



АНАЛИТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТ НА РЕКУПЕРАТИВНОТО СПИРАНЕ ЗА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АВТОБУСИ

Илко Търпов, Тодор Лалев
itarpov@vtu.bg, tlalev@vtu.bg

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”,
София 1574, ул. „Гео Милев” № 158
БЪЛГАРИЯ

Резюме: В днешно време нулевоемисионните транспортни средства намиран все по-голямо приложение в транспортните системи на съвременните урбанизирани ареали. Наложеното европейско изискване за внедряването им на петдесет на сто от всички автобуси до края на 2030 година и сто процентното им използване до 2060 година ги фаворизира.

Избора на електрически автобус представлява сложен технико-политически процес, който е съпроводен със многообразни изисквания и подпомогнат от доказали се методики за съпоставка на разнообразни и често противоречиви критерии като цена, надеждност, дълготрайност и ефективност през целия жизнен цикъл. На пазара съществува голямо разнообразие от марки, модели, габарити, капацитет на тяговите батерии, пробег с едно зареждане, мощност на тяговите двигатели и др. показатели, които могат да се видят от каталозите на техните производители и да се съпоставят.

Един от важните критерии, от които се интересуват превозвачите е енергийната ефективност и разходите през периода на експлоатация. Поради тази причина, възниква необходимост от оценка на техническото състояние на електрически автобус чрез определяне на ефективността от рекуперативното спиране и възможността за по-пълното оползотворяване на тази възстановена енергия.

Основна цел на доклада е да се оцени ефективността и състоянието на системата за рекуперативно спиране чрез анализиране на ключови параметри по време на спиране.

Създаването на методика, която да оценява възможността на електрическото транспортно средство да възстановява енергията при спиране и да я връща обратно за съхранение в акумулаторната батерия дава тази възможност за коректна оценка и съпоставка между различните марки и модели електрически автобуси.

Ключови думи: Електрически автобус, рекуперативно спиране, енергийна ефективност

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В контекста на нарастващите екологични предизвикателства и стремежа към устойчиво развитие, електрическите автобуси се утвърждават като ключов елемент в модернизиранието на градския транспорт. Европейските регулации, насочени към постигане на 50% електрификация на автобусния парк до 2030 г. и пълна електрификация до 2060 г., подчертават необходимостта от целенасочен и информиран избор на транспортни средства с нулеви емисии.

Изборът на електрически автобус не е еднозначен процес – той изисква съпоставка на множество технически, икономически и експлоатационни показатели. Сред тях, ефективността на рекуперативното спиране се откроява като важен критерий, който пряко влияе върху енергийната ефективност и оперативните разходи на превозвачите. Рекулерацията позволява възстановяване на част от енергията, генерирана при спиране, и нейното повторно използване, което удължава пробега и намалява нуждата от често зареждане.

Настоящият доклад разглежда по аналитичен път ефективността на рекуперативното спиране при електрически автобуси. Чрез анализиране на ключови параметри се цели

обективна оценка на възможностите на различни модели да възстановяват и съхраняват енергия. Това създава основа за по-прецизен и аргументиран избор на електрически автобуси, съобразен с реалните нужди на транспортните оператори и изискванията за устойчиво развитие.

2. ОБЗОР НА ПРОБЛЕМА

Рекуперативното спиране е процес, при който кинетичната енергия на влака при понижаване на скоростта или спиране се преобразува в електрическа и се връща обратно за повторно използване и захранване на собствените нужди или съхранение в батерии. За да се оцени ефективността на рекуперативното спиране е необходима да се създаде методика, която да оценяват специално подбрани параметри и критерии. До момента съществуват различни тестове за оценка на състоянието и ефективността на електрически транспортни средства [1, 2], включително и Регламент (ЕС) 2022/1379 [3], но ролята на системата за рекуперативно спиране трябва да се оценяват въз основа на данни от шофиране в полеви условия, а не на нормативно установени цикли на шофиране.

Необходимо е предварително да отбележим, кои са факторите влияещи върху ефективността на рекуперацията, при автономните електрически транспортни средства (ЕТС). Освен познатите фактори свързани с инфраструктурата като състояние на инфраструктурата (неравности по пътя), профил на маршрута (наклони, брой завой), честота на спиране (брой автобусни спирки и др.), синхронизирани светофарни уредби и др. в доклада ще се обърне внимание на техническите показатели на подвижния състав.

