



МОДЕРНИЗАЦИЯ НА ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИТЕ СТАНЦИИ В ОБЩИНСКИЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ НА РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ – НЕИЗБЕЖНА НЕОБХОДИМОСТ ИЛИ КОМПРОМИС

Тодор Лалев
tlalev@vtu.bg

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

Ключови думи: Токоизправителна станция, Система за управление.

Резюме: В Република България към момента класическият електрически транспорт – токоизправителна станция (ТИС), контактна мрежа (КМ) и електрическо превозно средство, като тролейбус (за град София и трамвай), се експлоатира в 10 града. През последните 15 години всички инвестиции изглеждат са насочени основно към закупуването на нови автономни транспортни средства, като електробуси на батерии и зарядни станции. С изключение на няколко града като София, Враца и Плевен, инвестициите в модернизацията на класическата инфраструктура, включително контактната мрежа и ТИС, са значително ограничени. Това се дължи на факта, че политическият ефект от закупуването на нови транспортни средства е по-голям в сравнение с инвестицията в ТИС – съоръжение, което остава „невидимо“ за гражданите.

Настоящият доклад разглежда състоянието на токоизправителните станции (ТИС) в общинските градове на България, в които се експлоатира електрически транспорт, с изключение на София. В повечето от тези градове ТИС са въведени в експлоатация през 80-те години на миналия век и са технически и морално остарели. В настоящия анализ се разглеждат електроенергийните параметри на б-пулсните токоизправители, които се използват в тези станции. Докладът включва резултати от симулации, проведени чрез MATLAB Simulink, както и експериментални измервания по време на експлоатация на такива изправители.

Основната цел е да се направи оценка на състоянието на съществуващите ТИС, да се идентифицират основните им недостатъци и да се предложат възможности за модернизация.

1. ВЪВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМА

Електрическият транспорт има ключова роля в намаляването на въглеродните емисии, праховите частици и подобряването на качеството на живот в градовете. Освен че осигурява екологично чиста алтернатива на традиционния обществен транспорт, той допринася за намаляването на шумовото замърсяване и повишава енергийната ефективност на транспортната система. В България класическият градски електрически

транспорт се експлоатира в 10 общински града, където тролейбусният транспорт е основен компонент на мрежата за обществено придвижване. [5]

Основната енергийна инфраструктура, която запазва този вид транспорт, се състои от ТИС, които преобразуват електроенергията, необходима за запазване на КМ. Почти всички от тези съоръжения в тези 10 града са въведени в експлоатация през 80-те години на XX век и са проектирани да отговарят на техническите изисквания за своето време (изключение прави Столицата). Въпреки, че продължават да функционират, технологиите, които използват, вече не съответстват на съвременните стандарти за енергийна ефективност.

Докладът не разглежда състоянието на всяка община поотделно, тъй като техническите параметри на използваните съоръжения са сходни. Повечето от тези ТИС са доставени от два основни производителя – ŠKD Praha и VEB Kombinat Berlin. В тях са внедрени 6-пулсни силициеви токоизправители, които за времето си са били технологично напредничави и икономически ефективни. Въпреки това, в съвременните условия тези устройства не могат да отговорят на растящите изисквания за по-висока ефективност и намалени енергийни загуби.

Настоящия доклад се фокусира върху анализа на електроенергийните параметри на 6-пулсните токоизправители използвани в тези 10 града, като включва симулационни модели и експериментални измервания. Основната цел е да се предложат възможности за модернизация и подобрене на ефективността на токоизправителните станции, с което да се оптимизира работата на електрическия транспорт в българските градове.

2. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО. ОПИСАНИЕ НА 6-ПУЛСНИТЕ ТОКОИЗПРАВИТЕЛИ ИЗПОЛЗВАНИ В ТИС.

В настоящото изследване фокусът е върху тяговите агрегати (ТА), използвани в остарелите ТИС, експлоатирани в големите градове на Република България. Те са базирани на 6-пулсни диодни токоизправители с мостова схема „Ларионов“. Обектът на изследването е ТА, произведен от фирмата VEB Kombinat Berlin, който е масово инсталиран и използван в ТИС в страната. Този ТА е в експлоатация от 1970 г. до днес.

