International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21November 2026
GABROVO

МЕТОДИ ЗА ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ВНЕДРЯВАНЕТО НАЕНЕРГИЙНИ СЪХРАНИТЕЛИ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИ СИСТЕМИ НА ГРАДСКИЯ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТ

Валентин Гюров[1], Юлиян Йорданов[2]

[1]Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”
[2]Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”
**кореспондиращ автор: valentin.giurov@tu-varna.bg*

METHODS FOR TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN URBAN ELECTRIC TRANSPORT POWER SUPPLY SYSTEMS

Valentin Gyurov[1], Yuliyan Yordanov[2]

[1]Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment
[2]Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment
**Corresponding author: valentin.giurov@tu-varna.bg*

Abstract
Integrating energy storage systems into the power supply networks of urban electric transport is a promising approach to optimizing energy costs within a liberalized electricity market characterized by significant daily price fluctuations. This study evaluates the applicability of established methods—specifically "annualized costs" and "net present value" (NPV)—to assess the feasibility of implementing energy storage systems, taking into account the specific characteristics of the facility under study. This necessitates an appropriate adaptation of these methods to the current conditions of the power system. The study focuses on the trolleybus transport system in the city of Vratsa, including its associated infrastructure and rolling stock.

Keywords:electric transport; storage systems; net present value; annualized costs

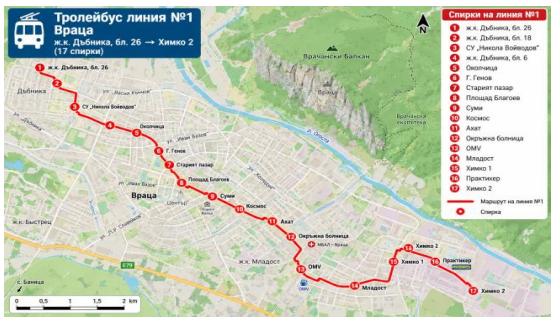
ВЪВЕДЕНИЕ

Динамиката на електропотреблението в електрическия транспорт съпоставена с изразената диференциация на цените на електроенергията, изисква съществена промяна в подхода за прилагане и оценка на различни схемни решения. Интегрирането на различни по вид и характеристики енергийни съхранители, отговарящи на нуждите и спецификата на съответно транспортно дружество е надежден инструмент за постигане на по-добри технико-икономически целеви показатели. Добра практика за успешен енергиен мениджмънт е прилагането на стандартизирани методи за определяне на икономическата ефективност, съответно целесъобразност при конфигурирането на нови и ретрофит на съществуващи системи. В проучването са заложени класическите критерии за оценка [1], [2], [3] “приведени годишни разходи” (ПГР) и “текуща нетна стойност” (NPV), които осигуряват потенциална възможност за верифициране и валидиране на данни придобити при аналогични изследвания, съответно вземането на оптимално техническо решение.

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

ИЗЛОЖЕНИЕ

Обект на анализи оценка са експериментални резултати придобити чрез измерване в токоизправителни станции ТИС №1 и ТИС №2 в общинско дружество „Тролейбусен транспорт” гр. Враца, България. В момента съществуват две тролейбусни линии, като общата им дължина на контактната мрежа е около 15 км. Двата маршрута имат голяма степен на припокриване и почти еднакъв брой спирки. Трасето и разположението им е визуализирано на Фигура 1 и Фигура 2 *(използван е AI за генериране на изображенията)*.



