

## ИЗМЕРВАНЕ И АНАЛИЗ НА ЕНЕРГЕТИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ТЯГОВА ПОНИЗИТЕЛНА СТАНЦИЯ В МЕТРОПОЛИТЕНА

Емил Додов, Тодор Лалев  
[edodov@abv.bg](mailto:edodov@abv.bg)

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

**Ключови думи:** Тягово понизителна станция, тягов агрегат, енергетични параметри.

**Резюме:** Захранването на тяговата енергоснабдителна система (ТЕС) на метрополитена се осъществява от тягово понизителни станции (ТПС). Всяка ТПС е оборудвана с тягов агрегат (ТА), който се състои от тягов трансформатор (ТТр) и токоизправител (ТИ). Видовете ТА експлоатирани в метрополитена и тяхното поведение са разгледани по-долу.

В резултат на проведените експериментални измервания в реални експлоатационни условия са събрани и анализирани данни за ток, напрежение, активна мощност ( $P$ ), реактивна индуктивна ( $Q_i$ ) и реактивна капацитивна мощност ( $Q_c$ ),  $\cos\phi$ , общи хармонични изкривявания на формите на тока на високата страна на ТТр (THDi%) и други.

Сравнени са техническите показатели на видовете ТА и е направена оценка как вида им определя качеството на изправеното напрежение, електроенергията, загубите и връзката им с ТИ.

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Софийското метро е най-важната транспортна артерия на обществения масов градски транспорт. Комфортът и безопасността на пътниците се повишават постоянно. Наред с това обаче трябва да се обърне внимание и на енергийната ефективност на тяговите енергоснабдителни мрежи. В Столичния метрополитен на всяка метростанция (МС) е разположена ТПС. С няколко изключения, там където разстоянията между спирките е късо, са изградени понизителни станции (ПС), които нямат тягова част.

Към днешна дата в ТПС на метрополитена се използват два вида тягови агрегати (ТА). В подстанциите от МС „Константин Величков“ до „Сливница“ на първа линия на метрото електрообзавеждането е руско и чешко производство. С течение на времето една голяма част от разпределителните уредби (РУ) 10 kV и DC 825kV са преоборудвани с нови съоръжения. Тяговите трансформатори и токоизправителите не са подменени все още. Останалите подстанции от втора, трета и четвърта линия са оборудвани със съвременни съоръжения, като ТА имат различни от гореспоменатите трансформатори и токоизправители. На трета линия номиналното изправено напрежение е 1500V.

Всъщност ТА включва силов трансформатор и токоизправител. Всички агрегати, монтирани в ТПС на метрополитена, работят в режим постоянно включени и се изключват само при профилактични или аварийни ремонти. Изключение правят само ТА в ТПС Депо Обеля, които се редуват през месец. Те захранват коловозното развитие и халетата на депото, като натоварването им е много малко.

## 2. ЕНЕРГЕТИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ТЯГОВИ АГРЕГАТИ ИЗПОЛЗВАНИ В МЕТРОПОЛИТЕНА

Експерименталните изследвания са направени в предварително избрани за целта ТПС, които са оборудвани с различни типове ТА. Изследването е проведено през месец март 2024 г., като за периода от 01.03 до 31.03 са записвани и измервани различни електрически величини (ток, напрежение, cosφ, активна и реактивна мощност и др.), определящи енергетичните показатели и качеството на електрическа енергия на ТПС спрямо електроенергийната система (ЕЕС). За целите на изследването измерванията на всички параметри, показани и анализирани по-нататък в доклада, са извършени при еднакви условия и по едно и също време. Измерването е направено с мултифункционален мрежов анализатор „Janitza“ тип UMG 604. Измервателният уред е с възможност да записва преходни процеси, измерва електрическата енергия (kWh, kvarh), ток, напрежение, хармоничен анализ и др.

### 2.1. Обекти на изследването.

Първият обект е ТА инсталиран в ТПС на метростанция „Западен парк“. Този ТА е от по-стар тип и е оборудван с двунамотъчен тягов трансформатор (ТТ) 3000kVA и диоден трифазен токоизправител (ТИ) схема „Ларионов“, реализиращи трифазна шестимпулсна схема на изправяне.[1] Общ вид на измервателната постановка е показан на фигура 1, а).

