

УДК (UDC) 629.3.07

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУПЕРАТИВНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ  
С ПОМОЩЬЮ ПЕДАЛИ АКСЕЛЕРАТОРАREGENERATIVE BRAKING CONTROL ALGORITHM USING  
THE ACCELERATOR PEDALБутарович Д.О., Скотников Г.И., Эраносян А.В.  
Butarovich D.O., Skotnikov G.I., Eranosyan A.V.Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (Москва, Россия)  
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

**Аннотация.** Современные производители электрических транспортных средств повсеместно внедряют управление рекуперативным торможением с помощью педали акселератора. Одной из трудностей реализации рекуперативного торможения является взаимодействие рабочей тормозной системы и вспомогательной, использующей тяговый электродвигатель. В связи с этим возникла концепция управления рекуперативным торможением одной педалью – педалью акселератора. В настоящее время подобная концепция представлена на многих современных электрических автомобилях, таких как Tesla Model S, Tesla Model X, Hyundai Kona. Целью работы является создание и последующая отладка алгоритма управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора применительно к городскому общественному электротранспорту. Разработанный алгоритм реализован в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink. При помощи имеющихся блоков и подсистем составлена математическая модель движения электрического транспортного средства. Разработана математическая модель движения электрического транспортного средства, позволяющая выполнять тестирование и отладку разрабатываемых алгоритмов. Методами имитационного моделирования подтверждена работоспособность предложенного метода управления рекуперативным торможением педалью акселератора. Научная новизна исследования заключается в синтезе алгоритма управления рекуперативным торможением применительно к эксплуатации общественного электротранспорта в городской среде с частыми остановками, движением по дорогам с уклонами, началом движения в подъем. Практическая ценность данного исследования заключается в возможности использования предложенного алгоритма управления в городском общественном электрическом транспорте с бортовым накопителем энергии, например, в электробусах.

**Ключевые слова:** педаль акселератора, система управления, электробус, тяговый электродвигатель, электропривод.

**Дата принятия к публикации:**

22.11.2022

**Дата публикации:**

10.03.2023

**Abstract.** Modern manufacturers of electric vehicles everywhere introduce regenerative braking control using the accelerator pedal. One of the difficulties in implementing regenerative braking is the interaction of the service braking system and the auxiliary one using a traction motor. In this regard, the concept of regenerative braking control with one pedal – the accelerator pedal. Currently, a similar concept is presented on many modern electric cars, such as the Tesla Model S, Tesla Model X, Hyundai Kona. The aim of study is the creation and subsequent debugging of an algorithm for controlling regenerative braking using the accelerator pedal in relation to urban public electric transport. The developed algorithm is implemented in the MATLAB/Simulink simulation environment. Using the available blocks and subsystems, a mathematical model of the movement of an electric vehicle has been compiled. A mathematical model of the movement of electric vehicle has been developed that allows testing and debugging of the algorithms being developed. Simulation methods have confirmed the operability of the proposed method of regenerative braking control by the accelerator pedal. The scientific novelty of the research lies in the synthesis of an algorithm for controlling regenerative braking in relation to the operation of public electric transport in an urban environment with frequent stops, traffic on roads with slopes and starting to climb. The practical utility (value) of this research lies in the possibility of using the proposed control algorithm in urban public electric transport with on-board energy storage, for example, in electric buses.

**Keywords:** accelerator pedal, control system, electric bus, traction motor, electric drive.

**Date of acceptance for publication:**

22.11.2022

**Date of publication:**

10.03.2023



**Сведения об авторах:**

**Бутарович Дмитрий Олегович** – кандидат технических наук, директор, Инжиниринговый центр им. А.А. Липгарта, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
*e-mail: buta73@bmstu.ru*

**Скотников Глеб Игоревич** – кандидат технических наук, инженер, Инжиниринговый центр им. А.А. Липгарта, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
*e-mail: skotnikov.g@yandex.ru*

*ORCID: 0000-0003-3162-5356*

**Эраносян Артем Ванович** – инженер-программист, Инжиниринговый центр им. А.А. Липгарта, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
*e-mail: artem\_bmstu@mail.ru*