Изборът на този ТА за изследване е обусловен от факта, че той все още се използва в експлоатация. [1,2] Това подчертава значимостта на анализа на тези системи, тъй като те са критични за надеждността и ефективността на електротранспортната мрежа в големите градове. Въпреки че тези устройства демонстрират висока дълговечност, тяхното остаряване създава предизвикателства по отношение на поддръжката и енергийната ефективност. В същото време те предоставят ценна възможност за анализ и разработване на стратегии за модернизация.

Техническите данни и характеристики на тяговите трансформатори (ТТ) и токоизправителите (ТИ), използвани в разглеждания ТА, са представени в таблици 1 и 2. Тези данни са от съществено значение за настройката на симулационния модел и за правилното и точно изследване на текущото състояние на ТИС. Освен това, те играят ключова роля в планирането на бъдещи подобрения, които могат да включват модернизация на съществуващото оборудване и внедряване на нови технологии. Сред тях са по-ефективни ТА, усъвършенствани системи за дигитализация и решения за повишаване на енергийната ефективност, които могат да оптимизират работата на системата и да намалят разходите за поддръжка.

Таблица 1. Технически параметри ТТ производител VEB Kombinat Berlin

Технически параметри на ТТ- VEB Kombinat Berlin			
№	Параметър	Страна Средно напрежение	Страна Ниско напрежение
1	Номинално напрежение, kV	10	0,528
2	Номинален ток, А (принудително/естествено охлаждане)	104/72,2	1970/1370
3	Номинална мощност, kVA	1800/1250	
4	Вид на охлаждане	S/F	
5	Съпротивление на намотките, Ω при температура $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$	Няма данни	
6	Индуктивност на намотките, mH	Няма данни	
6	Група на свързване	Yy0	
7	Напрежение на к.с., %	7,6	
8	Материал на намотките	Cu	Cu

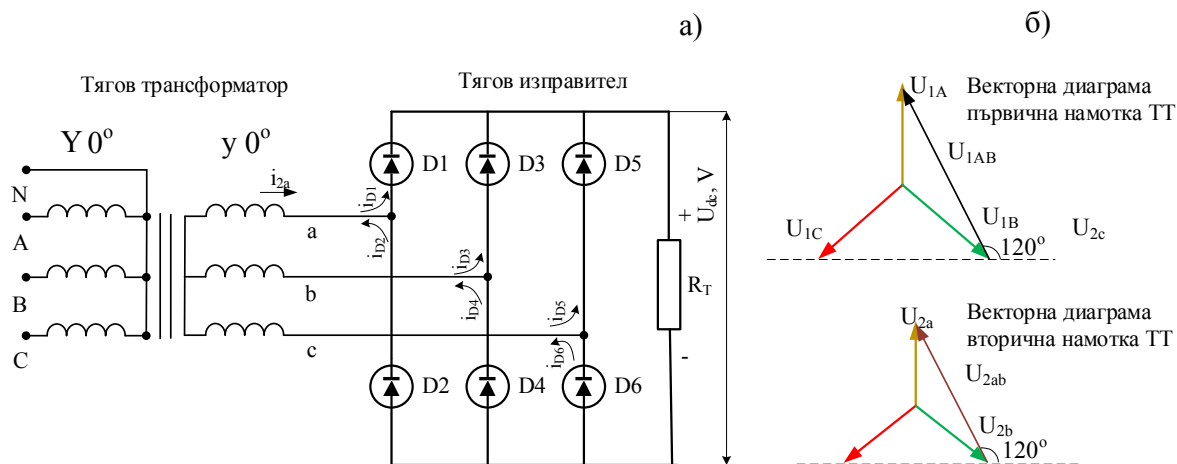
За целите на доклада е избран ТТ, произведен от VEB Kombinat Berlin. Важно е да се отбележи, че в различните градове съществуват ТИС с трансформатори от различни производители и с различни технически характеристики. Поради тези различия, за всяко конкретно изследване е необходимо провеждането на допълнителни анализи и измервания, за да се осигури пълноценна оценка на състоянието и ефективността на използваното оборудване. За целите на доклада, за ТТ са използвани данните в таблица 2.

