

## ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ЕНЕРГЕТИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ТЯГОВИ ПОДСТАНЦИИ ЗА ПОДЗЕМЕН ГРАДСКИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТ

*Емил Додов, Георги Павлов*  
edodov@abv.bg, pavlov61@abv.bg

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”  
гр. София, ул. „Гео Милев” 158  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

*Ключови думи:* Метрополитен, тягов агрегат, токоизправител, фактор на мощност

*Резюме:* Софийското метро е най-важната транспортна артерия на обществения масов градски транспорт. Комфорта 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 статията са показани и анализирани данни от измерване на ток, напрежение, активна мощност ( $P$ ), реактивна индуктивна ( $Q_i$ ) и реактивна капацитивна мощност ( $Q_c$ ), фактор на мощност ( $\cos\phi$ ) и други. Показани са различни тягови агрегати (ТА), които са на експлоатация в тяговопонизителните станции (ТПС) на столичния метрополитен. Разгледано е поведението на енергетичните показатели при различни режими на работа на трансформаторите. Анализирани са причините за ниските стойности на фактор на мощност и наличието на капацитивна енергия, която води до влошаване на качеството на електрическата енергия и до санкции.

### 1. Въведение

В Столичния метрополитен на всяка метростанция (МС) е разположена ТПС. С няколко изключения, там където разстоянията между спирките са къси, 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 825 kV 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 1500 V.

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 депо, като натоварването им е много малко.

## **2. Енергетични изследвания на тягови агрегати използвани в метрополитена.**

Данните от измерванията са взети от предварително избрани за целта ТПС, които са оборудвани с различни типове ТА. Изследването е проведено през месец май 2022 г., като за периода от 24.05. до 26.05. 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. Данните от измерването са снети с уред ITRON SL 761B071. За да се получи обективно изследване, измерванията обхващат едно денонощие (24 часа) през неработен ден с по-ненатоварен трафик и едно денонощие през работен ден с нормално натоварване. По време на сервисния режим от 0.30-4.30 ч. няма тягово натоварване, а в останалото време метроваковете се движат във всички режими на работа на електродвигателите (спиране, ускоряване, движение по инерция, рекуперация).

### **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) 3000 kVA и диоден трифазен токоизправител (ТИ) схема „Ларионов“, реализиращи трифазна шестимпулсна схема на изправяне. [1]

Вторият обект е ТА инсталиран в ТПС на метростанция „Стадион Васил Левски“. Тук ТА е от нов тип с тринмотъчен трансформатор 3000 kVA, 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]

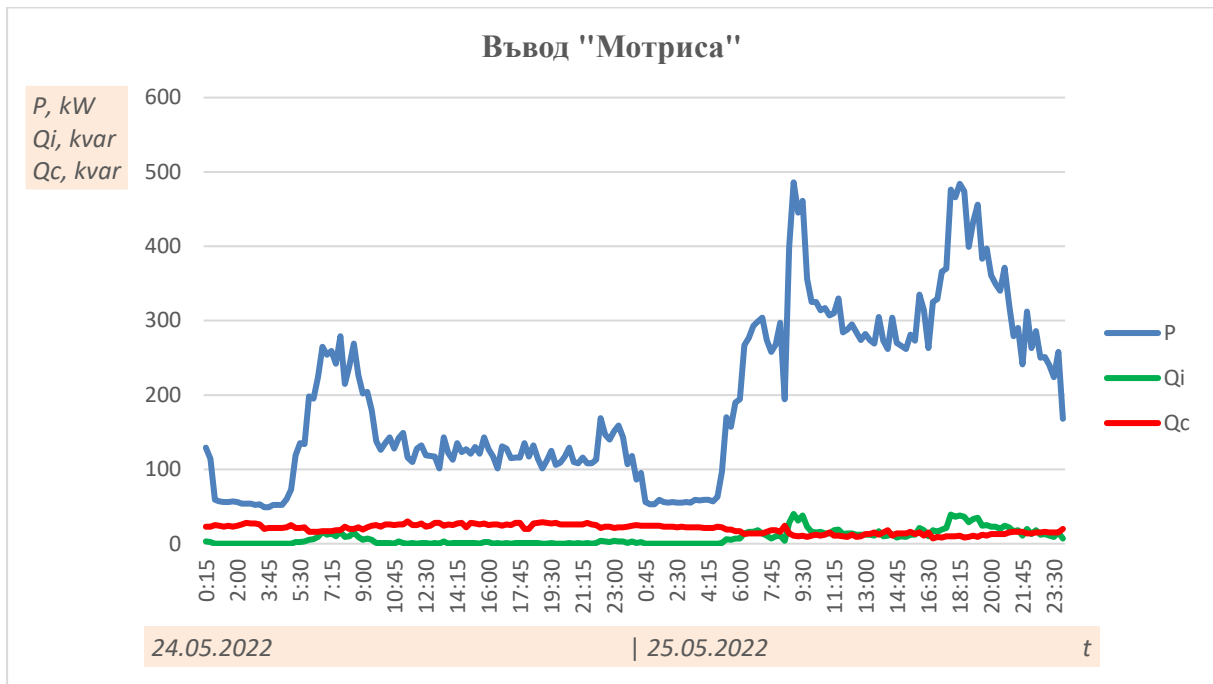
Избраните за изследване типове ТА намират широко приложение както в ТИС на НГЕТ така и в ТПС на метрополитена. [2]

### **2.2. Анализ на резултатите от измерването в ТПС на метростанция „Западен парк“.**

На фигура 1 е показано изменението на активната, индуктивната и капацитивната мощности на въвод „Мотриса“ 10 kV за периода на измерване. Периодът на измерването е такъв, през който има по-слабо натоварване през почивния ден, по-голямо натоварване през работния ден и съответно две нощи без тягово натоварване, като са включени само нетягови потребители.