Ефективността на рекуперативното спиране показва, колко от възстановената кинетична енергия, реално може да се съхранява в батерията. Зависи от различни фактори като скорост на ЕТС, тип на батерията, температурните условия, състояние на батерията (SoC), вида и мощността на тяговия двигател и загубите в електрониката. По-важните ключови фактори са обобщени в Таблица 1.

Таблица 1. Фактори влияещи върху ефективността на рекуперативното спиране

Фактор	Описание	Влияние върху ефективността
Скорост на превозното средство	<ul style="list-style-type: none"> - При висока скорост кинетичната енергия е по-голяма, което дава възможност да бъде възстановена повече енергия; - Регенеративното спиране е по-ефективно. При ниска скорост енергията е по-малка и поради това възстановяването е ограничено; - Според начина на управление на превозното средство системата може по-често да преминава към фрикционно спиране. 	<p>По-висока ефективност при висока скорост; Ограничена регенерация при ниска скорост.</p>
Състояние на батерията - State of Charge (SoC)	<ul style="list-style-type: none"> - Пълна батерия не може да приеме допълнителна енергия. Частично разрежена батерия позволява по-добро усвояване. Студената батерия намалява рекуперацията. 	<p>Висока ефективност при оптимален SoC; Намалена ефективност при пълна или студена батерия.</p>
Характеристики на електродвигателя	<p>По-мощен мотор възстановява повече енергия. Ограничения: температура, ток, механични загуби. Баланс между ефективност и безопасност.</p>	<p>По-голяма мощност дава по-голяма рекуперация; Ограничения при екстремни условия или претоварване.</p>

Като допълнителни факторите, които оказват влияние върху ефективността на рекуперацията могат да се посочат натовареността електрическия автобус и климатичните условия.

Съпоставянето на ефективността на рекуперативното спиране, между две и повече ЕТС, означава да се определи какъв процент от кинетичната енергия на превозните средства се

възстановява и съхранява обратно в батерията. Това може да се направи аналитично или чрез диагностични системи.

Необходимо е да бъде установен разхода на енергия за километър, енергията възстановена при рекуперация и общата ефективност на задвижването.

Максималната мощност на рекуперация е най-голямото количество електрическа енергия, което системата може да възстанови от кинетичната енергия на превозното средство при спиране или забавяне и зависи от типа и мощността на електродвигателя. По-мощните двигатели позволяват по-интензивна рекуперация. Също така зависи от капацитет и състояние на батерията. Батерията трябва да може да поеме бързо голямо количество енергия. При екстремни температури ефективността намалява и мощността на рекуперация може да бъде ограничена, което налага проследяване и контролиране на температура на батерията.

Не на последно място влияние върху размера на върнатата електрическа енергия оказва и настройката на системата за управление на енергията СУЕ. Софтуерът може да ограничи рекуперацията заради безопасност или оптимизация.

Типични стойности за максимален размер на рекупериранията енергия по отношение на електрическите автобуси могат да бъдат в порядъка 150÷250 kW.

3. МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА РЕКУПЕРАТИВНОТО СПИРАНЕ

Изследването на ефективността на рекуперативното спиране може да се осъществи по аналитичен и експериментален път. Поради ограниченият обем на доклада в него ще се разгледа само аналитичното изследване на проблема.

Определянето на ефективността на рекуперативното спиране става чрез коефициента K_{pk} представено във формула 1.

$$(1) \quad K_{pk} = \frac{E_{pk}}{E_{ny}} 100, \%$$

където K_{pk} е коефициент на ефективността на рекуперативното спиране;

E_{pk} - стойност на върнатата електроенергия, Wh;

E_{ny} - стойност на използваната енергия за ускорение.

Големината на енергията от рекуперация е различна във всеки един кратък момент от време, поради което нейната стойност можем да определим с помощта на интеграл по формула (2):

$$(2) \quad E_{pk} = \int P_{pk}(t) dt$$

където $P_{pk}(t)$ е моментната мощност за определен кратък интервал от време, W

Механичната мощност P можем да изчислим чрез формула (3)

$$(3) \quad P = M\omega$$

където P е механичната мощност, W;

M - въртящият момент, Nm;

ω - ъгловата скорост, rad/s).