*ORCID: 0000-0002-1591-5831*

**Authors' information:**

**Dmitriy O. Butarovich** – Candidate Technical Sciences, Director, Lipgart EC at Bauman Moscow State Technical University,  
*e-mail: buta73@bmstu.ru*

**Gleb I. Skotnikov** – Candidate Technical Sciences, Engineer, Lipgart EC at Bauman Moscow State Technical University,  
*e-mail: skotnikov.g@yandex.ru*  
*ORCID: 0000-0003-3162-5356*

**Artem V. Eranosyan** – Software engineer, Lipgart EC at Bauman Moscow State Technical University,  
*e-mail: artem\_bmstu@mail.ru*  
*ORCID: 0000-0002-1591-5831*

## 1. Введение

Сегодня всё большую популярность приобретают колесные транспортные средства, использующие для движения электродвигатель. Основными преимуществами таких транспортных средств в сравнении с традиционными являются низкий уровень шума, локальное снижение уровня вредных выбросов в атмосферу, а также высокая эффективность. Последнее достигается за счет свойства электрического двигателя работать как в тяговом, так и в тормозном режимах, при этом энергия замедления транспортного средства накапливается в аккумуляторной батарее.

Одной из трудностей реализации рекуперативного торможения является взаимодействие рабочей тормозной системы и вспомогательной, использующей тяговый электродвигатель. В связи с этим возникла концепция управления рекуперативным торможением одной pedalью – pedalью акселератора. Управление крутящим моментом электродвигателя реализовано в зависимости от степени нажатия педали акселератора и скорости движения транспортного средства [1–3]. Данная концепция широко используется на современных электрических автомобилях,

таких как Tesla Model S, Tesla Model X, Hyundai Kona.

Алгоритм в большинстве дорожных ситуаций позволяет не прибегать к использованию педали тормоза, что обеспечивает наибольшую долю энергии рекуперации и частичный возврат электроэнергии, затраченной на разгон транспортного средства. Управление одной pedalью снижает утомляемость водителя, сокращает время до начала торможения и позволяет реализовать рекуперацию на всех современных электроавтомобилях, использующих электронную pedalю акселератора.

Цель работы - создание алгоритма управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора применительно к городскому общественному электротранспорту и последующая его отладка.

## 2. Описание алгоритма

Рассмотрим алгоритм определения тормозного момента по нажатию на pedalю акселератора. В качестве основы авторами выбран алгоритм [4], в который внесены ряд нововведений:

1) чтобы поведение электроавтомобиля было подобно автомобилям с традиционной сило-

вой установкой, в новом алгоритме реализован ползущий режим, обеспечивающий движение автомобиля со скоростью до 5 км/ч при полностью отпущенных педалях;

2) алгоритм позволяет осуществлять безоткатное движение в горку с углом подъема до 7°;

3) алгоритм ограничивает скорость движения при спуске с горки благодаря рекуперативному торможению.

В предлагаемом алгоритме величина дополнительного тягового момента не зависит от нажатия на педаль акселератора, это обусловлено необходимостью обеспечения движения с малыми скоростями (до 5 км/ч) и подъема в горку без нажатия на педаль акселератора.

Режим рекуперации энергии становится доступен при скорости автомобиля более 5 км/ч (рис. 1). Пороговое значение скорости установлено по причине низкого коэффициента полезного действия электродвигателя при малых частотах вращения.

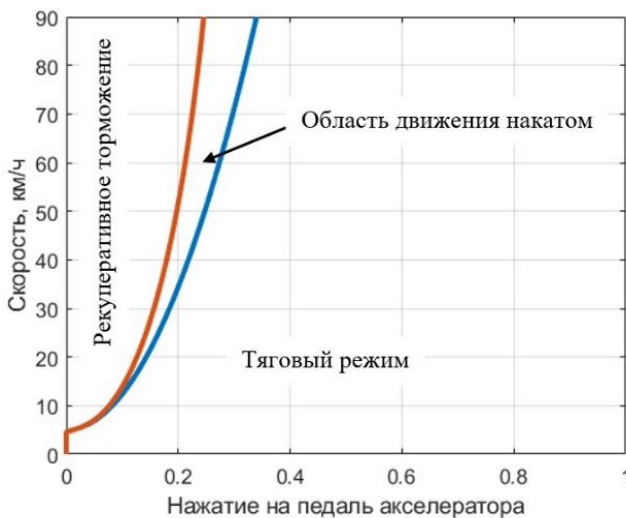


Рис. 1. Режимы работы электродвигателя

С увеличением скорости увеличивается зона свободного хода педали акселератора (область движения накатом), что позволяет автомобилю выполнять движение накатом и является наиболее эффективным режимом движения с точки зрения минимизации затрат энергии.

