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 № 2749**

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА НАТОВАРВАНЕТО ВЪРХУ ЕФЕКТИВНОСТТА НА 6-ПУЛСНИ И 12-ПУЛСНИ ДИОДНИ ИЗПРАВИТЕЛИ

Тодор Лалев, Мартина Томчева, Детелина Павлова
tlalev@vtu.bg, mtomcheva@vtu.bg, didaip@vtu.bg

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

Резюме: *Настоящото изследване има за цел да се анализира как различните режими на работа влияят върху енергийната ефективност на диодни токоизправители, използвани в тягови подстанции. Проучването е извършено при реални експлоатационни условия на съществуващи токоизправителни станции, разположени на територията на град София, обслужващи наземния градски електрически транспорт (трамваен и тролейбусен).*

В рамките на изследването са разгледани два основни типа токоизправителни конфигурации – 6-пулсна и 12-пулсна. Измерванията са извършени при различни нива на натоварване, като са наблюдавани следните параметри: входни напрежение, ток, пулсации, реактивна и активни енергии, както и cosφ.

Получените резултати са подробно представени в доклада и анализирани както количествено, така и графично. Те показват, че 12-пулсните токоизправителни системи демонстрират по-висока енергийна ефективност и по-ниски пулсации на напрежението, особено при частично натоварване. От своя страна, 6-пулсните изправители се характеризират с по-големи пулсации и относително по-високи загуби при същите условия.

Изследването допринася за по-задълбочено разбиране на поведението на диодни токоизправителни станции в реална експлоатационна среда и предоставя практическа основа за оптимизация на тяговото електрозахранване в градската транспортна инфраструктура.

Ключови думи: *токоизправителна подстанция, тиристорен токоизправител, енергийна ефективност.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ И СЪЩНОСТ НА ПРОБЛЕМА

България има дългогодишен опит в електрификацията и експлоатацията на наземния градски електрически транспорт (НГЕТ), започнал още през 1901 г. с пускането в експлоатация на първия трамвай в София. До 1989 г. тролейбусният транспорт е развит и функционира в 16 български града, превръщайки се в основен елемент на устойчива и достъпна градска мобилност. Въпреки този исторически успех, значителна част от инфраструктурата и тягова електрозахранваща система (ТЕС) продължава да се експлоатира в силно амортизирано състояние, изградена по технологии от средата на XX век, а тролейбусният транспорт в 6 от градовете е закрит [2].

Ситуацията допълнително се усложнява от съвременните екологични и енергийни изисквания на Европейския съюз (ЕС). В днешния контекст ЕС налага строги екологични стандарти, които стимулират използването на нулево емисионни транспортни средства. Въведените от ЕС регулации [3,4,5] изискват при обществени поръчки за градски транспорт да се отдава приоритет на „чисти превозни средства". Това поставя пред нас необходимостта от модернизация на съществуващите ТЕС в българските градове.

В тази връзка, наред с обновяването на транспортните средства, е необходимо сериозно обновяване и на захранващата инфраструктура, за да се осигури надеждно и енергийно ефективно електрозахранване на НГЕТ. Един от основните проблеми е свързан с ефективността на използваните системи за захранване на тяговата мрежа (ТМ), и по-конкретно

токоизправителните станции (ТИС). В експлоатация в почти всички градове все още се намират 6□пулсни диодни изправители, въведени през 70□те и 80□те години на миналия век.

Настоящото изследване има за цел да анализира влиянието на натоварването върху енергийната ефективност на 6□пулсни и 12□пулсни диодни токоизправители, използвани в ТИС на НГЕТ. Резултатите ще подпомогнат процеса на вземане на решения за модернизация и ще способстват за привеждането на системата в съответствие с европейските екологични цели.

2. СЪЩИНСКА ЧАСТ

Обект на изследването са две ТИС, част от системата на „Столичен електротранспорт“ ЕАД, които са разположени в централната градска част и играят ключова роля в електрозахранването на НГЕТ на София. Изборът на тези станции е продиктуван от тяхната експлоатационна значимост и наличието на различни типове ТА, което позволява директно сравнение на получените при измерванията електро енергийни показатели.