Преобразуването на ъглова скорост в обороти се извършва с формула (4)

$$(4) \quad n = \frac{60\omega}{2\pi}$$

където n е обороти в минута;

ω - ъгловата скорост, rad/s.

Когато говорим за „възстановена енергия“ в проценти, се има предвид процент от еталонната максимална енергия, която може да бъде възстановена при дадено спиране, а реално възстановената енергия при рекуперативно спиране се получава от данни на бордовата система или BMS след спиране, измерена във ватчаса (Wh).

Използваната енергия за ускорение $E_{иу}$ се изчислява на база кинетичната енергия E_k на превозното средство при началната скорост на спиращия процес:

$$(5) \quad E_{иу} = E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

където m е масата на превозното средство, kg;
 v - начална скорост на спиращия процес, m/s.

Тази енергия е максималната теоретична стойност, която може да бъде рекуперирана при идеални условия, без загуби, със 100 % ефективност на системата.

При зададени тегло и скорост на ЕТС по формула (5) лесно можем да пресметнем стойността на кинетичната енергия в kJ или W.

Тази енергия трябва да бъде съхранен в акумулаторната батерия на превозното средство много бързо, което може да бъде в порядък на няколко секунди. Следователно, мощността ще бъде:

$$(6) \quad P = \frac{E_k}{t}, \text{ kW}$$

Токът I през двигателя в генераторен режим, изразен като амperi ще бъде изчислен от произведението на мощността P и напрежението V на батерията съгласно формула (7)

$$(7) \quad I = \frac{P}{V}, \text{ A}$$

Промяната в заряда на батерията - State of Charge ΔSoC можем да получим чрез израза (8)

$$(8) \quad \Delta\text{SoC} = \frac{I \cdot t}{C} \cdot 100, \%$$

където I е токът на зареждане, A;
 t — времето на зареждане (в часове);
 C — капацитетът на батерията (в ампер-часове, Ah);
 ΔSoC — промяната в заряда на батерията, %.

ΔSoC нараства с квадрата на скоростта, тъй като кинетичната енергия е пропорционална на квадрата на скоростта. При по-високи скорости се възстановява значително повече енергия, което води до по-голямо увеличение на ΔSoC .

Чрез определяне на нетната енергия чрез формула (9) можем да определим влиянието на възстановената енергия върху енергийната ефективност и от там върху експлоатационните разходи.

$$(9) \quad E_H = E_{дв} + E_{сн} - E_{рк}$$

където E_H е нетен разход на енергия, kWh;
 $E_{дв}$ - разход на енергия за движение, kWh;
 $E_{сн}$ - разход на енергия за собствени нужди, kWh;
 $E_{рк}$ - енергия от рекуперация, kWh.

4. ТЕХНИЧЕСКИ ОГРАНИЧЕНИЯ

Трябва да се има предвид, че съществуват технически ограничения, влияещи на ефективността на рекуперацията. Такива са ограниченията по ток, по мощност и по ефективност при високи обороти и нисък въртящ момент.

Максимална мощност на рекуперация се лимитира от електродвигателя и инвертора, които са ограничени по мощност, която могат да поемат обратно. При висока скорост и голяма маса, кинетичната енергия е много по-голяма, отколкото системата може да рекуперира.

Батерията също има лимит на тока на зареждане. При висока скорост и маса, възстановената енергия може да надвиши този лимит и така част от енергията се губи като топлина или се разсейва чрез включването на механичните спирачки.

При по-голямо натоварване, температурата на батерията и електродвигателя се повишава. И това налага системата за контрол да ограничава рекуперацията, което води до по-ниска ефективност.

При висока кинетична енергия, механичните спирачки се включват по-рано, защото рекуперацията не е достатъчна за безопасно спиране. Това намалява дела на енергията, която може да бъде възстановена.

5. РЕЗУЛТАТИ ОТ АНАЛИТИЧНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Резултатите от аналитичното изследване са обобщени и представени в Таблица 2, като са направени съответните допускания по отношение на масата на състава, напрежението на акумулаторните батерии и ефективността на рекуперацията.

