, 3]. Следует отметить, что этот, а также другие возможные варианты алгоритмов данного направления имеют существенный недостаток. Вся энергия при торможении в этом случае преобразуется рабочими тормозными механизмами в тепло, что, во-первых, ускоряет их износ, а во-вторых, если учесть, что современные ВТС предусматривают рекуперацию энергии через двигатель в тяговую сеть [3], лишает ВТС такой возможности при ее отключении или недостаточном использовании.

Максимально загружают двигатель и частично рабочую тормозную систему предлагаемые алгоритмы второго направления, позволяющие избежать указанный энергетический недостаток. Кроме того, в них может быть предусмотрена автоматическая коррекция работы ВТС в зависимости от степени загрузки троллейбуса, дорожно-цепных качеств, особенностей использования на сочлененных машинах.

Как уже отмечалось, в алгоритме работы известной тормозной системы [2] не учитывается загрузка троллейбуса и перераспределение тормозных сил при торможении тяговым электродвигателем. Вследствие этого, в начальный период торможения при небольшой загрузке (цепном весе) и существенном тормозном моменте ведущие колеса, особенно на дороге с низким коэффициентом сцепления, могут находиться в состоянии, близком к блокированию. Это может вызвать потерю устойчивости и управляемости троллейбуса. Один из предлагаемых алгоритмов тормозной системы [7] автоматически обеспечивает коррекцию тормозного момента  $M_{\text{дв.т}}$  тягового электродвигателя пропорционально загрузке. Таким образом, момент описывается характеристикой

$$M_{\text{дв.т}} = k \cdot f(stup, \omega_{\text{дв}}),$$

где  $k \leq 1$  – коэффициент, определяющий степень загрузки троллейбуса.

Использование известной вспомогательной тормозной системы на сочлененном троллейбусе [9] также имеет свои особенности. В частности, для наиболее распространенной схемы трансмиссии с задним ведущим мостом тягача торможение тяговым электродвигателем может ухудшать устойчивость и управляемость машины [9]. Это объясняется тем, что тормозной момент от двигателя передается только на ведущие колеса тягача (средний мост), при этом прицеп (задний мост) не затормаживается и, «набегая» на тягач, может вызвать потерю устойчивости, т. е. «складывание» сочлененного троллейбуса. Следующий предлагаемый алгоритм управления тормозной системой [5, 6] устраняет указанный недостаток, так как осуществляет затормаживание колес прицепа с интенсивностью, определяемой давлением воздуха  $p_{\text{т.к.3}}$  в тормозных камерах прицепа и зависящей от величины перемещения  $stup$  тормозной педали и значения  $M_{\text{дв.т}}^*$  тормозного момента на тяговом электродвигателе. Таким образом, согласно данному алгоритму формируется зависимость

$$p_{\text{т.к.3}} = f(stup, M_{\text{дв.т}}^*),$$

взаимосвязанная с тормозной характеристикой двигателя  $M_{дв.т}^* = f(stup, \omega_{дв})$ . В этом случае обеспечивается растягивающее усилие в сцепном устройстве, вследствие чего прицеп не будет «набегать» на тягач и ухудшать устойчивость движения сочлененного троллейбуса при торможении ВТС.

Очевидно, что все предлагаемые алгоритмы решают одну из основных задач тормозной системы по обеспечению высокой степени управляемости и устойчивости транспортного средства. Общим недостатком рассмотренных выше вариантов является частный способ решения данной задачи. Проведенные исследования [4, 11] показывают, что наиболее оптимальным и универсальным выходным параметром, который оценивает управляемость и устойчивость машины и осуществляет обратную связь в автоматической системе независимо от условий эксплуатации, т. е. позволяет комплексно решать поставленную задачу, является скольжение  $S$  (буксование  $\delta$ ) ведущих колес троллейбуса. В этой связи наиболее перспективными представляются алгоритмы управления процессом торможения, основанные на принципах работы антиблокировочной (противобуксовочной) системы, т. е. оценивающие величину  $S$ . Однако, как отмечалось ранее, в существующих аналогах функции АБС не распространяются на вспомогательную тормозную систему и отсутствует алгоритм совместной работы стандартной АБС и ВТС. Следующие предлагаемые алгоритмы направлены на устранение этой проблемы.