2.1. Описание на обектите на изследване

- **Токоизправителна станция „Медицинска академия“**

ТИС „Медицинска академия“ е въведена в експлоатация през 1955 г. и заема важно място в захранването на контактната мрежа за трамваен и тролейбусен транспорт в централната част на София. Последната ѝ реконструкция е извършена през 1973 г., когато живачните преобразуватели и оборудването са заменени с полупроводникови преобразуватели, производство на VEB Kombinat – Берлин.

Първичното захранване е с напрежение 10 kV от подстанция „Витоша“ чрез два кабела тип САХЕкТ 3x1x185 мм² (ввод I и ввод II) и междинна кабелна връзка със съседната ТИС „Перловец“. Общата инсталирана мощност на станцията е Sn = 6600 kVA, с три ТА и общ номинален ток In = 9000 A. Един ТА е изграден от един тягов изправител и един тягов трансформатор ТТ.

- **Токоизправителна станция „Димитровска“**

ТИС „Димитровска“ е въведена в експлоатация през 1965 г. и е сред ТИС за захранване на контактната мрежа в централната част на града. Последната ѝ реконструкция е извършена през 2013 г., когато оборудването на VEB Kombinat – Берлин е заменено с ново от Siemens AG..

Захранването е СрН 10 kV, постъпващо чрез вакуумни прекъсвачи към шините 10 kV и се подава на силови ТА 3 бр., Общата инсталирана мощност на станцията е Sn = 6600 kVA, с три ТА и общ номинален ток In = 15660 A. Един ТА е изграден от един тягов изправител и един тягов трансформатор ТТ.

2.2. Подробни технически характеристики

Подробните технически параметри на токоизправителните агрегати ТИ и ТТ в двете станции са представени в Таблица 1 и Таблица 2. Те включват данни за производител, модел, година на производство, електрически параметри (номинално захранващо и изправено напрежение, честота, номинален ток), охлаждане, клас на защита и тегло. Тези характеристики са основа за оценка на ефективността на системите и анализа на влиянието на натоварването върху тяхната работа.

Таблица 1 – Данни за ТИ на ТИС „Медицинска академия“ и ТИС „Димитровска“

Параметър	6-пулсен ТИ	12-пулсен ТИ
Производител	VEB Kombinat Berlin	Siemens AG
Модел (Тип)	B6-530/660-1500 AS (2 блока)	Sitras® REC-D (B6U 2P 750P2-8PT-C10)
Година на производство	1972	2012
Номинално захранващо напрежение, U□	530	2 × 650 V
Номинално изправено напрежение, U_{do}	660 V AC	750 V AC
Честота, f	50 Hz	50/60 Hz
Номинален ток (I□)	2 × 1500 A (общо 3000 A)	5220 A
Тип охлаждане	Принудително	AN (въздушно, естествено)
Клас на защита	IP10	IP20 (IP00)
Тегло	2400 kg	850 kg

