Механика Транспорт Комуникации

ISSN 1312-3823 (print)
ISSN 2367-6620 (online)
том 23, брой 3, 2025 г.
Научно списание **http://www.mtc-aj.com** **статия № 2754**

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ПРОМЕНЛИВОТОКОВИ ЗАРЯДНИ СТАНЦИИ ЗА ЕЛЕКТРОБУСИ СЪС СУПЕРКОНДЕНЗАТОРИ НА ЕНЕРГЕТИЧНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ЗАХРАНВАЩАТА МРЕЖА

Петър Бодуров, Любомир Секулов
bodurov.ptid@abv.bg, l_sekulov@vtu.bg

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

Резюме: *Настоящият доклад анализира резултатите от направени реални измервания на енергетичните показатели за определен период от време на захранването на зарядна станция за електробуси, задвижвани със супер кондензатор. Захранването на зарядната станция за електробус е трифазно ниско напрежение. Зарядната станция преобразува в постоянен ток и напрежение променливотоковото захранване, като осигурява необходимата мощност за бърз заряд на суперкондензатора в електробуса. Измерванията представени в доклада се отнасят основно към времето на заряд на електробуса и отчитат моментните стойности на тока и напрежението, cosφ, THDI и THDU откъм захранващата страна на зарядната станция. Измерванията включват заряда на различни електробуси от марка HIGER KLQ6125GEV3.*

Целта е да се направи анализ на измерените стойности на тока и напрежението по отношение влиянието на променливотоковите зарядни станции върху показателите за качество на електрическа енергия и по-конкретно, влиянието им по отношение на фактора на мощността cosφ на захранващата мрежа.

Изследваната зарядна станция се намира на територията на тролейбусно депо “Искър” гр. София и е една от множеството обслужващи електробусите в София. Тя се експлоатира от “Столичен електротранспорт” ЕАД от 2020 година.

Направен е сравнителен анализ на cosφ, чрез който се определя наличието на реактивната енергия на захранващата мрежа и промяната на стойностите му по време на заряд на електробуса.

Ключови думи: *електрическа енергия, електробуси, зарядни станции за електробуси, обществен транспорт, енергетични показатели, електрически транспорт, електроснабдяване, Столичен електротранспорт.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Република България е сред първите европейски държави, които интегрират електробуси от модела Higer KLQ6125GEV3 в системата на обществения транспорт.

Съществена роля в този процес има компанията *„Chariot Motors“*, която представлява българския партньор в китайско-българския консорциум с Higer Bus Company. Консорциумът печели редица обществени поръчки, обявени от Столична община, за доставка на бързозареждащи се електробуси и съответните зарядни станции както за град София, така и за град Габрово.

Дейността на *„Chariot Motors“* не се ограничава единствено до доставката на превозните средства. Компанията осигурява обучение на обслужващия персонал и гарантира пълноценна сервизна поддръжка. Като пионер в прилагането на суперкондензаторна технология при електробуси в Европа, тя реализира първия пилотен проект в София още през 2014 г. Проектът

включва тестова експлоатация на електробус със суперкондензатори по линия № 11, чиито резултати се оказват положителни и създават предпоставки за по-нататъшни инвестиции в електрическия транспорт.

С участието си в тези инициативи *„Chariot Motors“* допринася значително за модернизацията и екологизацията на градския транспорт в София чрез внедряване на иновативни технологии и устойчиви транспортни решения.

2. ЕКСПЛОАТАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕКТРОБУСИ HIGER KLQ6125GEV3.

Електробусите със суперкондензатори какъвто е моделът Higer KLQ6125GEV3 са по-ефективни от тези с литиево-йонни батерии при градски условия поради специфичните особености на техните захранващи системи. Суперкондензаторите позволяват многократно по-бързо зареждане и разреждане, което ги прави изключително подходящи за кратки и чести цикли на зареждане, характерни за градския транспорт. Те имат значително по-дълъг експлоатационен живот с милиони цикли без съществено влошаване на капацитета, докато литиево-йонните батерии се износват след няколко хиляди цикъла. Освен това суперкондензаторите показват по-висока енергийна ефективност при рекуперация, което води до икономия на електроенергия и намаляване на оперативните разходи. Макар да имат по-ниска енергийна плътност, за градски линии с чести спирки и кратки маршрути те са по-оптималното решение спрямо батериите[1, 3].