Математическое представление кривых (рис. 1) перехода из тягового режима в движение накатом - синяя кривая (1) и из дви-

жения накатом в рекуперативное торможение - красная кривая (2).

$$P_{cu} = \varphi \left( \frac{V - V_{start}}{V_{max}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

где  $V$  – текущая скорость автомобиля, км/ч;  $V_{start} = 5$  км/ч – граничная скорость автомобиля;  $V_{max}$  – максимальная скорость движения автомобиля, км/ч;  $m$  – параметр, характеризующий вид функции.

$$P_{cl} = \varphi \left( \frac{V - V_{start}}{V_{max}} \right)^{\frac{1}{m}} - c_h \left( \frac{V - V_{start}}{V_{max}} \right), \quad (2)$$

где  $c_h$  – параметр, характеризующий величину нажатия на педаль акселератора при движении с максимальной скоростью для перехода в режим рекуперации.

В алгоритме присутствует возможность изменения формы кривой нарастания тягового и тормозного моментов в зависимости от хода педали акселератора (в том числе и по нелинейному закону).

При разработке алгоритма необходимо исключить появление внутри системы возможных автоколебаний на переходах из тягового режима в рекуперацию и обратно. Это удалось обеспечить путем внедрения плавного нарастания тормозного и снижения тягового момента без перекрытия в точке начала рекуперации при отпущенной педали акселератора. Таким образом система самостоятельно определяет устойчивую скорость транспортного средства в текущих условиях движения (рис. 2).

Кроме того, предусмотрено изменение величины максимального тормозного момента в зависимости от скорости автомобиля, что обеспечивает плавное нарастание замедления во время рекуперативного торможения.

Обработка величины нажатия педали акселератора в управляющий сигнал представлена на рис. 3.

Дальнейшее преобразование управляющего сигнала в крутящий момент, запрашиваемый от тягового электродвигателя, отражено на рис. 4.

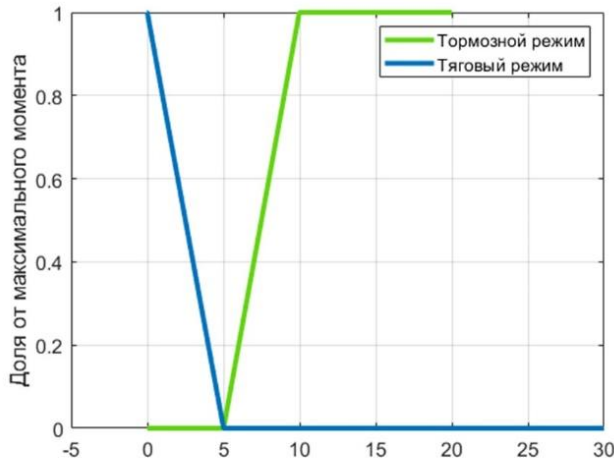


Рис. 2. Зависимости удельного тягового/тормозного моментов от скорости при отпущенной педали акселератора