Таблица 2. Технически параметри ТИ производител VEB Kombinat Berlin

Технически параметри ТИ производител VEB Kombinat Berlin			
№	Параметър	Стойност	Величина
1	Номинално изправено напрежение, U_N	660	V
2	Номинално захранващо напрежение, U_{vH}	530	V
3	Номинален ток във веригата на изправеното напрежение, I_{dH}	1500	A
4	Клас на претоварване	(до 120%)	E
5	Охлаждане метод	-	F
6	Честота, f	50	Hz
7	Претоварване до 120%	1	h

На Фиг. 1.а е представена еквивалентната заместваща схема на 6-пулсен ТА, състоящ се от трифазен тягов трансформатор (ТТ) и токоизправител ТИ. Трансформаторът е избран с група на свързване Y/y0, която съответства на данните, представени в Таблица 1. В тази схема първичната и вторичната намотки на трансформатора са свързани в звезда без фазово изместване.

На фиг. 1.б е илюстрирана векторната диаграма на фазовите напрежения.



Фиг. 1 а. Еквивалентна заместваща схема на модел на 6-пулсен ТА

Фиг. 1 б. Векторна диаграма на напреженията на ТТ група на свързване Y/y0

На базата на данните от Таблица 1 и Таблица 2, както и на еквивалентната заместваща схема, представена на Фиг. 1, са извършени симулации в MATLAB Simulink среда. Тези симулации позволяват анализ на работните параметри на системата и дават възможност за оптимизиране на нейната ефективност. [3,4]

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ СИМУЛАЦИИ С MATLAB SIMULINK. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ.

В доклада са представени резултатите от симулационен модел на ТА, разработен в средата MATLAB/Simulink. Целта на този модел е да се анализират основните електроенергийни показатели на 6-пулсен ТА, при различни режими на натоварване и взаимодействието му с електроенергийната система (ЕЕС).

Чрез проведените симулации са получени резултати, които осигуряват детайлен поглед върху работата на системата, влиянието на основните ѝ компоненти и възможностите за оптимизация. Анализът на получените данни позволява да се идентифицират ключови фактори, влияещи върху ефективността и стабилността на ТЕС.

В доклада са представени графични резултати от две симулации, които са най-подходящи за разглеждания случай:

Симулация при натоварване – при тази симулация токът на първичната намотка на тяговия трансформатор (ТТ) достига моментна стойност $I_{max}=20$ А. Тази стойност бе експериментално установена, графики от измервания са представени в следващата точка.

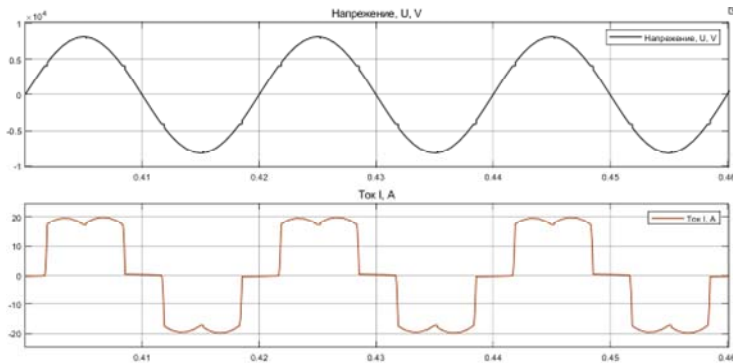
Този режим на работа на тяговия агрегат (ТА) е характерен за тролейбусния транспорт в разглежданите градове, когато тяговата мрежа (ТМ) е частично натоварена поради разределения график на движение на тролейбусите.

В този режим токът на ТИ е пулсиращ и достига до $I_d=400$ А, което съответства на 26% от номиналното натоварване на ТИ. Такава експлоатационна ситуация е типична за по-голямата част от денонощието и оказва съществено влияние върху ефективността и стабилността на електротранспортната система.