Таблица 2 – Данни за ТТ-ри на ТИС „Медицинска академия“ и „Димитровска“

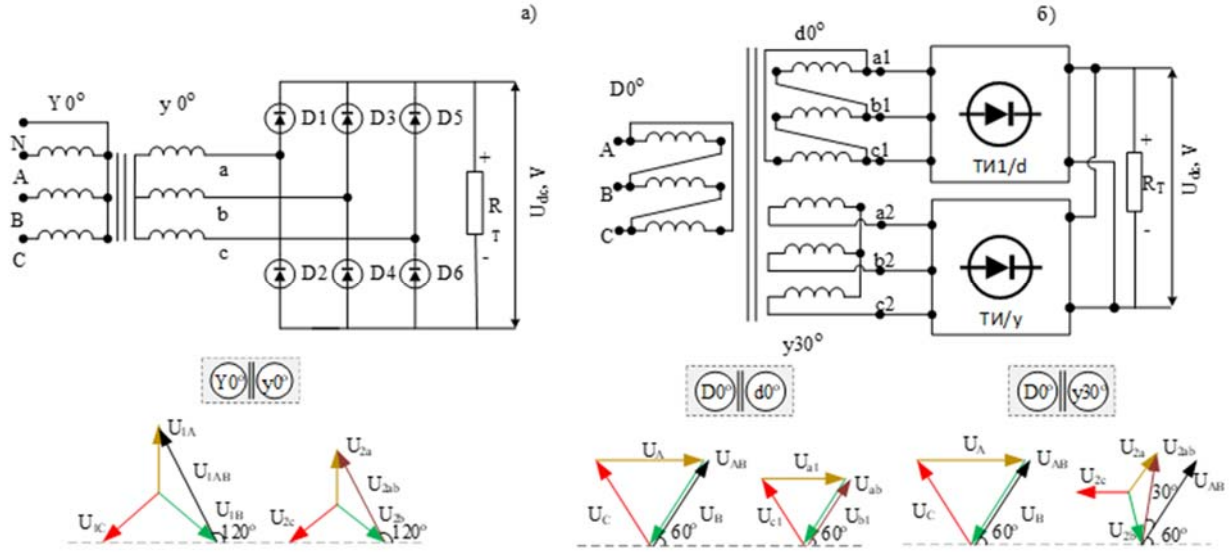
Параметър	ТИС „Медицинска академия“	ТИС „Димитровска“
Производител	VEB mbinat Berlin	RITZ
Модел (Тип)	PDUBF 2500/10	DTR102500
Година на производство	1968	2012
Номинална мощност, S□	2500 kVA	2200 kVA
Входно напрежение, U□	10 500 V	10 500 V
Изходно напрежение, U□	528 V	520 V
Честота, f	50 Hz	50 Hz
Номинален ток, I□1, I□2	104 A /1970 A	127,0 A / 2x1221,3 A
Група на свързване	Y/y0	D/y5/d0
Клас на изолация	HC	F/F
Клас на защита	–	IP00
Вид охлаждане	Система F/S (принудително)	AN (въздушно, естествено)
Импеданс	7,4 %	6,39% – 6,24%
Тегло	5,3 т	8,0 т
Клас претоварване	–	100% продължително, 150% за 2 ч., 200% за 1 мин.

2.3. Електрически схеми и векторни диаграми на изследваните ТА

На фиг. 1 са представени принципните електрически схеми на два типа токоизправителни агрегати (ТА), използвани в изследването – 6□пулсен и 12□пулсен – както и съответните векторни диаграми на напреженията:

а) 6□пулсен токоизправител, използван в ТИС „Медицинска академия“. Състои се от трансформатор с група на свързване Yy0° и стандартна трифазна мостова схема. Векторната диаграма показва фазовите връзки без фазово изместване между първичната и вторичната страна.

б) 12□пулсен токоизправител, използван в ТИС „Димитровска“. Реализиран е с трансформатор с двойна вторична намотка (Dd0° и Dy30°), осигуряваща фазово изместване от 30° между напреженията. В схемата за опростяване са показани два блока, но в действителност това са два 6□пулсни токоизправителя, свързани така, че да формират 12□пулсова система. Векторната диаграма илюстрира изместването на фазите и комбинирането на напреженията за намаляване на пулсациите [1,2,6].



Фиг. 1. Схеми на 6-пулсен и 12-пулсен токоизправител с векторни диаграми

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗМЕРВАНЕ

3.1. Цел на експерименталните изследване

Целта на експерименталното изследване е да се анализира влиянието на натоварването върху енергийната ефективност на 6□пулсни и 12□пулсни ТА, експлоатирани в ТИС-ове „Медицинска академия“ и „Димитровска“. Чрез измервания в реални експлоатационни условия се оценява въздействието на ТА върху електроенергийната система (ЕЕС) 10 kV, като основни показатели за анализа са тоталното хармонично изкривяване THD, cosφ и факторът на мощността (Power Factor PF).