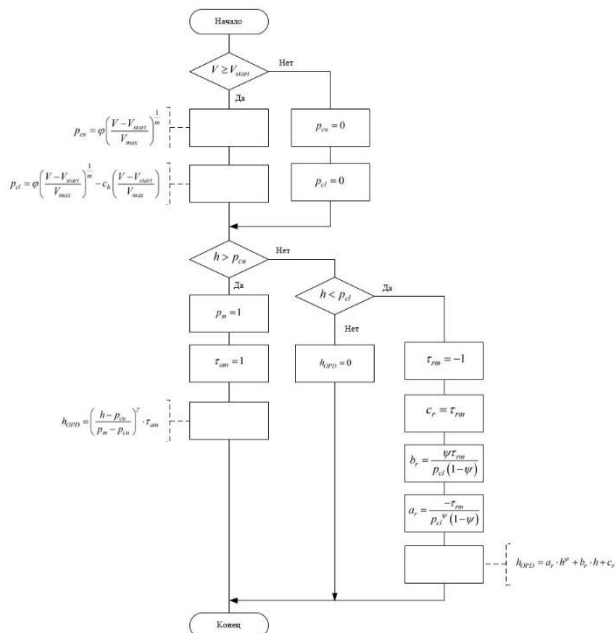


Рис. 3. Алгоритм преобразования нажатия на педаль акселератора в управляющий сигнал ( $h$  – сигнал с педали акселератора;  $V$  – текущая скорость транспортного средства;  $h_{OPD}$  – сигнал управления тяговым электродвигателем:  $h_{OPD} > 0$  – тяговый режим;  $h_{OPD} = 0$  – движение накатом;  $h_{OPD} < 0$  – рекуперативное торможение;  $V_{start} = 5$  км/ч – скорость транспортного средства для активации режима рекуперации)

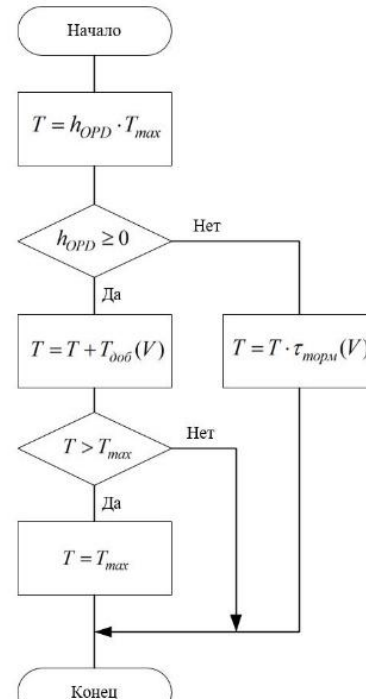


Рис. 1. Алгоритм преобразования управляющего сигнала в крутящий момент, запрашиваемый от тягового электродвигателя ( $T_{max}$  – максимальный крутящий момент тягового электродвигателя, доступный в текущих условиях;  $T_{доб}(V)$  – добавочный крутящий момент для обеспечения движения при отпущенных педалях;  $\tau_{торм}(V)$  – доля максимального тормозного момента)

Величина доступного крутящего момента определяется исходя из возможностей тягового электродвигателя и состояния батареи в текущих условиях.

### 3. Имитационное моделирование

Тестирование и отладка алгоритма проводились с использованием пакета прикладных программ MATLAB/Simulink на имитационной модели, описанной в [5]. Применение имитационного моделирования позволяет избежать большого количества ошибок на этапе формирования алгоритма, что позволяет сократить время создания рабочего прототипа. Техническая характеристика транспортного средства представлена в табл. 1.

Таблица 1  
 Техническая характеристика транспортного средства

Параметр	Значение
Расчетная масса, кг	13700
Высота, мм	2990
Ширина, мм	2500
Колесная база, мм	3770
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,7
Передаточное отношение главной передачи	4,55
Размерность шины	245/70 R19.5
Коэффициент сопротивления качению	0,011

Характеристика тягового электродвигателя отражена на рис. 5.