Вторият обект е ТА инсталиран в ТПС на метростанция „Стадион Васил Левски“. Тук ТА е от нов тип с тринмотъчен трансформатор 3000kVA, като първичната намотка е свързана в „триъгълник“ а двете вторични намотки са свързани в „звезда“ и „триъгълник“ към отделни изправители, два на брой, по схема „Ларионов“. ТА реализира шестфазна дванадесетимпулсна схема на изправяне.[1] Общ вид на измервателната постановка е показан на фигура 1, б).

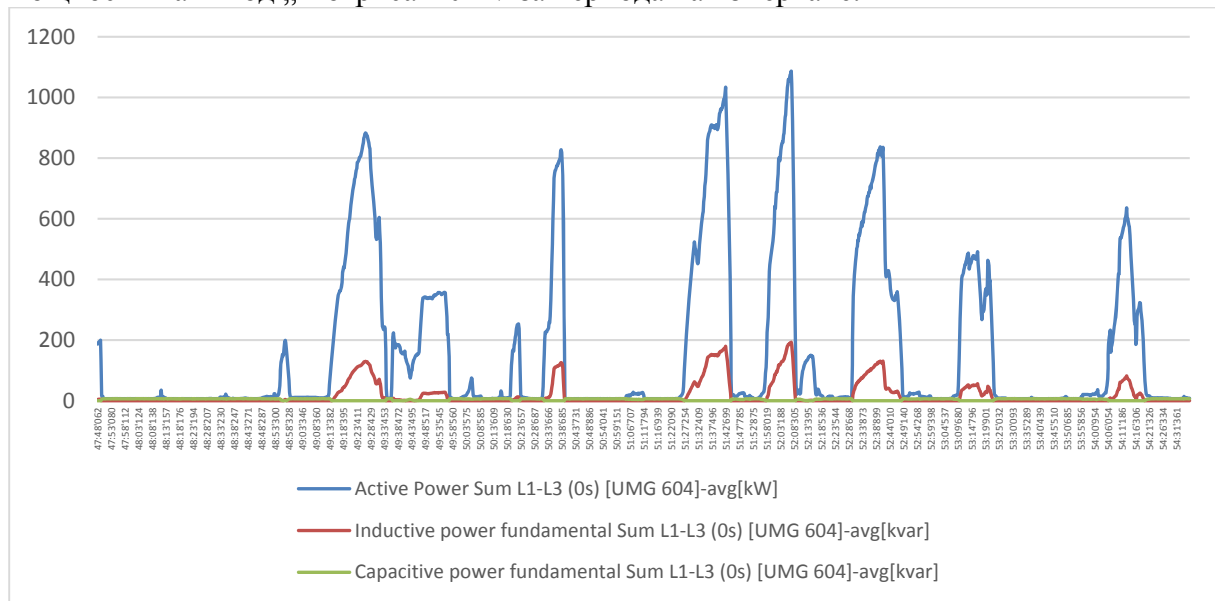
Избраните за изследване типове ТА намират широко приложение както в ТИС на НГЕТ така и в ТПС на метрополитена. [2]



Фиг. 1. а,б. Общ вид на измервателната постановка в ТПС на МС „Западен парк“ и МС „Стадион Васил Левски“