Фиг. 1. Първият електробус Higer KLQ6125GEV3 за гр. София

След проведените тестове на електробуса Higer KLQ6125GEV3 в гр. София през 2014–2015 г., Столична община предприема стъпки за внедряване на електрически автобуси в градския транспорт. Този процес включва обявяване на обществена поръчка и доставка на първите електробуси от този модел Higer KLQ6125GEV3 в гр. София. На базата на положителните резултати от тестовете, през м. май 2018 г. „Столичен електротранспорт“ ЕАД обявява първата такава обществена поръчка за доставка на 15 електробуса и 6 зарядни станции. Процедурата се провежда по правилата на Европейската банка за възстановяване и развитие (ЕБВР), която осигурява финансирането чрез заем. Търгът е спечелен от българо-китайския консорциум „Хайгър-Аоуей“ (Higer-Aowei), който предлага електробуси с суперкондензатори, позволяващи бързо зареждане и изминаване на около 20 км с едно зареждане.

Първият електробус от поръчката за електробуси със суперкондензатори е доставен в тролейбусно депо „Искър“ на 17 октомври 2019 г. и получава инвентарен номер 5001 с регистрационен номер СВ 7953 РВ. През м. декември 2019 г. пристигат още, между 5 и 10 електробуса, а на 2 януари 2020 г. са доставени останалите бройки. Електробусите започват да обслужват линии № 11, № 84, № 184 и № 123, като всяка линия разполага с по 5 зарядни станции с мощност от 500 kW.

Електробусите са боядисани в жълто и синьо – цветовете на „Столичен електротранспорт“ ЕАД, и са предназначени за обслужване на градски линии с висока натовареност.

Този процес демонстрира ангажимента на Столична община към устойчив транспорт и намаляване на вредните емисии в града. Внедряването на електробусите, модел Higer KLQ6125GEV3 представлява важна стъпка към модернизацията на градския транспорт в София.

Към момента в гр. София по обществени поръчки са доставени общо 49 електробуса, модел: Higer KLQ6125GEV3. Тези доставки са осъществени в няколко етапа, както следва:

- Брой: 15 броя
- Доставени: Между октомври 2019 г. и януари 2020 г.
- Инвентарни номера: 5001 до 5015

Втора доставка (2021 г.)

•Брой: 30 броя
•Доставени: През октомври 2021 г.
•Инвентарни номера: 5031 до 5060
Допълнителна доставка (2023 г.)
•Брой: 4 броя
•Доставени: През април 2023 г.
•Инвентарни номера: 5061 до 5064
•Особености: Тези електробуси са доставени с направени икономии от предишен проект и са пуснати в експлоатация по линия № 73.

В РБългария от същия модел електробуси освен в град София са доставени и в град Габрово. През ноември 2020 г. *„Chariot Motors“* е доставила три електробуса със суперкондензатори в гр. Габрово.

В таблица 1 са показани техническите параметри на електробус Higer KLQ6125GEV3.

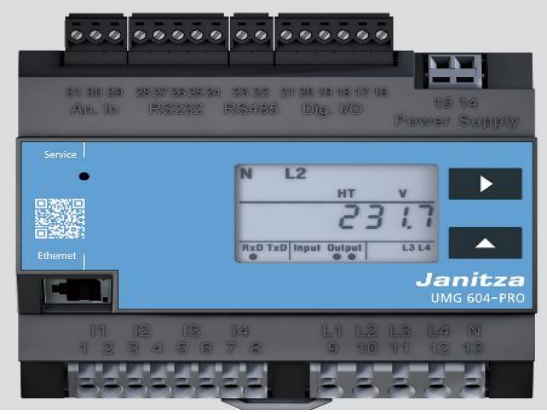
Таблица 1. Технически параметри на електробус Higer KLQ6125GEV3