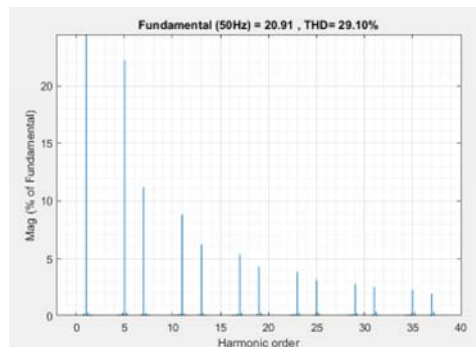
В графичен вид на фиг. 2 а. са представени резултатите от симулацията на кривите на тока и напрежението на една от фазите на ТА. Хармоничният анализ на системата е показан на фиг. 2 б.

При тази симулация коефициентът на мощността е $\cos\phi = 0,95$, което показва добра енергийна ефективност. Анализът на резултатите показва, че захранващото

напрежение $u_{зак}$ на ТА остава синусоидално, докато токът има характерна форма за 6-пулсните токоизправители. Това води до значителни хармонични изкривявания в системата.



Фиг. 2 а. Графични резултати моментните стойности тока и напрежението на 6-пулсен ТА



Фиг. 2 б. Хармоничен спектър на 6-пулсен ТА

Хармоничният анализ показва, че основната честота (50 Hz) има амплитуда 20,91, а общото хармонично изкривяване **THDi** достига 29,10%, което е сравнително висока стойност. Най-силно изразени са 5-ти, 7-ми, 11-ти и 13-ти хармоници, като 5-тият хармоник достига 22%, 7-мият - 14%, 11-мият - 9%, а 13-мият - 7% спрямо основната честота. Това води до повишени загуби в трансформаторите и електрическата мрежа, както и до негативно влияние върху други консуматори, захранвани от същата система.

Симулация на празен ход (графични резултати не са представяни) – при този режим токът на първичната страна на ТА достига 0,5 А. Поради липсата на значително натоварване, няма отчетени хармонични изкривявания, но токът на ТА е с ясно изразен индуктивен характер, което води до $\cos\varphi = 0,75$.

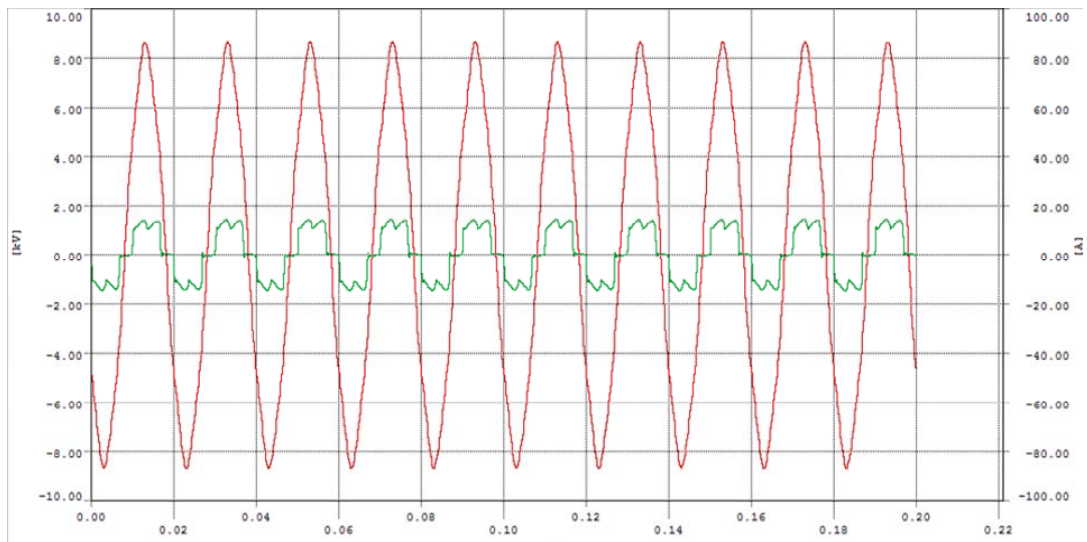
Този режим е характерен за часовете, в които липсва трафик и съответно електротранспортът не е активен. Ниската стойност на $\cos\varphi$ води до допълнителни финансови загуби, тъй като ниският коефициент на мощност често е обект на санкции от електроразпределителните дружества. Освен финансовите последици, намалената енергийна ефективност увеличава загубите на електроенергия, което допринася за по-голям екологичен отпечатък вследствие на неефективното използване на енергийните ресурси.