## 2.2. Анализ на данните получени при експерименталното измерване в ТПС на метростанция „Западен парк“.

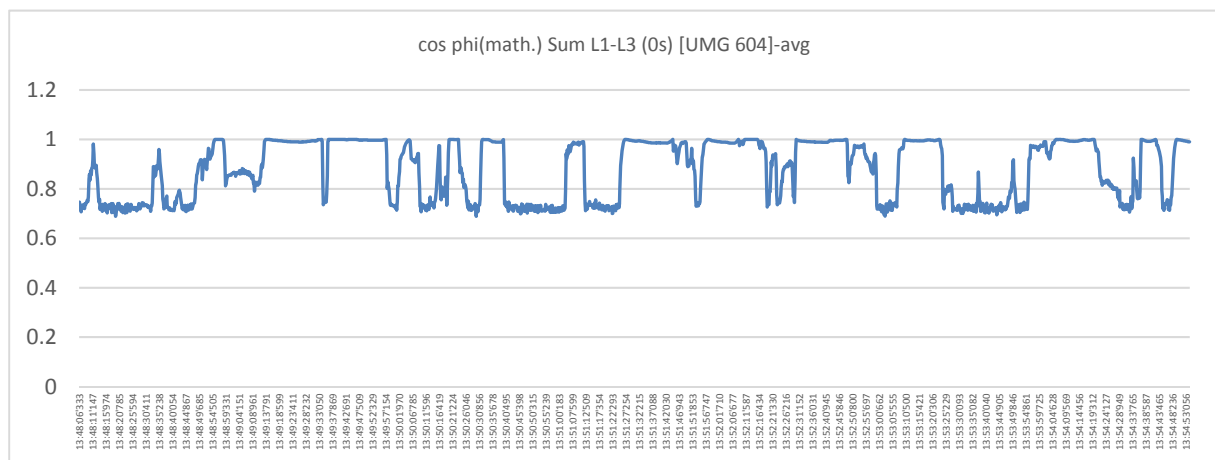
На фигура 2 е показано изменението на активната, индуктивната и капацитивната мощности на въвод „Мотриса” 10 kV за периода на измерване.



Фиг. 2. Активна и реактивна мощност на въвод „Мотриса”

Анализът на графиките показва, че реактивната мощност (PM) има както индуктивен така и капацитивен характер. В периодите, когато няма тягово натоварване PM е капацитивна, като с постепенното нарастване на тягата се наблюдава и нарастване на индуктивната съставка. Активната мощност достига максимална моментна стойност около 1086 kW, при съответстващи моментни стойности от 192 kvar на индуктивната и 0 kvar капацитивна мощности. Т.е. PM има изцяло индуктивен характер. Съотношението на реактивната мощност спрямо активната е около 17,6 % и се запазва и през другите интервали на натоварване. В периоди, когато ТТр не е натоварен PM има само капацитивната съставка. При минимална моментна стойност на активната мощност от 6 kW индуктивната мощност е 0 kvar, а капацитивната приблизително 6 kvar.

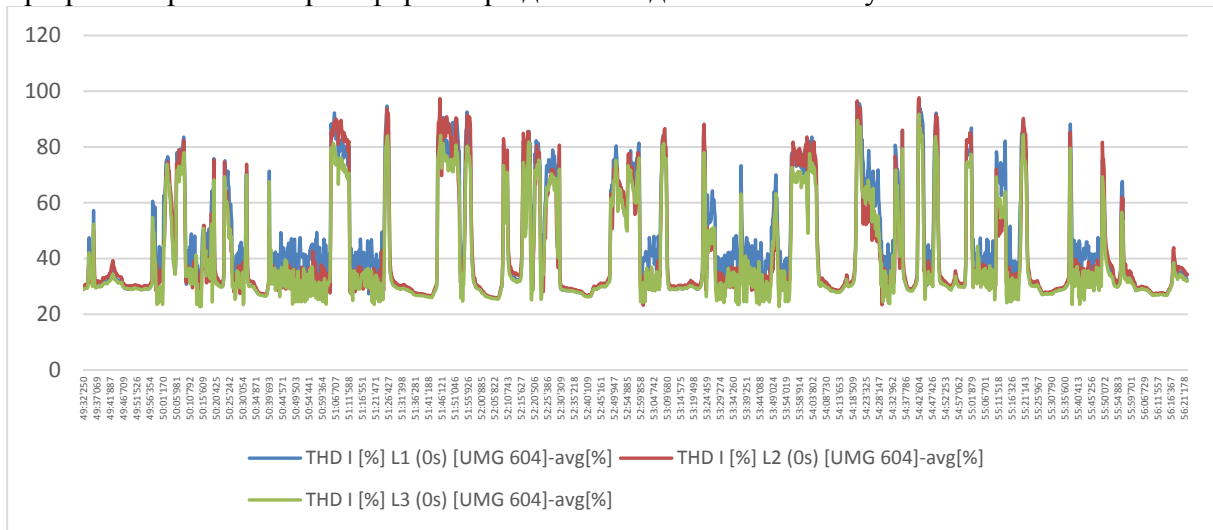
На фигура 3 е показано изменението на коефициента на мощност за дадения период от време.