Наименование на параметъра	**Стойност на параметъра**		**Наименование на параметъра**	**Стойност на параметъра**
Ном. Капацитет, F	780		Ном. Напрежение, DC	650 V
Ном. работно напрежение, V	400÷585		Ном. мощност	67 kW
Макс. напрежение, V	610		Ном. момент	160 Nm
Макс. капацитет, kJ	92000		Макс. момент	530 Nm @ 300 A
Ефективна енергия в диапазона на изменение на раб. напрежение, kJ	70000 (20kWh)		Ном. ток	124 A
Ном. заряден ток, A	250		Максимална скорост	10,000 rpm
Максимален заряден ток, A	450 (20S)		Тегло	90 kg
Ном. разряден ток, A	≤250		Размери (LxWxH)	425 x 245 x 245 mm
Макс. разряден ток, A	450 (20S)		Работна температура	-30 ºC to 70 ºC
Обем, m^3	1.3		Степен на защита	IP 65 / 9K
Маса, kg	≤1000		Диапазон на работната температура, ºC	-25 ÷ +70
(L x W x H), mm	1370x1000x930		Температура на съхранение, ºC	-10 ÷ +35
Работни цикли, times	≥30000			

Таблица 2. Технически параметри на суперкондензатора на електробуси Higer KLQ6125GEV3

Параметър	**Стойност**
Модел на суперкондензатора	Aowei MUCK585V9200Q (20 kWh)
Работни напрежения	400–585 V;
Капацитет	20 kWh
Токове на заряд максимални	Макс. (импулсен <20 s): 800 A; Стандартен: 400 A
Ток на разряд максимални	Макс. (импулсен <20 s): 800 A; Стандартен: ≤400 A
Маса, kg	≈1000 kg
Габарити, mm	1370 × 1000 × 930 mm
Цикли заряд/разряд	≥500 000 (на клетъчно ниво при 2.8–3.8 V)
Работна температура(°C)	−25…+55 °C

ИЗПОЛЗВАНА АПАРАТУРА ПРИ ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗМЕРВАНИЯТА



Фиг. 4.
Мрежови анализатор UMG 604 PRO

Фиг. 5 .Присъединяване на анализатора към зарядна станция №33

За нуждите на измерванията е използван мрежови анализатор UMG 604 PRO, който е показан на фиг. 4. Мощностният анализатор Това е високопрецизен уред за мониторинг и анализ на електроенергийни параметри в трифазни мрежи ниско и средно напрежение. Той измерва напрежения, токове, активна, реактивна и пълна мощност, енергия, както и показатели за качеството на електроенергията – cosφ, хармоници, THDU и THDI. Устройството разполага с широк набор от комуникационни интерфейси (Ethernet, Modbus, Profibus), което позволява интеграция в системи за енергиен мениджмънт. UMG 604 PRO е подходящ за целите на доклада и е присъединен към ЗС(зарядна станция) на страна ниско напрежение 3x380V AC показан на фиг. 5.

За измерване на токовете на трите фази се използва индиректен метод, чрез три токови трансформатори СР 88, 1000/5, КЛАС 0,5 а напреженията са мерени директно. Захранването на анализатора се осъществява с разделителен мрежов трансформатор 1:1 с цел да се осигури безопасност. Данните от анализатора се прехвалят през LAN на преносим PC и се следят в реално време посредством приложен софтуер “GridVis” съвместим с операционната система на PC[2,4].

3. ПРОВЕДЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗМЕРВАНИЯ

Измерванията са направени на 17 юни 2025 г. на територията на тролейбусно депо “Искър” на ЗС №33 от номенклатурата на “Столичен електротранспорт” ЕАД. Температурата на околната среда и метеорологичните условия не допускат влияние на резултатите от измерванията. Измерени са токовете, напреженията, активната и реактивна мощност за три електробуса модел Higer KLQ6125GEV3 с инв. №№ 5003, 5034 и 5036. Зарядната станция е захранена от трансформатора за собствени нужди в ТИС намиращ се на територията на депото.