3.2. Измервателна апаратура и конфигурация

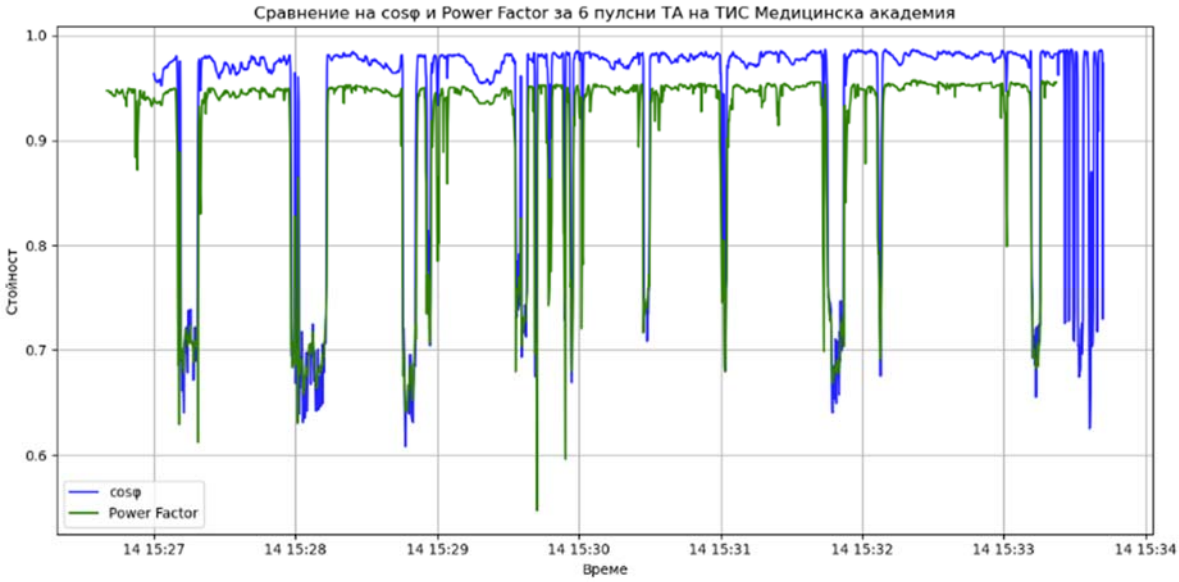
За регистриране на експерименталните данни е използван мултифункционален мрежов анализатор „Janitza“ тип UMG 604 [7]. Уредът беше свързан към първичната страна на ТИС при средно напрежение (СрН 10 kV) чрез вече съществуващите измервателни вериги (токови и напреженови трансформатори). Тази конфигурация позволява мониторинг на параметрите на входа на ТИС без прекъсване на нормалната експлоатация на системата. Използваната апаратура е оборудвана с функции за измерване на токове, напрежения, честоти, регистриране на активна и реактивна мощност, анализ на хармоници до 40-ти порядък и изчисляване на THD, както и за наблюдение на cosφ и PF. Устройството позволява запис на преходни процеси и отчет на електрическа енергия (kWh, kvarh).

Измерванията бяха проведени през месец юни 2025 г. в два различни дни и при различни експлоатационни режими. За ТИС „Медицинска академия“ измерванията са извършени на 14.06.2025 г.. За ТИС „Димитровска“ измерванията са извършени на 16.06.2025 г.

4. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА РЕЗУЛТАТИ

4.1. Анализ на измерените cos φ и PF

На фиг. 2 е представено времевото поведение на ***cos φ*** и ***PF*** за 6-пулсен ТА. Изчислената средна стойност на ***cos φ*** от измерените данни е ***0,937***, минимална отчетена стойност ***0,608*** и максимална ***0,986***. Наблюдават се редки и краткотрайни спадове на ***cos φ***, което е индикатор за консумация на реактивна енергия в режим на празен ход на ТА.