Фиг. 3. Изменение на коефициента на мощност на въвод „Мотриса”

От графиката е видно, че когато няма тяга и натоварването на трансформаторите е малко (виж фиг.2), коефициента на мощност  $\cos \varphi$  е с най-ниски стойности, като достига до 0,68. Това силно влошава енергетичните параметри на системата. Причината за лошия  $\cos \varphi$  се явява генерираната капацитивна мощност, която влошава качеството на електроенергията. С нарастване на натоварването се увеличава и индуктивната съставка, което води до подобряване на коефициента на мощност. Той е най-голям при най-голямото натоварване и достига стойности близки до 1. Вижда се обаче, че  $\cos \varphi$  се колебае в широки граници.

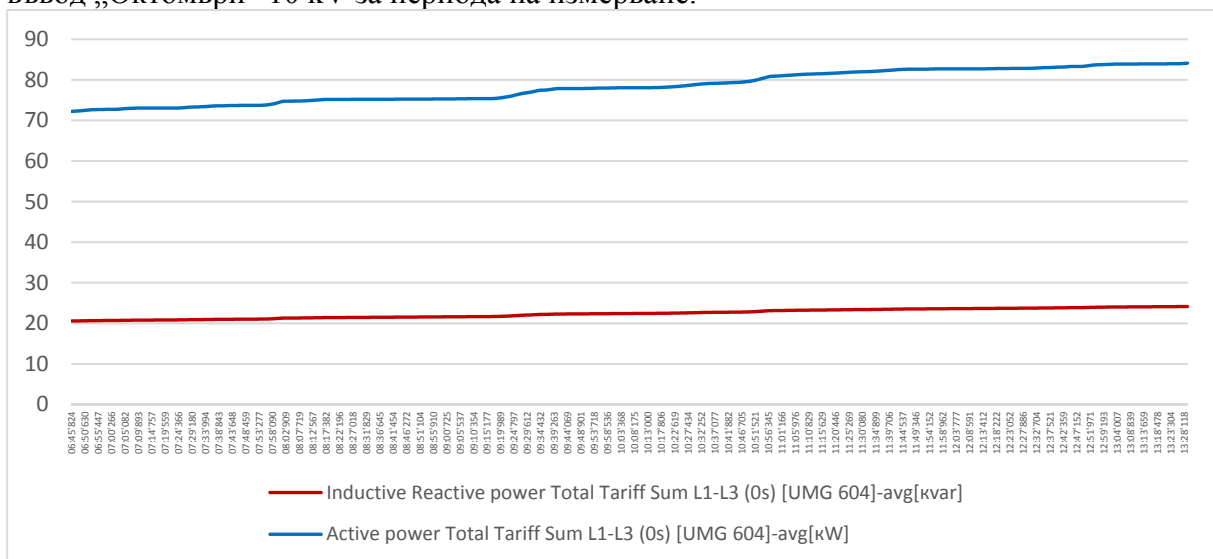
Направено е измерване на показателя  $\text{THD}_I$  %, който показва общите хармонични изкривявания на тока на първичната страна на ТТр. На фиг. 4 е показано изменението на  $\text{THD}_I$  % за трите фази. Средната стойност е около 42%, като максималните стойности при разтоварване на трансформатора достигат до 98%. Минимумът е 23%.