Таблицата 2. Изчисления за електрически автобус с маса 15 000 kg, напрежение 600 V и ефективност на рекуперация 60%.

Скорост (km/h)	Батерия (kWh)	Кинетична енергия (kWh)	Възстановена енергия (kWh)	Δ SoC (%)	Нетна енергия (kWh)
30	200	0,145	0,087	0,043	0,094
30	250	0,145	0,087	0,035	0,094
30	300	0,145	0,087	0,029	0,094
50	200	0,402	0,241	0,121	0,261
50	250	0,402	0,241	0,096	0,261
50	300	0,402	0,241	0,080	0,261
70	200	0,788	0,473	0,236	0,512
70	250	0,788	0,473	0,189	0,512
70	300	0,788	0,473	0,158	0,512

С увеличаване на скоростта се възстановява повече енергия, тъй като кинетичната енергия нараства с квадрата на скоростта.

Δ SoC е по-високо при по-малък капацитет на батерията, тъй като същото количество енергия представлява по-голям процент от по-малка батерия.

При 50 km/h и батерия 200 kWh се възстановява около 0,12% от заряда само с едно спиране, което е значимо при чести спирания в градски условия.

6. ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

При скорост 30 km/h се възстановява по-малко енергия, но ефективността е по-висока, докато при скорост 70 km/h се възстановява повече енергия, но ефективността намалява поради загуби и ограничения в системата. Това показва, че ефективността не е линейна и зависи от множество фактори: ток, мощност, температура, състояние на батерията и др.

При по-голям тонаж, рекуперативната система достига своите физически и електрически лимити, което води до намалена ефективност. Това налага създаване на пропорции между маса на състава, капацитет на батерията и мощност на електрическият двигател. Необходимо е да се състави най-доброто съотношение между тези важни параметри, чрез решаване на оптимизационна задача.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Божков С., И. Миленов, Р. Петров, В. Киселев, Методика за оценка на техническото състояние на хибридни и електрически автомобили по критерия ускорение, сп. „Механика, транспорт, комуникации“, том 22, брой 3/2, стр. IX-33÷ IX-39, ISSN 1312-3823, статия № 2496, 2024 г.

[2] Хармонизирана в световен мащаб процедура за изпитване на леки превозни средства (WLTP), <https://www.vehicle-certification-agency.gov.uk/fuel-consumption-co2/the-worldwide-harmonised-light-vehicle-test-procedure/>

[3] Регламент (ЕС) 2022/1379 на Комисията от 5 юли 2022 година за изменение на Регламент (ЕС) 2017/2400 по отношение на определянето на емисиите на CO₂ и разхода на гориво от средни и тежкотоварни камиони и тежкотоварни автобуси и за въвеждане на електрически превозни средства и други нови технологии (текст от значение за ЕИП), <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/1379/oj>

ANALYTICAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF RECUPERATIVE BRAKING FOR ELECTRIC BUSES

Илко Тарпов, Тодор Лалев
itarpov@vtu.bg, tlalev@vtu.bg

*Todor Kableshkov University of Transport,
Sofia, Geo Milev Str. 158,
BULGARIA*

Abstract: Nowadays, zero-emission vehicles are increasingly used in the transport systems of modern urban areas. The imposed European requirement for their implementation on fifty percent of all buses by the end of 2030 and their one hundred percent use by 2060 favors them.

The selection of an electric bus is a complex technical and political process, which is accompanied by diverse requirements and supported by proven methodologies for comparing various and often contradictory criteria such as price, reliability, durability and efficiency throughout the entire life cycle. There is a wide variety of brands, models, dimensions, traction battery capacity, range on a single charge, traction motor power, etc. indicators on the market, which can be seen from the catalogs of their manufacturers and compared.

One of the important criteria that carriers are interested in is energy efficiency and costs during the operation period. For this reason, there is a need to assess the technical condition of an electric bus by determining the efficiency of regenerative braking and the possibility of more complete utilization of this recovered energy.

The main objective of the report is to assess the efficiency and condition of the regenerative braking system by analyzing key parameters during braking.

The creation of a methodology to assess the ability of an electric vehicle to recover energy during braking and return it for storage in the battery provides this opportunity for a correct assessment and comparison between different brands and models of electric buses.

Key words: Electric bus, regenerative braking, energy efficiency