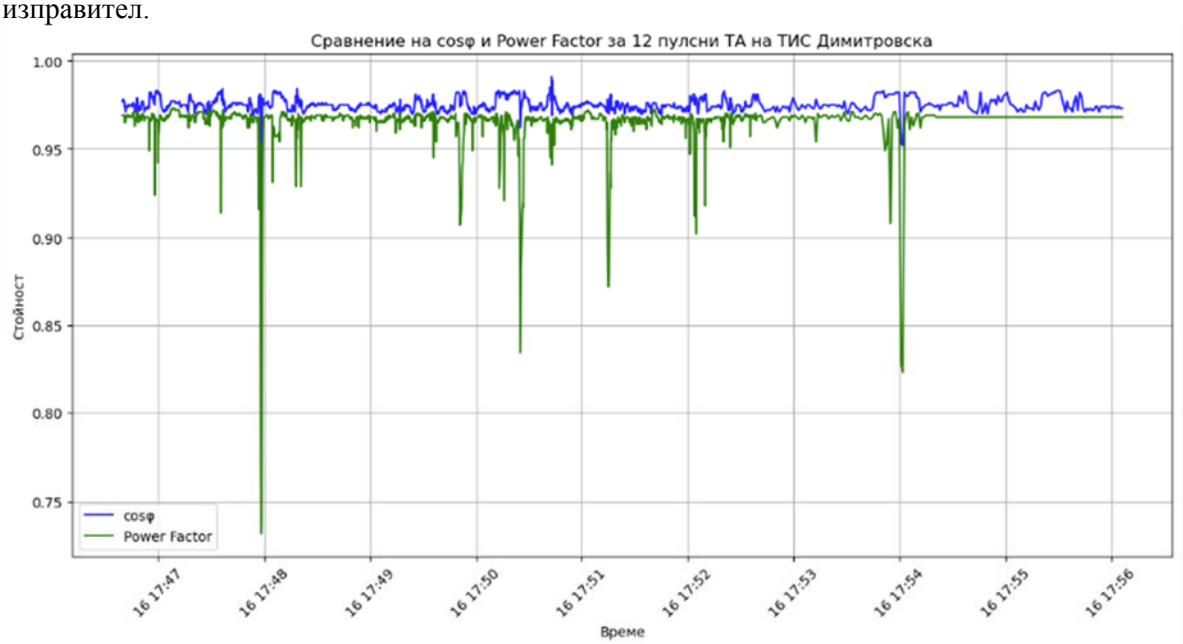
Фиг. 2. Сравнение на cos φ и Power Factor за 6-пулсен ТА на ТИС Медицинска академия

Средната стойност на ***PF***, изчислена от измерванията, е ***0,909***, минимално и максимално измерени стойности ***0,547*** и ***0,957***. За разлика от ***cos φ***, ***PF*** показва по-значителни и по-чести колебания, което се дължи на наличието на хармонични изкривявания на тока ***THDi***, типични за 6-пулсния ТА. Тези хармоници влияят неблагоприятно върху ефективното използване на активната мощност.

На фиг. 3 е представено времевото поведение на ***cos φ*** и ***PF*** за 12-пулсен ТА. Средната стойност на ***cos φ*** е значително по-висока ***0,975***, минималната и максимална отчетени стойности ***0,853*** и ***0,991***. Колебанията в стойностите са незначителни със с отклонение около

0,0049, което е с около ***95%*** по-малко в сравнение с 6-пулсния ТА. Това потвърждава ефективната работа на системата и по малко консумираната на реактивна енергия.

PF също показва съществено подобрение със средна стойност ***0,965***, с измерени минимална ***0,732*** и максимална ***0,973*** стоийности. Отклонението и тук е малко, едва ***0,0145***, което е с около ***83%*** по-ниско от това при 6-пулсен ТА. Колебанията на ***PF*** са редки и значително по-малки, вследствие на същественото намаляване на хармоничните изкривявания при 12-пулсния тягова изправител.



Фиг. 3. Сравнение на cos φ и Power Factor за 12-пулсен ТА на ТИС Медицинска академия

Повишаването на ***cos φ*** при консумация се дължи на нарастването на активната мощност спрямо реактивната, докато влошаването на ***PF*** е резултат от увеличените хармонични изкривявания на тока ***THDi***, характерни за тягова изправителна система.