Фиг. 4. Изменение на  $\text{THD}_I$ % на въвод „Мотриса”

### 2.3. Анализ на резултатите от измерването в ТПС на МС „Стадион Васил Левски“.

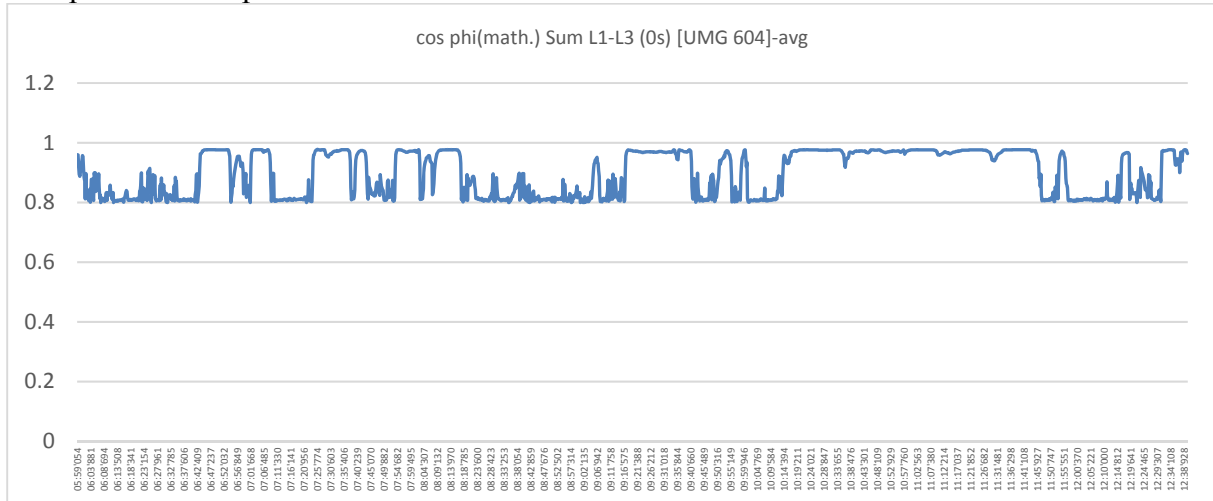
На фигура 5 е показано изменението на активната и реактивната мощност на въвод „Октомври” 10 kV за периода на измерване.



Фиг. 5. Активна и реактивна мощност на въвод „Октомври”

На фигурата се вижда, че РМ има изцяло индуктивен характер и приблизително повтаря измененията на активната мощност. През целия период на измерване капацитивната мощност е нула. Също така е видно, че въвод „Октомври” е значително по-равномерно натоварен от въвод „Мотриса”. Пиковите стойности на активната мощност достигат 85 kW, съответно 24 kvar реактивна мощност. Съотношението на реактивната мощност спрямо активната е около 28,2%.

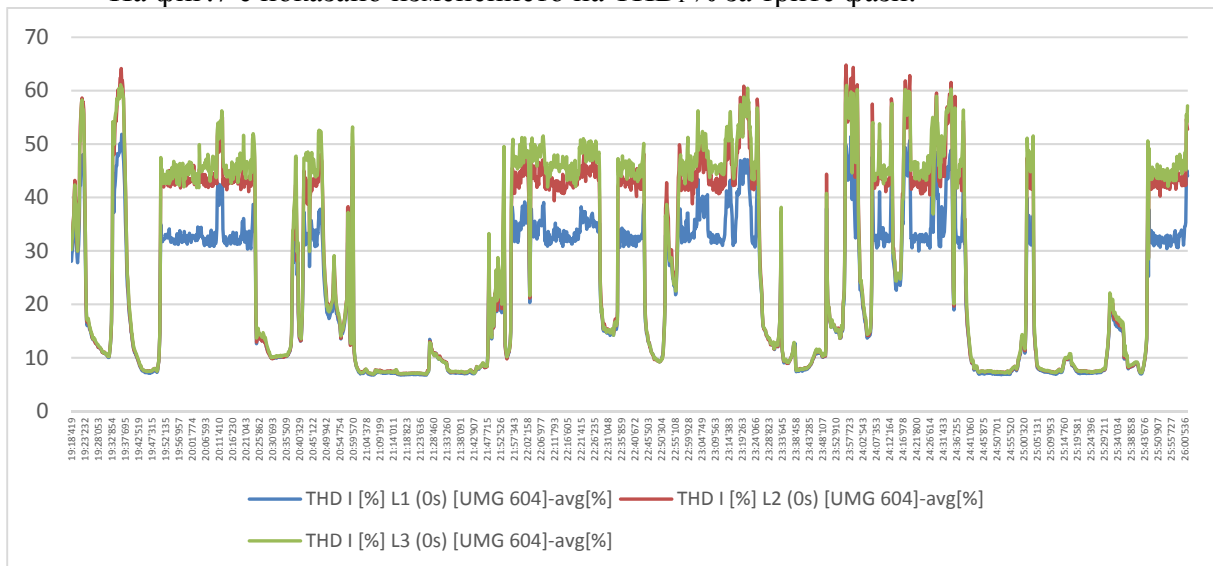
На фигура 6 е показано изменението на коефициента на мощност в зададения интервал на измерване.