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗМЕРВАНИЯ

За валидиране на симулационните резултати бяха извършени измервания върху реален 6-пулсен токоизправител в експлоатация. Измерените параметри включват напрежение, ток, хармонични изкривявания и коефициент на мощност. Данните потвърждават резултатите от симулациите.

На фиг. 3 е представена експериментално измерената форма на тока i и напрежението u при около 25% натоварване на ТА. От направения анализ се установява, че коефициентът на мощността $\cos\varphi \approx 0,94$, а тоталното хармонично изкривяване **THDi** на тока достига 28,5%. Това е в много добра корелация със симулационния резултат, при който THD е 29,10%.

Основните хармонични съставки, измерени в реални условия, са както следва:
5-тият достига 21.8%, 7-тият – 13.7%, 11-тият – 8.9%, а 13-тият – 6.8%.



Фиг. 3. Графични резултати от експериментални измервания моментните стойности тока и напрежението на 6-пулсен ТА

Получените експериментални резултати потвърждават валидността на симулационния модел и неговата приложимост за анализ на работата на 6-пулсния токоизправител в реални експлоатационни условия.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРЕПОРЪКИ

Изследванията в този доклад показват, че 6-пулсните тягови агрегати (ТА) използвани в ТИС, които някога са били оптимално решение, днес не покриват съвременните технологични изисквания. Въпреки дългогодишната им експлоатация и доказана надеждност, те се характеризират с високи енергийни загуби, значително хармонично изкривяване и ниска ефективност, която не отговаря на съвременните екологични стандарти. Това ги прави неподходящи за модерната електрическа транспортна инфраструктура и налага необходимостта от цялостна подмяна на съоръженията в ТИС.

За съжаление, наличната публично достъпна информация за общинските транспортни дружества в големите градове (с изключение на София) показва, че инвестициите са предимно насочени към автономни транспортни средства, докато при токоизправителните станции (ТИС) се извършват само частични подмени на оборудване, без цялостна модернизация.

Следва да се отбележи, че разходите за целия жизнен цикъл на автономните превозни средства остават неизвестни и трудно прогнозируеми, като например експлоатационният живот на батериите и разходите за тяхната подмяна. Въпреки тези неизвестни, автономните превозни средства продължават да се въвеждат в експлоатация, докато електротранспортната инфраструктура остава морално и физически остаряла. Това компрометира енергийната ефективност и създава рискове за дългосрочната устойчивост на градския транспорт, тъй като наличната инфраструктура не може да гарантира стабилна и оптимизирана работа на мрежата.

Автономните транспортни средства са подходящо решение за по-малки общини, които нямат изградена електротранспортна инфраструктура и тепърва трябва да решат въпроса с устойчивата транспортна система. В тези случаи автономните превозни средства могат да бъдат икономически изгодна и гъвкава алтернатива, тъй като не изискват сложна енергийна и контактна мрежа.

За разлика от това, в големите градове с вече развита електротранспортна инфраструктура, липсата на инвестиции в модернизацията ѝ води до постепенно

влошаване на мрежата, повишени енергийни загуби и намалена ефективност. Това поставя под въпрос дългосрочната устойчивост на електротранспорта и застрашава изпълнението на съвременните екологични и енергийни цели. В този контекст България, като част от Европейския съюз, рискува да изостане от стандартите за устойчива градска мобилност, което не само не подобрява транспортните условия, но и влошава качеството на живот на гражданите.