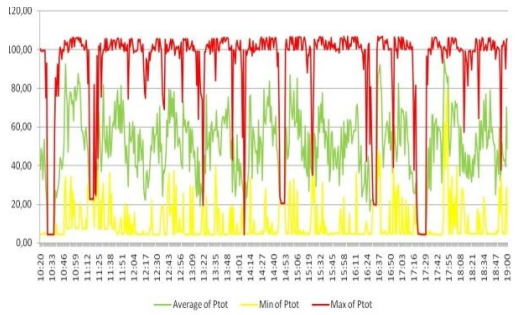
Фиг. 1 *Тролейбусна линия №1*



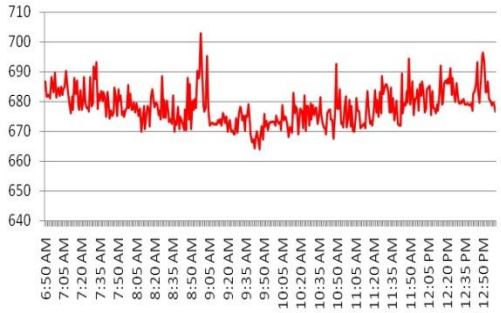
Фиг. 2 *Тролейбусна линия №2*

При въвеждане в експлоатация на нови тролейбуси със силово електронно управление и рекуперативни функции са отчетени много резки изменения на напрежението на DC страна. Екип от ТУ-Варна, успешно реализира прецизни измервания на страна променливо напрежение (AC) и на страна постоянно напрежение (DC), с резолюция – 1 сек. интервал, за ефективни стойности на величините. Измерванията са съгласно нормите на стандарти: EN50160:2023; EN50502:2015 и EN50163:2006. Използваната за целта апаратура включва два преносими мрежови анализатори: Metrel Power Analyzer MI2885 (IEEE 1459-2010) присъединен на страна AC и Uni-T Power Analyzer UT230A Single Phase, съответно присъединен на DC.

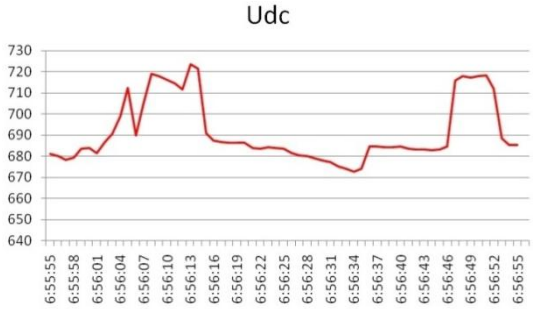
Регистрирани са резки изменения на U_{DC} в диапазона 642.91V до 770.4V при средна стойност 685 V. Повишението на U_{DC} се дължи основно на обективна невъзможност рекуперираната енергия да се върне в мрежата, поради вида на двата ТИС, реализирани на база схема Ларионов. Провалите на U_{DC} са резултат на ускорителни режими на тролейбуси. Графика на движение по двете линии (през 30 мин), не предполага висока степен на усвояване на рекуперираната енергия един от друг. Представената извадка от 7 дни експериментални измервания на ТИС 1 и ТИС 2 за U_{DC} и P_T е моментна снимка на динамичното изменениеза много кратки периоди от време.



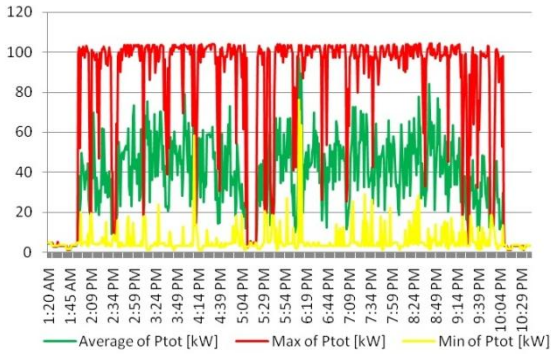
Фиг. 3 *Изменение на P_Tза ТИС1*



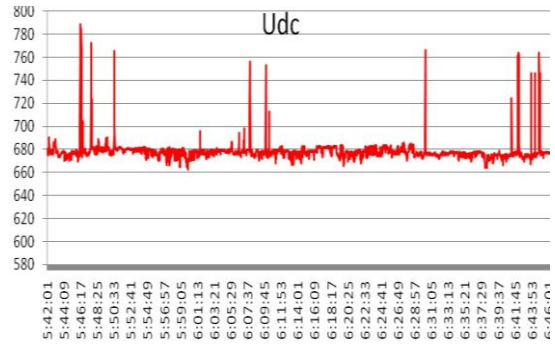
Фиг. 4 *Изменение U_{DC}за ТИС1 осреднено по минути*



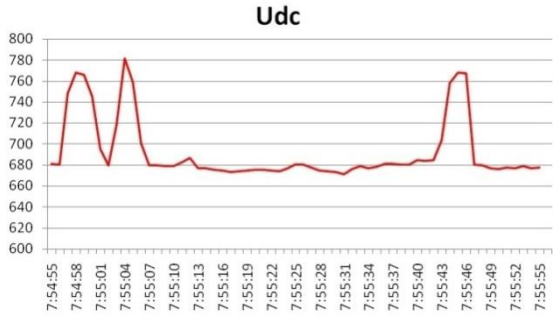
Фиг.5 *Изменение на U_{DC} за ТИС1 осреднено по секунди за 1 мин.*