Поради големия обем от стойности резултатите са показани графично в таблица 3.

На първия ред от таблицата са моментните ефективни токове и напрежения на зарядната станция за трите фази.

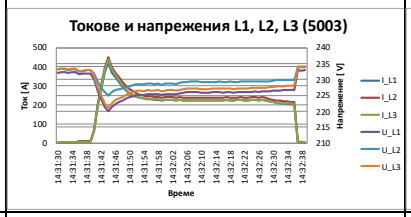
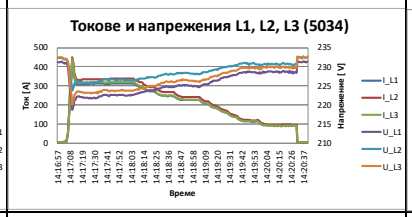
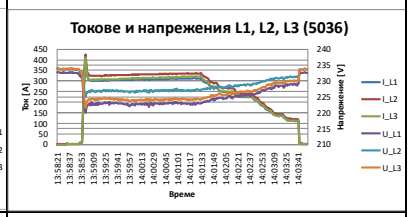
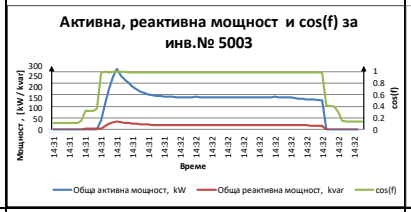
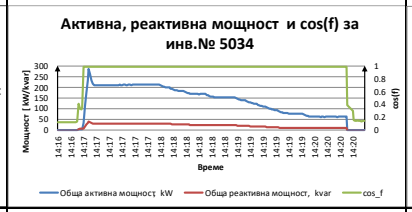
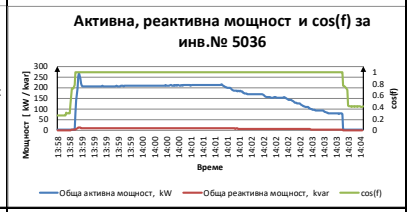
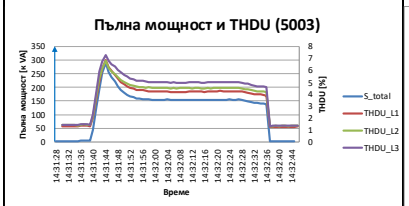
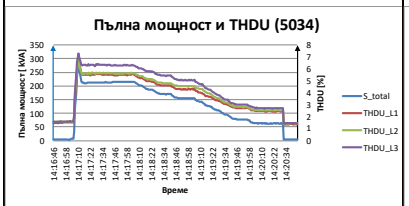
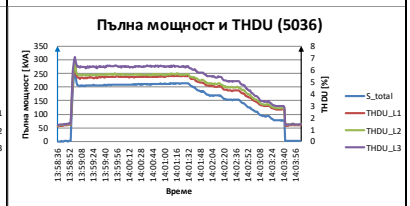
На втория ред от таблицата са измерените активни и реактивни мощности и cos(f).

На третия ред е пълната мощност към THDU за трите фази.

На четвъртия ред е реактивната енергия за съответния времеви интервал.

На петия ред е активната енергия за съответния времеви интервал.

Таблица 3. Резултати от измервания на зарядната станция

	Инв. № 5003	Инв. № 5034	Инв. № 5036
1			
2			
3			
4	Q= 357.11 varh	Q= 1166.92 varh	Q= 1986.92 varh
5	W= 2561.25 Wh	W= 8453.41 Wh	W=14193.56 Wh

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И АНАЛИЗ

Извършените измервания на зарядна станция №33 в депо „Искър“ показват, че процесът на зареждане на електробусите оказва съществено влияние върху параметрите на електроенергията в мрежата. Отчетените стойности на активната и реактивната енергия за трите автобуса (5003, 5034 и 5036) се различават значително, което се дължи на началната степен на зареденост на суперкондензаторите и различното времетраене на зарядните цикли. Най-ниска консумация е наблюдавана при автобус 5003 (около 2.56 kWh активна и 0.36 kvarh реактивна енергия), докато автобус 5036 достига най-високи стойности (14.19 kWh активна и 1.99 kvarh реактивна енергия).