Алгоритм тормозной системы троллейбуса [8] предусматривает в случае достижения верхней критической величины скольжения одного из ведущих колес снижение тормозного момента тягового электродвигателя в циклическом режиме до тех пор, пока  $S$  не установится в пределах допустимого коридора. При незначительном (ниже установленного диапазона значений) скольжении ведущих колес для увеличения на них реализуемой тормозной силы момент двигателя увеличивается до тех пор, пока  $S$  не поднимется выше нижней границы. Если скольжение ведущих колес находится в заданных пределах, то  $M_{дв.т}$  стабилизируется. Таким образом, основу алгоритма составляет непрерывное формирование тормозной характеристики двигателя вида

$$M_{дв.т} = f(stup, \omega_{дв}, S). \quad (1)$$

При этом, как и всегда,  $M_{дв.т} \leq M_{дв.т}^*$ . Данный алгоритм также не лишен недостатков в режиме совместного использования рабочей и вспомогательной тормозных систем. В этом случае он не обеспечивает управление РТС в зависимости от  $S$ , т. е. при выходе за верхний предел скольжения либо недостаточно использует возможности двигателя, либо оказывается неспособным предотвратить блокирование колес при низких коэффициентах сцепления.

Таким образом, анализ рассмотренных алгоритмов еще раз подчеркивает необходимость управления процессом торможения, которое согласовывало бы действия РТС, АБС и ВТС. Алгоритм такого управления, максимально использующий в процессе торможения двигатель, заключается в следующем. В режиме торможения вспомогательной тормозной системой алгоритм не отличается от предыдущего варианта и обеспечивает тормозную характеристику (1). В период совместных действий ВТС и РТС также отслеживается скольжение ведущих колес и в зависимости от его значения уменьшаются, увеличиваются или стабилизируются тормозной момент двигателя и давление  $p_{т.к.2}$  в тормозных камерах ведущих колес. При этом соблюдается следующая очередность.

1. В случае превышения верхнего предела по скольжению в первую очередь снижается  $p_{т.к.2}$ . Сброс давления продолжается до тех пор, пока  $S$  не установится в пределах допустимого коридора. Если снизить скольжение до требуемого уровня в результате этих действий не удалось и давление в тормозных камерах стало атмосферным, наступает вторая стадия и уменьшается тормозной момент двигателя.

2. При незначительном скольжении ведущих колес для увеличения на них реализуемой тормозной силы очередность действий обратная. Первым увеличивается  $M_{дв.т}$ , и если этого недостаточно, т. е.  $S$  не поднялось до требуемого уровня, а  $M_{дв.т} = M_{дв.т}^*$ , то далее повышается давление в тормозных камерах.

3. Если уровень скольжения находится в заданных пределах, то  $M_{дв.т}$  и  $p_{т.к.2}$  стабилизируются. Таким образом, в режиме «ВТС – РТС» алгоритм должен обеспечивать взаимосвязанные тормозные характеристики

$$M_{дв.т} = f(stup, \omega_{дв}, S, p_{т.к.2}) ; p_{т.к.2} = f(stup, S, M_{дв.т}).$$

Управление тормозными усилиями остальных не ведущих колес осуществляется в обычном для АБС режиме, т. е. по известным принципам и алгоритмам ее работы.

## 2. Алгоритм противобуксовочной системы троллейбуса

Так же, как и скольжение ведущих колес при торможении троллейбуса, их буксование при разгоне является наиболее информативным и универсальным параметром, на базе которого наиболее целесообразно формировать алгоритм процесса разгона [11], т. е. в данном случае алгоритм ПБС троллейбуса.

Предлагаемый алгоритм автоматического управления двигателем, базирующийся на известных принципах ПБС [12, 13], предусматривает пропорциональное задание педалью хода тягового момента двигателя  $M_{дв}$ , а также контроль и ограничение буксования ведущих колес в установленном диапазоне путем коррекции  $M_{дв}$  в пределах тяговой характеристики. Существуют аналогичные алгоритмы для транспортных средств с механической трансмиссией [1, 12, 13]. В сравнении с ними предлагаемый вариант более простой, так как технически проще его реализация на троллейбусе, имеющем, как известно, электрический тяговый привод. Изначально тяговый момент двигателя определяется характеристикой  $M_{дв}^* = f(stup_x, \omega_{дв})$ , где  $stup_x$  – положение педали хода. Согласно алгоритму повышения устойчивости и управляемости троллейбуса в процессе разгона  $M_{дв}^*$  может увеличиваться, уменьшаться или стабилизироваться в зависимости от уровня буксования  $\delta$  колес. При выходе  $\delta$  за верхний предел допустимых значений тяговый момент двигателя уменьшается до тех пор, пока уровень буксования не установится в пределах требуемого коридора. При низком значении буксования для повышения реализуемой силы тяги алгоритм обеспечивает увеличение  $M_{дв}$  до тех пор, пока  $\delta$  не поднимется до требуемого уровня. Если уровень буксования находится в заданных пределах, то  $M_{дв}$  стабилизируется. Таким образом, обеспечивается тяговая характеристика вида