Фиг.6 *Изменение на P_T за ТИС2*



Фиг.7 *Изменение на U_{DC} за ТИС2*



Фиг. 8 *Изменение на U_{DC} за ТИС2 осреднено по секунди за 1 мин.*

Ежедневното наблюдение на цените на електроенергията от официални източници в сегмента "В рамките на деня" (ibex.bg) в последната 1 година установи значителни разлики при 24 часов обзор през 15 и през 60 мин. В периода от януари до март, минималната ценова разлика е над 50 €/MWh, а максимална над 200 €/MWh. В най-ефективната част от годината за фотоволтаични централи (ФЕЦ) март-септември, максималната разлика за деня системно надвишава 250€/MWh. Подобни маржове изискват техническо решение за намаляване на разходите. Използването на енергийни съхранители за компенсиране на тези колебания и по-добра икономическа ефективност не е ново решение. Прилагането им, избора на тип и мощност за-висят от конкретния обект. Акумулиращи елементи, които се зареждат в ниско ценовия интервал и отдават в пиковите часове с висока цена с цел собствено потребление значително ще намалят разходите за електроенергия в електро-транспортните дружества.

Анализът на голям обем от данни на АС и DC страна в разглеждания обект, осреднени седмично по дни, часове и минути разкрива динамична картина на електропотреблението на ТИС 1 и ТИС 2. Снетите стойности с резолюция 1 s в продължение на една седмица дават основание да се разгледа приложимостта на различни технологии за дългосрочно и краткосрочно съхранение, и тяхната самостоятелна или съвместна работа. Компенсиране пиковете на използваната мощност, на моментното нарастване и провали в напрежението в рамките на една до няколко минути и/или секунди, значително ще подобри режима на работа на системата. Подобни стъпки в голяма степен ще игнорират недостатъка свързан с невъзможност за връщане на енегия на АС страна и съответните капиталови разходи за модернизиране на изправителите в тяговите подстанции. Дългосрочните енергийни съхранители в зависимост от мощността им, съответно техния капацитет, предлагат значителна автономност на тролейбусния транспорт при прекъсване на захранването от различен характер и при дефекти в системите за акумулиране на енергия в самите превозни средства.

Съвременните системи използвани за решаването на подобни задачи са изградени на основата електрохимични, електрически, механични и комбинирани технологии. В изследването е реализирано ограничаване на анализа до четири типа и техните комбинации[4], [5], [6];

- литий-желязо-фосфатни(LiFePO4);
- суперкондензатори;

- проточни батерии (VRFB);
- маховици (flywheels).

Предвид характеристиките им LPF и проточните батерии (VRFB) могат да бъдат сполучливо използвани в схеми за по-дългосрочно надеждно съхранение, а суперкондезатори и маховици, за бързо изменящ се режим на заряд/разряд.

За икономическа оценка на дадено техническото решение се използват най-често [1], [2], [3];

Приведни годишни разходи (ПГР)

$$ПГР = I.\alpha_n + C_{ЕКСПЛ} \quad (1)$$

$$\alpha_n = \frac{\mathrm{r}.(\mathrm{r}+1)^n}{(\mathrm{r}+1)^n - 1} \quad (2)$$

където: r - дисконтов процент; n - икономически живот на съоръжението; I - първоначална инвестиция; α_n - коефицент на анюитетно привеждане; $C_{ЕКСПЛ}$ –средногодишни експлоатационни разходи.

Нетна стойност (NPV) на проекта съгласно European commission Better regulation' toolbox – December 2025 edition [2]

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (3)$$

където: I_0 - първоначална инвестиция; CFt –нетен паричен поток през дадена година t; r- дисконтов процент,

$$CF_t = R_t - C_t \quad (4)$$

където: R_t – приходи от използването на рекуперирана енергия, намаляване на пикова мощност и балансиране, C_t – експлоатационни разходи, средства за ремонт, подмяна надеградирали батерии и свързано оборудване, електроенергия за зареждане, текущи разходи.