4.2 Анализ на хармоничния спектър при различни натоварвания на двете системи

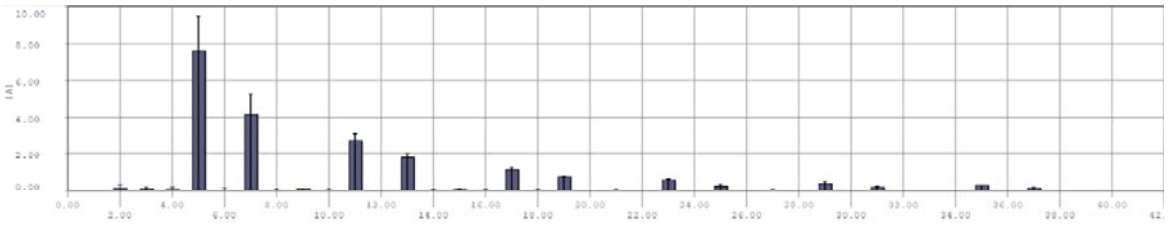
В този раздел е представен подробен анализ на влиянието на хармоничните токове и напрежения върху ***cos φ*** и ***PF*** при експлоатация на 6-пулсен и 12-пулсен ТА. Изследването включва оценка на средните стойности, вариациите и характерните хармонични изкривявания THDi, като се анализира поведението на системата при различни режими на натоварване.

На фиг. 4 е показан хармоничният спектър на тока при работа на 6□пулсен ТА под товар. Най-силно са представени са 5□ти (≈8 A, 16%) и 7□ми хармоник (≈4 A, 8%), както и по-ниски стойности на 11□ти (≈2.5 A, 5%) и 13□ти хармоници (≈2 A, 4%). По-високите хармоници са с амплитуди под 1 A (<2%). Фундаменталната компонента на тока I е около 50 A.

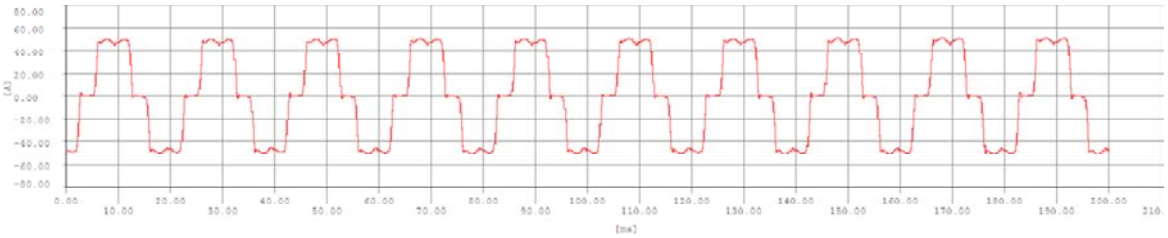
Долната част на фигурата илюстрира времевата форма на тока, която има характерен „изсечен“ вид с отчетливи фронтове, дължащи се на диодния характер на тягова изправителна система. Всеки диод провежда в рамките на 60° електрически, като се отпушва на всеки 60°, когато неговата фаза стане най□положителна спрямо останалите, при ъгъл на отпушване 0°, тъй като изправителят е неуправляем. Максималната стойност на тока достига приблизително ±50 A.

Измерения общ хармоничен коефициент на тока THDi е приблизително 19%, което е типично за 6□пулсни диодни изправителни системи. Наличието на тези хармоници води до влошени показатели на PF и повишена консумация на реактивна енергия.