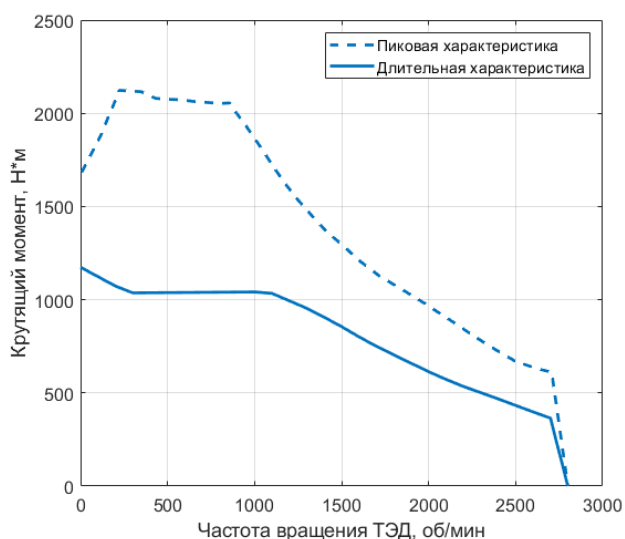
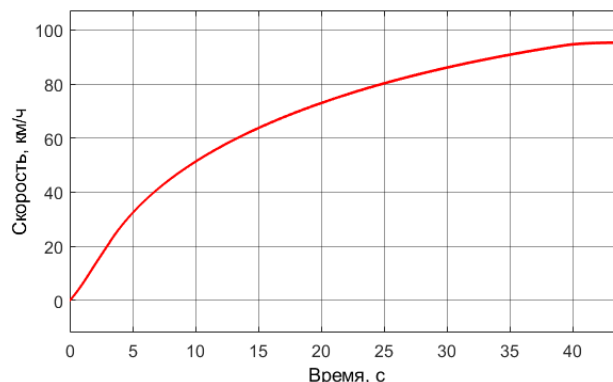


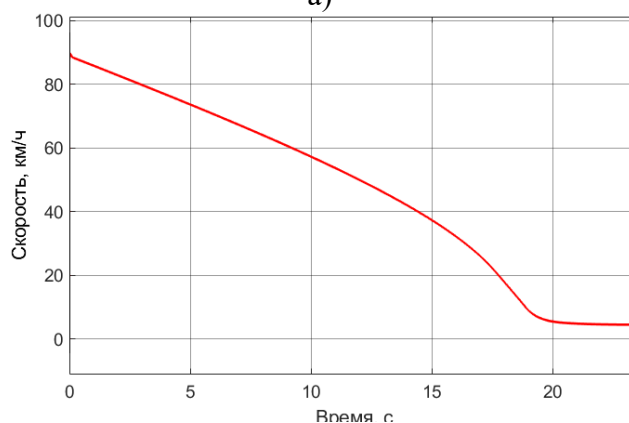
Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика тягового электродвигателя

Исследование проводилось для движения в следующих режимах:

- 1) разгон от 0 км/ч до максимальной скорости при полном нажатии педали акселератора (рис. 6, а);
- 2) рекуперативное торможение с максимальной скорости до 5 км/ч (рис. 6, б);
- 3) начало движения в подъем с уклоном  $4^\circ$  при полностью отпущенных педалях (рис. 7);
- 4) движение на спуске с уклоном  $4^\circ$  при полностью отпущенных педалях (рис. 8);

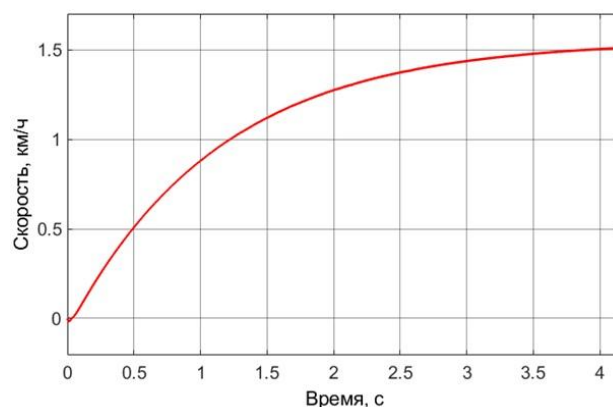


а)



б)

Рис. 6. Изменение скорости движения с течением времени при: а - разгоне автомобиля (педаль акселератора полностью нажата); б - рекуперативном торможении (педаль акселератора отпущена)



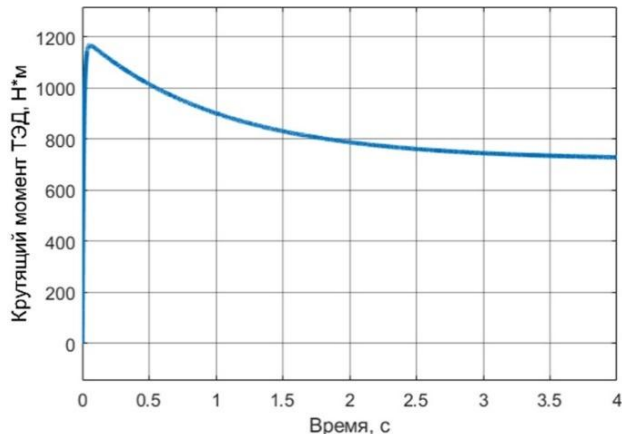


Рис. 7. Изменение скорости и крутящего момента тягового электродвигателя при движении в подъем с отпущенными педалями