Приведените годишни разходи (ПГР) представляват по-скоро сравнение на разходите при различни технически решения, докато NPV е оценка за инвестицията и съответно за вземане на инвестиционно решение.

От получените данни за P_T, могат да се направят приблизителни изчисления за LPF и VRFB с мощност 50 kW, която да покрива основната консумация в пикови часове, спрямо съответната цена на електроенергията.

$$E = P.t \quad (5)$$

За определяне NPV и ПГР на LPF са приложени следните допускания:

- Цена на капитала, съответстваща на средната годишна инфлация 5.1 %;
- Време за експлоатация на система 15 години;
- Време за разреждане 7 часа;
- КПД = 0,88;
- Отдадена енергия 350kWh;
- Енергия за зареждане 397kWh;
- Цена на зареждане 50 €/MWh, при разреждане 150 €/MWh;
- Приход за зареждане 1 цикъл 52 €, разход 19,9 €;
- Брутна разлика за един цикъл 32,6 €;
- Брутна разлика за 365 цикъла 11900 €.
- Средно годишно увеличение на цената на електрическата енергия 4%

Сценарии:

- А на най-ниска цена за напълно окомплектован система - 200 €/kWh;
- В за цена - 250 €/kWh;
- С за цена 300€/kWh.

Сравнителния анализ за NPV и ПГР относно натрупаната сума от разлика в цените за 1 година, може да бъде основа за обосновано техническо решение.

Таблица1

сценарий	A	B	C
Инвестиция в €	70000	87500	105000
NPV за 15 години в €	87942	70442	52942
ПГР в €/год.	9578	11973	14367

Анализ на NPV и ПГР за ванадиева проточна батерия(VRFB)

- Цена на капитала, съответстваща на средната годишна инфлация 5.1 %;
- Период на експлоатация на системата 15 години;

- Време за разреждане 7 часа;
- КПД = 0,75;
- Отдадена енергия 350 kWh;
- Енергия за зареждане 466 kWh;
- Цена на зареждане 50 €/MWh, при разреждане 150 €/MWh;
- Приход за зареждане на 1 цикъл 52,5 €, разход 23,33 €;
- Брутна разлика CF за един цикъл 29,17 €;
- Брутна разлика CFгод за 365 цикъла 10664 €;
- Варианти цени инвестиция: A= 350€/kWh; B = 400€/kWh; C = 450 €/kWh.

Таблица2

вариант	*A*	*B*	*C*
Инвестиция в €	*122500*	*140000*	*157500*
NPV за 15 години в €	*19037*	*1537*	*-15962*
ПГР в €/год.	*16676*	*19 156*	*21551*

Заложени са цени за напълно [3] функционални системи с от различни официални източници и анализи. Прието е еднакво намаляване (10%) за двете разглеждани технологии предвид вида на конкретния обект, както и наличната инфраструктура и оборудване в ТИС. В оценката не са използвани цени на конкретно изделие или само на основния компонент (LPF), защото само разходите за пълна система реално отразяват нужния финансов реусрс. В много от източниците се използва CAPEX, който по същество оценява първоначалните капиталови [2] разходи за оценка на предложението. Отчетените стойности за NPV и ПГР (таблици №1 и №2) при заложените параметри предлагат видимо предимство на системи LPF пред VRFB за реализация по икономически критерии. Съществуват още няколко неотчетени или скрити, нообективни фактора, които чувствително могат да променят представеното тук сравнение. Процентите заложени за експлоатационни разходи предвид различната степен на деградация на оборудването при двете технологии могат съществено да се различават. Проточните батерии имат значително по-голям ресурс (в брой цикли), докато стареенето води до намаляване на разпологаемата част капацитет на LPF, тоест t и n за VRFB може да бъде заложен за период от 20-25 години. За всеки конкретен случай с различна тежест за избора на техническо решение, влияят характеристиките им на заряд и разряд, време за съхранение без загуби на енергия. Съществени са разходите за пожаро, взриво, екологична и техническа безопасност. Съответно цената се изменя от увеличени разходи за допълнително неотчетено в анализа проектиране, изграждане на климатични, вентилационни, управляващи, преобразуващи модули и системи за безопасност. Тези критерии предопределят известно предимство за обоснован избор на определена технология. В редица случаи VFRB може да се окаже оптимално решение.