Препоръки за модернизация на ТИС

За да се осигури устойчив и ефективен електрически транспорт, е необходимо цялостно модернизиране на ТИС, което най-малко да включва:

- Замяна на 6-пулсните токоизправители с 12-пулсни, които намаляват хармоничните изкривявания и подобряват енергийната ефективност;
- Подмяна на съществуващите трансформатори с нови модели с по-ниски загуби;
- Интеграция на съвременни системи за енергиен мониторинг и управление, които ще позволят по-ефективно разпределение на натоварванията и намаляване на експлоатационните разходи;
- Въвеждане на дигитални системи за управление и автоматизация, които ще подобрят контрола и ефективността на работа на ТИС.

Само чрез балансиран подход, при който инвестициите в подвижния състав вървят паралелно с модернизацията на инфраструктурата, може да се постигне устойчив и ефективен електрически транспорт, който не само покрива съвременните енергийни и екологични изисквания, но и подобрява качеството на живот на гражданите.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Додов Е., Г. Павлов. Изследване и анализ на енергетичните параметри на тягови подстанции за подземен електрически транспорт, 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/2274.pdf>
- [2] Томчева М. Изследване и анализ на параметрите на видовете токоизправителни схеми, експлоатирани в токоизправителни станции., Четвърта научна конференция с международно участие „Комуникации, електрообзавеждане и информатика в транспорта – КЕИТ 2018“, 28.09. - 30.09.2018 г., гр. Банско, 2018 г. (сп. Механика, Транспорт, Комуникации. том 16, брой 3/2, 2018 г., ISSN 1312-3823, стр. X105-X110), <https://mtc-aj.com/library/1730.pdf>
- [3] Kazem, H. A., Zahawi, B., & Giaouris, D. (2009). Modeling of six-pulse rectifier operating under unbalanced supply conditions. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(1), 71–79. ISSN 1819-6608. Asian Research Publishing Network (ARPJN). Retrieved from www.arpnjournals.com.
- [4] Hernadi, A., Taufik, & Anwari, M. (Year). Modeling and Simulation of 6-Pulse and 12-Pulse Rectifiers under Balanced and Unbalanced Conditions with Impacts to Input Current Harmonics. In *Proceedings of the Second Asia International Conference on Modelling & Simulation*. San Luis Obispo, CA: Cal Poly State University.
- [5] [Тролейбусен транспорт в България – Уикипедия](#) – страницата е активна към 23.12.2024 г.

MODERNIZATION OF TRACTION RECTIFIER STATIONS IN MUNICIPAL ELECTRIC TRANSPORT IN THE REPUBLIC OF BULGARIA – INEVITABLE NECESSITY OR COMPROMISE

Todor Lalev
tlalev@vtu.bg

*University of transport "Todor Kableshkov",
1574 Sofia, Geo Milev St. No. 158,
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

Key words: *Traction Rectifier Station, Electric transport, Traction rectifier, Efficiency.*

Abstract: *In the Republic of Bulgaria, the classical urban electric transport system- Traction rectifier stations (TRS), overhead contact networks (OCN), and electric vehicles such as trolleybuses and trams (in cities like Sofia) - operates in 10 cities. Over the past 15 years, investments appear to have focused primarily on the acquisition of new autonomous transport vehicles, such as battery-powered electric buses and charging stations. Except for a few cities like Sofia, Vratsa, and Pleven, investments in the modernization of the classical infrastructure, including the overhead contact network and rectifier stations, have been significantly limited. This is since the political impact of purchasing new vehicles is greater compared to investing in RS— an infrastructure element that remains "invisible" to the public.*

This report examines the state of TRS in the municipal towns of Bulgaria where electric transport is operated, excluding Sofia. In most of these towns, the TRS were commissioned during the 1980s and are now both technically and morally outdated. The current analysis explores the electrical parameters of six-pulse rectifiers used in these stations. The report includes results from simulations conducted using MATLAB Simulink as well as experimental measurements taken during the operation of such rectifiers.

The main objective is to assess the condition of existing TRS, identify their key shortcomings, and propose opportunities for modernization.