Хармоничен спектър (порядъци от 1 до 42) на фазовия ток при натоварване



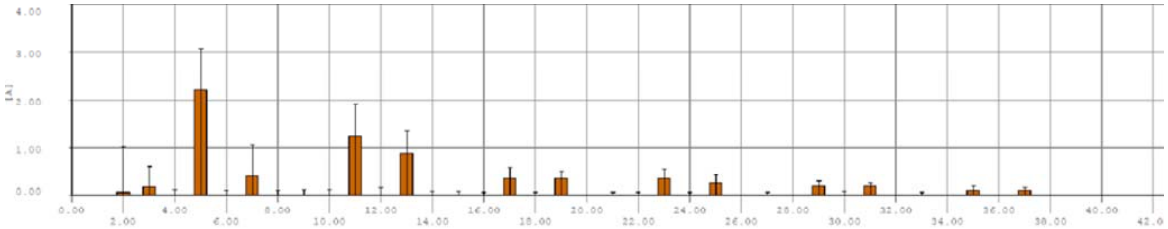
Форма на фазовия ток при натоварване



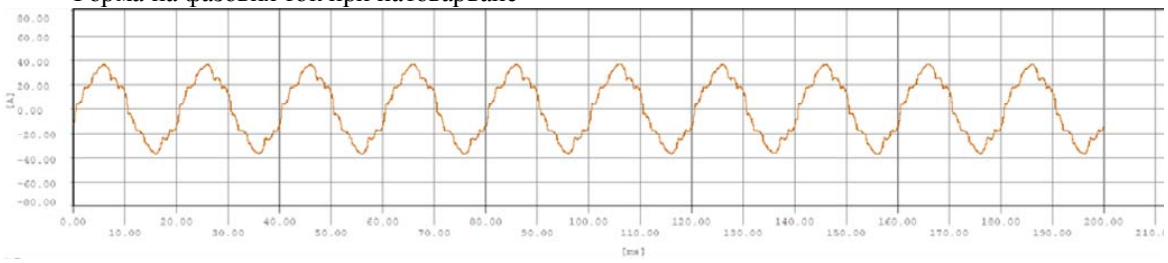
Фиг. 4. Хармоничен спектър и форма на фазовия при натоварване на 6□пулсен тягова агрегат (ТА)

На фиг. 5 е показан хармоничният спектър на тока при работа на 12-пулсен ТА под товар.

Хармоничен спектър (порядъци от 1 до 42) на фазовия ток при натоварване



Форма на фазовия ток при натоварване



Фиг. 5. Хармоничен спектър и форма на фазовия при натоварване на 12□пулсен ТА

Горната част на фигурата показва хармоничния спектър на фазовия ток при работа на 12□пулсен ТА под товар. Отчетливи са 5□ти (≈2,2 A, 4,4%), 11□ти (≈1.2 A, 3,0%) и 13□ти хармоник (≈0,9 A, 2.3%), докато 7□ми хармоник е слабо изразен (<0.5 A, <1,3%). По-високите хармоници (>15□ти порядък) са с амплитуди около 0,4 A (1%). Фундаменталната компонента на тока е приблизително 40 A.

Долната част на фигурата илюстрира времевата форма на тока, която е значително по-близка до синусоидална в сравнение със 6□пулсния ТА. Всеки диод провежда в рамките на 30° електрически, като се отпушва на всеки 30°, когато неговата фаза стане най□положителна спрямо останалите, при ъгъл на отпушване 0°. Максималната стойност на тока достига приблизително ±40 A.

Изчисленият общ хармоничен коефициент на тока ***THDi*** е приблизително 6,9%, което е със ~64% по-ниско в сравнение със 6□пулсния ТА (***THDi*** ≈ 19%). Това значително намаляване на хармоничните изкривявания води до по-добри стойности на PF и по-ниска консумация на реактивна енергия.

В режим на празен ход и при двата типа ТА – 6-пулсен и 12-пулсен – измерванията показват, че във формата на тока липсват значителни хармонични изкривявания. Хармоничният спектър е доминиран от основната (фундаменталната) компонента. Това е резултат от ниското натоварване на изправителите и факта, че в този режим не протичат големи токови импулси, характерни за работата под товар.

Въпреки това се наблюдават съществени разлики в $\cos\varphi$ (виж точка 4.1.) между двете схеми. При 6-пулсния ТА измерената средна стойност на $\cos\varphi$ е значително по-ниска, поради доминиращата реактивна мощност в празен ход и липсата на активен товар. За сравнение, при 12-пулсния ТА $\cos\varphi$ е по-висок благодарение на по-доброто фазово изместване между тока и напрежението и по-ниската консумация на реактивна енергия.

И двете системи консумират реактивна енергия в този режим, но ефектът е по-силно изразен при 6-пулсната конфигурация, което води до влошени показатели на Power Factor и по-високи загуби в тягова електрозахранваща система (ТЕС).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на резултатите от проведеното изследване показва, че 12□пулсните диодни токоизправителни системи превъзхождат 6□пулсните по отношение на енергийната ефективност, стабилността на електрозахранването и качеството на подаваната електроенергия. Те осигуряват по-добри стойности на $\cos\varphi$ и ***PF***, както и намалени пулсации и хармонични изкривявания, което води до по-ниски загуби в ТЕС.