Приложението на суперкондензатори и механични съхранители [4], [6], [7] в ТИС в зависимост от тип и мощност, напълно или частично ще елиминира проблема с краткотрайните пикове и провали при ускоряване на превозното средство, рекуперация, рязко изменение на товара. Необходимата енергия за зареждане и разреждане се изчислява от Формула 5, E = 500 kJ = 0,139 kWh (условно прието P = 50kW, t = 10 c), при КПД = 95%, E = 0.146 kWh. В резултат получаваме за капацитета [5] на суперкондензатор (от 6), C = 6,54 F (с условие U_{max}=750 V, U_{min}=640V).

$$E = \frac{1}{2} C.(U_{\max}^2 - U_{\min}^2) \qquad (6)$$

Целесъобразно е в схемата да се използва междинен DC-DC конвертор с достатъчен запас (10-15%) по мощност компенсиращ ефекта на стареене и на температурни ограничения. Цената на напълно окомплектована система към момента е в диапазона от 25000 € до 30000 €.

Отчитайки относително малкия брой кратки пикове и сравнително ниското

ниво на необходимата енергия на заряд/разряд използването на механичен съхранител е финансово необоснована. В изследването не е разгледана ПГР и NPV за суперкондензаторна система и за flywheel, защото в конкретния случай не могат да носят приход от маржа на цените предвид краткотрайното им съхранение. Частично решение на проблема е поддържането в техническа изправност, подобряванена системите за съхранение в тролейбусите, въвеждане на байпас ТИС с маломощен инвертор за да може да се приеме частично или изцяло рекуперираната енергия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитично са проследени ползите от прилагането на NPV, ПГР за оценка на инвестиционни и технически решения при иновации, и системен ретрофит на системи в електротранспортни дружества в частност на тролейбусен транспорт в гр. Враца. Могат да се обсъдят основно технологични решения на база LPF и VRFB предвид динамичния енергиен пазар, единствено с цел икономия на средства на общинското дружество, а не реализиране на финансови печалби от ценови разлики при сделки в рамките на деня. Важен фактор в оценката може да бъде привличането на грантов капитал за инвестиция по европейски и национални програми. В този случай дисконтовия процент в NPV и ПГР представляващ цената на капитала, ще е с друга стойност и ползите за дружеството ще бъдат значителни на много по-ранен етап.

БЛАГОДАРНОСТИ*: Настоящата работа е подкрепена от Фонд „Научни изследвания“ (България), Оперативна програма „Фундаментални научни изследвания“, сесия 2025 г., по договор № 06-Н97/1 от 05.12.2025 г. на тема „Изследване на потенциалната комплексна ефективност на интелигентни системи за електрозахранване с динамична автономност в електрическия транспорт“.*

Екипът изказва благодарност на ръководството и инженерно - техническия състав на „Тролейбусен транспорт - Враца” ЕООД за съдействието.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Balliet W., Balducci P., Durvasulu V., Mosier T.,Determining the profitability of energy storage over its life cycle using levelized cost of storage, Energy Economics 142(2025),https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.108174

[2]European commission Better regulation’ toolbox – December 2025 edition.

[3] Giannakopoulos.G,P.Vovos,D.Papadaskalopoulos,M.Karasavvidis, Economic assessment of standalone battery energy storage factoring operational and market participation aspects: A case study in Greece.Journal of Energy Storage, 2026

[4] Mikolaj B., S. Mirchevski, Reducing of energy consumption in public transport–results of experimentalexploitation of super capacitorenergy bank in Gdynia trolleybus system, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, Sept 2014.

[5] Tomislav. P, I. Župan, V. Šunde, Z. BanHIL Simulation of a Tram Regenerative BrakingSystem, Electronics 2021, 10, 137

[6] Piotr. H, Zielinski D. Rymarz J., NiewczasA. Debicka E.,The Use of a Supercapacitor as a Supplementary Storage ofElectricity in a Trolleybus, Energies 2026, 19, 2469

[7] Zarbil. M, A. Vahedi , H. Moghaddam, P. Khlyupin, Design and Sizing of Electric Bus Flash Charger Based on a Flywheel Energy Storage System, A Case Study, Energies 2022,DOI:10.3390/en15218032.