Фиг. 6. Изменение на коефициента на мощност на въвод „Октомври”

Наблюдаваме много по-малки колебания на  $\cos \varphi$ , който достига до 0,98 а средната му стойност се колебае около 0,9. Най-ниските му стойности не падат под 0,8, което показва по-доброто енергетично поведение на тази схема на ТА.

На фиг.7 е показано изменението на THD<sub>I</sub> % за трите фази.



Фиг. 7. Изменение на THD<sub>I</sub>% на въвод „Октомври”

В по-голямата част от избрания интервал на измерване стойността му се колебае около 25%, като максималните стойности при разтоварване на трансформатора достигат до 64%. Минималните стойности са около 6%. Това показва, че хармоничният състав на тока на първичната страна на ТТр при тази схема на ТА е значително по-малък от шестимпулсната схема на въвод „Мотриса”.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направените измервания в реални експлоатационни условия и анализът показват по-ниски енергетични показатели на трифазната шестимпулсна схема на ТА в ТПС на метростанция „Западен парк“ в сравнение с дванадесетимпулсната изправителна схема на ТА инсталиран в ТПС на метростанция „Стадион Васил Левски“.  $THD_1$  % показва значително по-малък хармоничен състав на тока на първичната страна на ТТр при дванадесет импулсната схема на изправяне. При първата схема загубите на мощност са големи и  $\cos \varphi$  е по-нисък. В резултат на това консумираната енергия в ТПС на МС „Западен парк“ е с по-ниско качество и влияе негативно на тяговите токове на останалите потребители. Можем да направим извода, че шестфазните дванадесетимпулсни схеми на изправяне с ТА от нов тип с тринамотъчен трансформатор, като първичната намотка е свързана в „триъгълник“ а двете вторични намотки са свързани в „звезда“ и „триъгълник“ към отделни изправители, два на брой, значително подобряват енергетичните параметри на ТЕС на метрополитена.

#### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Техническа документация, схеми, параметри и характеристики на тягово-понижителни станции на метрополитена.
- [2] Томчева М., Павлов Г., Лалев Т. и кол. Изследване на енергетичните параметри на токоизправителни станции за наземен градски електрически транспорт. Научна конференция „Комуникации, електрообзавеждане и информатика в транспорта – КЕИТ 2018“, гр. Банско, 28 - 30.09.2018 г.
- [3] Gyurov V., Parushev P., Makedonski N., Duganov M. Simulation Study of the Electric Consumption Regimes in Trolleybus Power Supply Networks (2022) Proceedings of the 11th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2022, pp. 200 - 203

## MEASUREMENT AND ANALYSIS OF THE ENERGY PARAMETERS OF A TRACTION SUBSTATION IN THE METROPOLITAN

Emil Dodov, Todor Lalev

[edodov@abv.bg](mailto:edodov@abv.bg)

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

**Key words:** *Traction substation, traction unit, energy parameters.*

**Abstract:** *The power supply of the traction energy supply system of the underground is carried out by traction power stations (TPSs). Each TPS is equipped with a traction unit (TU), which consists of a traction transformer (TTr) and a rectifier. The types of TUs operated in the metropolitan area and their function are discussed below.*

*As a result of the experimental measurements in live operating conditions, data on current, voltage, active power (P), reactive inductive (Qi) and reactive capacitive power (Qc),  $\cos \varphi$ , total harmonic distortions of the current on the high side of TTr (THDI%) and others were collected and analyzed.*

*The technical indicators of the TA types are compared, and an assessment is made of how their type determines the quality of rectified voltage, the electricity, the losses and their relationship with the rectifier.*