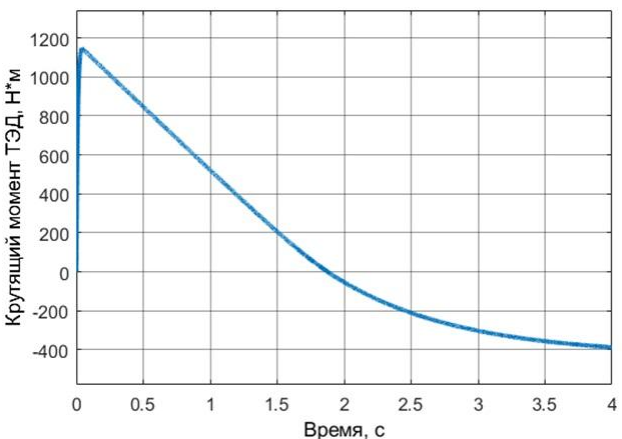
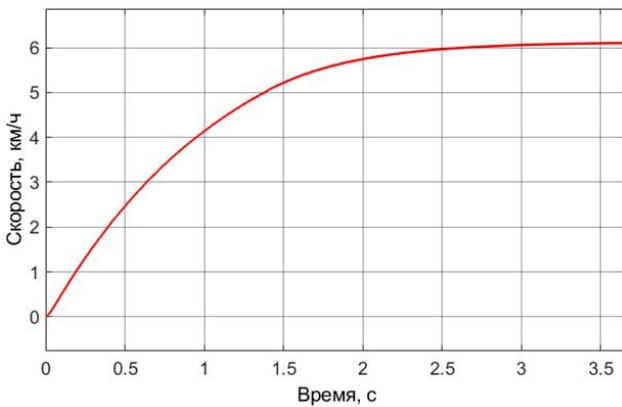


Рис. 8. Изменение скорости и крутящего момента тягового электродвигателя при движении на спуске с отпущенными педалями

Результаты моделирования движения транспортного средства в тяговом и тормозном режимах представлены в виде графиков ускорений в зависимости от скорости движения автомобиля и нажатия на педаль акселератора при движении на длительной (рис. 9) и кратковременной характеристиках (рис. 10).

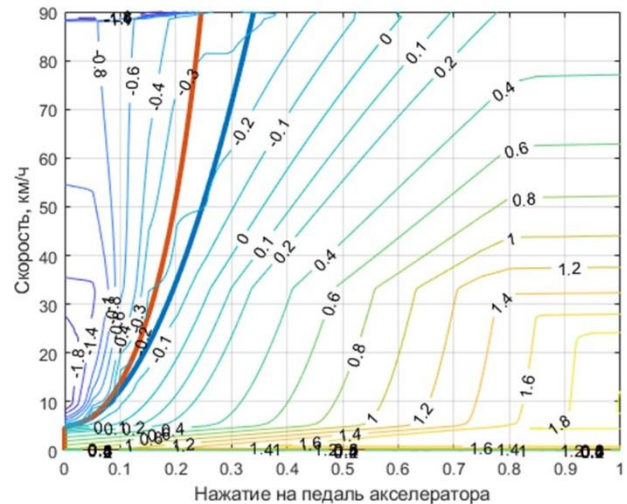


Рис. 2. Ускорение/замедление транспортного средства в зависимости от степени нажатия педали акселератора и скорости при движении на кратковременной характеристике тягового электродвигателя