$$M_{дв.} = f(stup_x, \omega_{дв}, \delta).$$

## Заключение

Анализ известных алгоритмов управления процессами разгона и торможения, предназначенных для повышения управляемости, устойчивости, а значит и безопасности транспортных средств, показал, что их применение при производстве троллейбусов не всегда эффективно в силу указанной выше специфики работы электрического тягового привода, а в определенных режимах и вовсе требуются специальные алгоритмы. В этой связи предлагаемые в данной статье алгоритмы могут быть в полной мере использованы в автомобилестроении при создании и совершенствовании тяговых и тормозных приводов пассажирских и грузовых транспортных средств, оборудованных электромеханической трансмиссией. В частности, данные варианты применялись при разработке ПБС и АБС троллейбуса, работы по отладке и внедрению которых проводятся в настоящее время на УП «Белкоммунмаш».

## Список литературы

1. Автомобильный справочник. – М.: За рулем, 2002. – 895 с.
2. Богдан Н.В., Атаманов Ю.Е., Сафонов А.И. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет. – Мн.: Ураджай, 1999. – 345 с.

3. Богдан Н.В., Николаев В.П., Сафонов А.И. Перспективные направления развития городского нерельсового электрического транспорта. – Мн.: Ураджай, 1999. – 70 с.
4. Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод мобильных машин: Теория систем автоматического управления / под ред. В.П. Автушко, Н.В. Богдан и др. – Мн.: НП ООО ПИОН, 2001. – 396 с.
5. Пат. № 7018С2 (ВУ), МПК 7 В 60Т 13/68, В 60L 7/24. Тормозная система транспортного средства / Н.В. Богдан, А.И. Сафонов, С.Н. Новицкий, К.И. Мазаник. – № а20010640; Заявл. 23.07.2001; Оpubл. 30.06.2005 // Бюл. № 2. – 2005. – С. 146.
6. Пат. № 706 U (ВУ), МПК 7 В 60К 41/20, В 60Т 13/24. Тормозная система транспортного средства / Н.В. Богдан, А.И. Сафонов, К.И. Мазаник. – № u20020091; Заявл. 26.03.2002; Оpubл. 30.12.2002 // Бюл. № 4. – 2002. – С. 193–194.
7. Пат. № 794 U (ВУ), МПК 7 В 60Т 8/30, В 60L 7/22. Тормозная система транспортного средства / Н.В. Богдан, А.И. Сафонов, К.И. Мазаник, С.Н. Новицкий. – № u20020114; Заявл. 19.04.2002; Оpubл. 30.03.2003 // Бюл. № 1. – 2003. – С. 210.
8. Пат. № 823 U (ВУ), МПК 7 В 60Т 8/32, В 60L 7/22. Тормозная система транспортного средства / Н.В. Богдан, А.И. Сафонов, К.И. Мазаник. – № u20020184; Заявл. 26.06.2002; Оpubл. 30.03.2003 // Бюл. № 1. – 2003. – С. 210.
9. Повышение устойчивости движения сочлененного троллейбуса при торможении тяговым электродвигателем / Н.В. Богдан, А.И. Сафонов, А.С. Поварехо, С.Н. Новицкий // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2000. – № 4. – С. 56–61.
10. Сафонов А.И. Динамика разгона троллейбуса, оборудованного противобуксовочной системой // Вестник машиностроения. – 2005. – № 9. – С. 85–86.
11. Сафонов А.И. Динамика торможения троллейбуса при совместном использовании рабочих и вспомогательной тормозных систем // Вестник машиностроения – 2005. – № 7. – С. 85–87.
12. Фрумкин А.К., Алышев И.И., Попов А.И. Антиблокировочные и противобуксовочные системы легковых автомобилей. Обзорная информация. Легковые автомобили и автобусы. – М.: ЦНИИТЭИ АВТОПРОМ, 1989. – 52 с.
13. Фрумкин А.К., Алышев И.И., Попов А.И. Современные антиблокировочные и противобуксовочные системы грузовых автомобилей, автобусов и прицепов. Обзорная информация. Грузовые автомобили и специализированный автомобильный транспорт. – М.: ЦНИИТЭИ АВТОПРОМ, 1990. – 57 с.

Поступила 03.05.05

*Белорусский национальный  
технический университет,  
Минск, пр. Независимости, 65  
e-mail: ais\_minsk@mail.ru*

**A.I. Safonov**

## **THE CONTROL ALGORITHMS OF TRACTION AND BRAKING PROCESSES OF TROLLEY BUS**

The developed algorithms of anti-lock braking system and anti-slip regulation system for trolley bus which provide optimum parameters of traction and braking processes are described.