С нарастване на реактивната енергия се влошава факторът на мощността, като при автобуси с по-голям заряди респективно повече реактивна енергия Q (5034 и 5036) cosφ е по-нисък, което води до по-ниска енергийна ефективност. Наред с това процесът на зареждане, който е силно импулсен по характер, поражда хармонични изкривявания в напреженията (THDU). В българските условия се прилага стандартът EN 50160, който позволява THDU да достига до максимална стойност 8%. Може да се приложи и времево обоснованият режим на IEEE 519 (до

12% за кратковременни пикове и 8% за обикновен 10-минутен интервал), какъвто е този при заряда на суперкондензаторите на електробусите.

Въпреки че средните стойности на THDU остават под допустимата граница от 8%, в определени моменти се наблюдава превишаване над 4% THDU, което се отчита основно при високи натоварвания с пълна мощност над 80–100 kVA. Това показва, че при по-интензивни зарядни цикли влиянието върху качеството на напрежението е по-изразено и изисква внимание.

В резултат на измерванията може да се определи, че зарядните станции с големи мощности оказват чувствително въздействие върху качеството на електроенергията чрез влошаване на фактора на мощността и внасяне на хармонични изкривявания. За ограничаване на тези ефекти е препоръчително внедряване на системи за компенсация на реактивната мощност, използване на активни или пасивни филтри за хармоници. Особено внимание трябва да се обърне, когато един трансформатор захранва повече от една зарядна станция.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Мицева Д. Специфични особености, параметри и характеристика на литиевойонни акумулаторни батерии, Шеста научна конференция с международно участие „Комуникации, електрообзавеждане и информатика в транспорта - КЕИТ – 2022“, гр. Банско, 30.08. - 02.09.2022 г., (сп. „Механика, транспорт, комуникации“, том 20, бр. 3/2, 2022, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online) https://mtc-aj.com/library/2260.pdf

[2] Томчева М. “Изследване на енергийната ефективност на електроенергийни обекти” – Монография ISBN 978-619-193-375-4

[3] Търпов И. М. “Изследване на рекуперативната енергия в електрическия транспорт на електроенергийни обекти” - Монография издадена “Дизайн лайн” ISBN 978-619-93115-0-9

[4] Лалев. “Възможности за повишаване на енергетичните параметри на тягова електрозахранваща система на наземен градски електрически транспорт” - Монография ISBN 978-619-04-0389-0

RESEARCH THE INFLUENCE OF AC CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC BUSES WITH SUPERCAPACITORS ON THE POWER GRID ENERGY INDICATORS

Petar Bodurov, Lyubomir Sekulov
bodurov.ptid@abv.bg, l_sekulov@vtu.bg

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

Abstract: *This report analyzes the results of real measurements of the energy indicators for a certain period of time of the power supply of a charging station for electric buses powered by a super capacitor. The power supply of the electric bus charging station is three-phase low voltage. The charging station converts the AC power supply into DC current and voltage, providing the necessary power for fast charging of the super capacitor in the electric bus. The measurements presented in the report mainly relate to the charging time of the electric bus and take into account the instantaneous values of current and voltage, cosφ, THDI and THDU from the power supply side of the charging station. The measurements include the charging of various electric buses of the HIGER KLQ6125GEV3 brand.*

The aim is to analyze the measured values of current and voltage in terms of the influence of AC charging stations on the quality indicators of electrical energy and, more specifically, their influence on the power factor cosφ of the power supply network.

The studied charging station is located on the territory of the Iskar trolleybus depot in Sofia and is one of the many serving electric buses in Sofia. It has been operated by “Stolich Elektrotransport” EAD since 2020.

A comparative analysis of cosφ was performed, through which the presence of reactive energy of the power supply network and the change in its values during charging of the electric bus are determined.

Key words: *electric energy, electric buses, charging stations for electric buses, public transport, energy indicators, electric transport, electricity supply, Sofia Electric Transport.*