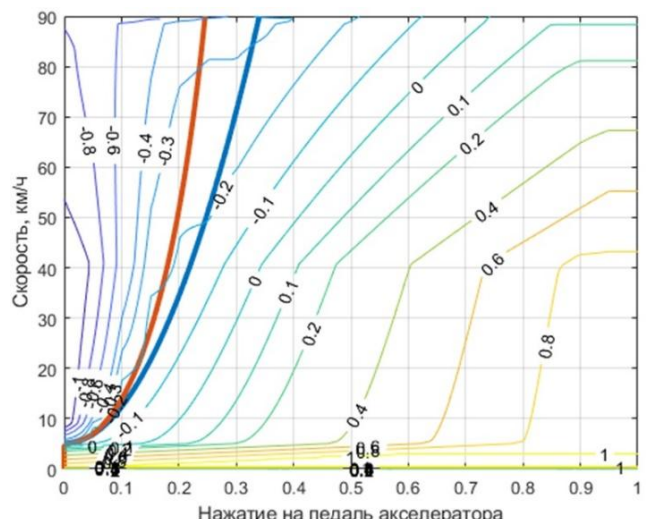


Рис. 10. Ускорение/замедление транспортного средства в зависимости от степени нажатия педали акселератора и скорости при движении на длительной характеристике тягового электродвигателя

#### 4. Заключение

1. Разработан алгоритм системы управления тягой и рекуперативным торможением тяговым электродвигателем при помощи педали акселератора.

2. Разработанный алгоритм обеспечивает:  
 - установившееся движение транспортного средства со скоростью до 5 км/ч по горизонтальной поверхности (ползущий режим) при полностью отпущенных педалях;

- безоткатное движение в подъем при опущенных педалях (со скоростью не более 5 км/ч);
- ограничение скорости транспортного средства при движении на спуске (скорость не более 10 км/ч);
- сокращение времени до начала торможения транспортного средства;
- увеличение срока службы тормозных накладок;

- более комфортное вождение при необходимости частых торможений, что особенно актуально для городского общественного транспорта;
  - снижение усталости водителя, поскольку отсутствует необходимость перемещения ноги между педалями.
3. Методами имитационного моделирования подтверждена работоспособность предложенного алгоритма.

### Список литературы

1. Schafer D., Lamantia M., Chen P. Modeling and Spacing Control for an Electric Vehicle with One-Pedal-Driving Feature // American Control Conference (ACC), New Orleans, May 2021. DOI: 10.23919/ACC50511.2021.9483356.
2. Su Z., Yang S., Chen P. Adaptive Control and Parameter Estimation for Electric Vehicles with One-Pedal-Driving Feature in Platooning Applications // IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), San Diego, August 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCTA48906.2021.9659040>.
3. Cuma M., Unal C., Savrun M. Design and implementation of algorithms for one pedal driving in electric buses // Engineering Science and Technology an International Journal. 2021. P. 138-144. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.12.014.
4. Van Boekel J., Besselink I., Nijmeijer H. Design and realization of a One-Pedal-Driving algorithm for the TU/e Lupo EL // World Electric Vehicle Journal. 2015. № 7(2). P. 226-237. DOI: 10.3390/wevj7020226.
5. Gorelov V.A., Butarovich D.O., Stduhin A.A., Skotnikov G.I. Simulation-based identification of the parameters of a minibus hybrid powertrain // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Moscow, October 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012013.

### References

1. Schafer D., Lamantia M., Chen P. Modeling and Spacing Control for an Electric Vehicle with One-Pedal-Driving Feature. *American Control Conference (ACC)*, New Orleans, May 2021. DOI: 10.23919/ACC50511.2021.9483356.
2. Su Z., Yang S., Chen P. Adaptive Control and Parameter Estimation for Electric Vehicles with One-Pedal-Driving Feature in Platooning Applications. *IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, San Diego, August 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCTA48906.2021.9659040>.
3. Cuma M., Unal C., Savrun M. Design and implementation of algorithms for one pedal driving in electric buses. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2021, pp. 138-144. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.12.014.
4. Van Boekel J., Besselink I., Nijmeijer H. Design and realization of a One-Pedal-Driving algorithm for the TU/e Lupo EL. *World Electric Vehicle Journal*, 2015, No. 7(2), pp. 226-237. DOI: 10.3390/wevj7020226.
5. Gorelov V.A., Butarovich D.O., Stduhin A.A., Skotnikov G.I. Simulation-based identification of the parameters of a minibus hybrid powertrain. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Moscow, October 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/534/1/012013.