С оглед на засиления натиск от Европейския съюз за прилагане на устойчиви и енергийно ефективни решения в градския транспорт, резултатите от изследването подчертават необходимостта от модернизация на амортизираните токоизправителни станции. Подмяната на остарелите 6□пулсни системи с 12□пулсни технологии би допринесла значително за постигането на съвместимост с европейските екологични и технически стандарти и за повишаване на надеждността на електрозахранването в НГЕТ.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Е. Додов и Г. Павлов, „Изследване и анализ на енергетичните параметри на тягови подстанции за подземен градски електрически транспорт,” Механика, Транспорт, Комуникации, том 20, бр. 3/2, статия № 2274, 2022. [Онлайн]. Налично: http://www.mtc-aj.com

[2] Т. К. Лалев, Възможности за повишаване на енергетичните параметри на тягова електрозахранваща система на наземен градски електрически транспорт: монография, София: Изд. авт., 2025. ISBN: 978-619-04-0389-0.

[3] Директива (ЕС) 2019/1161 на Европейския парламент и на Съвета от 20 юни 2019 година за изменение на Директива 2009/33/ЕО за насърчаването на чисти и енергийноефективни пътни превозни средства, Официален вестник на Европейския съюз L 188, 12.7.2019, стр. 116–130. [Онлайн]. Налично: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj

[4] Регламент (ЕС) 2021/1119 на Европейския парламент и на Съвета от 30 юни 2021 година за създаване на рамката за постигане на неутралност по отношение на климата и за изменение на регламенти (ЕО) № 401/2009 и (ЕС) 2018/1999 (Европейски закон за климата), Официален вестник на Европейския съюз L 243, 9.7.2021, стр. 1–17. [Онлайн]. Налично: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj

[5] Решение (ЕС) 2022/591 на Европейския парламент и на Съвета от 6 април 2022 година относно Общата програма на Европейския съюз за действие за околната среда до 2030 година, Официален вестник на Европейския съюз L 114, 12.4.2022, стр. 22–36. [Онлайн]. Налично: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2022/591/oj

[6] D. S. Hoo, K. H. Chua, Y. S. Lim, B. H. Lim, M. B. Bonab, и L. Wang, “Mitigation of harmonic distortions in third rail electrical systems,” International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 14, no. 1, pp. 348–357, Mar. 2023, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp348-357

[7] Janitza electronics GmbH, UMG 604 User Manual, Lahnau, Germany. [Онлайн]. Налично: https://www.janitza.com/files/download/manuals/current/UMG604/janitza-bhb-umg604ul-en.pdf

STUDY OF THE INFLUENCE OF LOADING ON THE EFFICIENCY OF 6-PULSE AND 12-PULSE DIODE RECTIFIER

Todor Lalev, Martina Tomcheva, Detelina Pavlova
tlalev@vtu.bg, mtomcheva@vtu.bg, didaip@vtu.bg

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

Abstract: The present study aims to analyze how different operating modes affect the energy efficiency of diode rectifiers used in traction substations. The study was carried out under real operating conditions of existing rectifier stations located in the territory of the city of Sofia, serving the urban ground electric transport (tram and trolleybus).

The study examined two main types of rectifier configurations – 6-pulse and 12-pulse. The measurements were performed at different load levels, observing the following parameters: input voltage, current, ripple, reactive and active energies, as well as cosφ.

The results obtained are presented in detail in the report and analyzed both quantitatively and graphically. They show that 12-pulse rectifier systems demonstrate higher energy efficiency and lower voltage ripple, especially at partial load. In turn, 6-pulse rectifiers are characterized by larger ripple and relatively higher losses under the same conditions.

The study contributes to a deeper understanding of the behavior of diode rectifier stations in a real operating environment and provides a practical basis for optimizing traction power supply in urban transport infrastructure.

Key words: rectifier substation, thyristor rectifier, energy efficiency