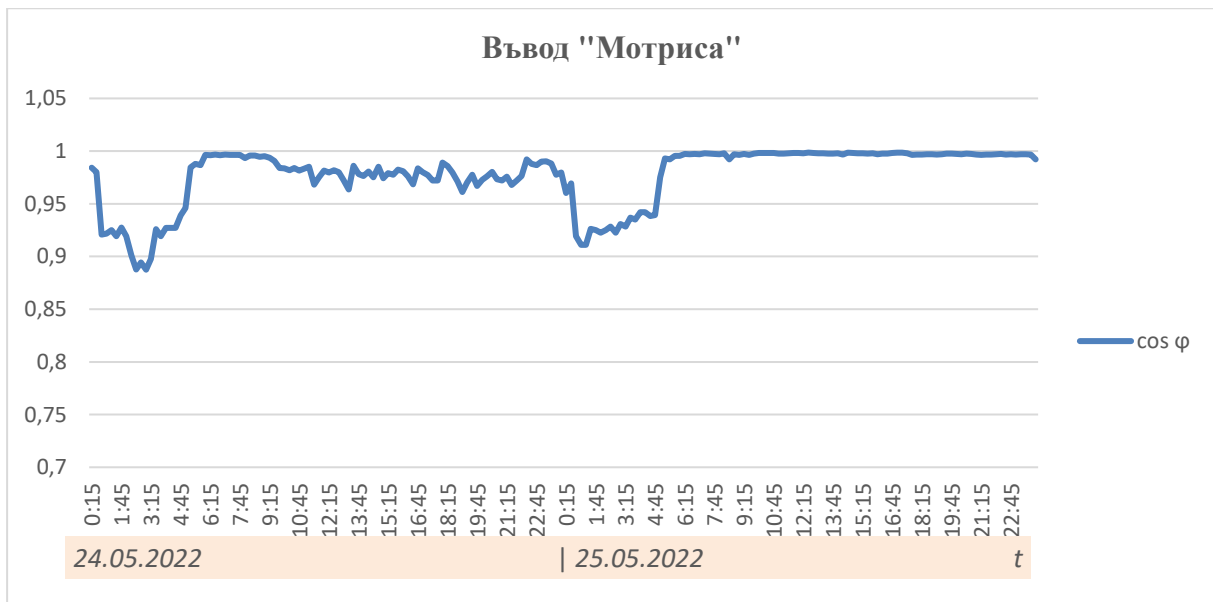
Анализът на графиките показва, че реактивната мощност (РМ) има както индуктивен така и капацитивен характер. По време на сервисния режим, когато няма тягово натоварване РМ е капацитивна, като с постепенното нарастване на тягата се наблюдава и нарастване на индуктивната съставка. В час пик между 7 и 9 ч. двете съставки са почти равни по стойност през първия ден, който е с по-малко натоварване спрямо втория. Активната мощност достига максимална моментна стойност около 259 kW, при съответстващи моментни стойности на индуктивната и капацитивна мощности съответно 16 и 18 kvar. През второто денонощие се наблюдават известни различия. През нощта РМ е капацитивна, но през деня, когато натоварването е по-голямо спрямо предния ден, през голяма част от времето индуктивната съставка е по-голяма.

При максимална моментна стойност на активната мощност от 486 kW индуктивната мощност е 40 kvar а капацитивната 11 kvar. Това показва изцяло индуктивен характер на РМ, която приблизително повтаря измененията на активната мощност.



Фиг. 1. Активна и реактивна мощност на въвод „Мотриса”

На фигура 2 е показана графика на изменението на фактор на мощност за дадения период от време.



Фиг. 2. Изменение на фактор на мощност на въвод „Мотриса”

От графиката е видно, че през нощта, когато няма тяга и натоварването на трансформаторите е малко, фактора на мощност  $\cos \varphi$  е с най-ниски стойности, като

достига до 0,88. Причината за лошия  $\cos \varphi$  се явява генерираната капацитивна мощност, която влошава качеството на електроенергията. С нарастване на натоварването през деня нараства и индуктивната мощност, което води до подобряване на фактора на мощност. Той е най-голям при най-голямото натоварване в час пик и достига стойности близки до 1. Вижда се обаче, че през почивния ден с разредени метросъстави и по-малко натоварване на ТА  $\cos \varphi$  се колебае доста. През втория ден обаче при относително по-голямо общо натоварване фактора на мощност запазва почти еднакви стойности, които са по-високи от предния ден. През нощта е сравнително по-голям отколкото през първата нощ, което съответства на по-ниските стойности на капацитивната мощност.

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

На фигура 3 е показано изменението на активната, индуктивната и капацитивната мощности на въвод „Октомври” 10 kV за периода на измерване.



Фиг. 3. 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-натоварен от въвод „Мотриса”. Дори през първия неработен ден с разреден трафик на ЕТС пиковите стойности на активната мощност достигат 470 kW, съответно 108 kvar реактивна мощност. През втория ден с по-голямо натоварване активната мощност достига моментна максимална пикова стойност от 721 kW. В същото време реактивната мощност е 262 kvar.

На фигура 4 е показано изменението на фактора на мощност в зададения интервал на измерване. В режимите на натоварване на трансформаторите той е около 0,975, но е относително постоянен. Стойностите през двата дни при натоварени ТА са почти еднакви. През нощите, когато трансформаторите работят в режим близък до празен ход,  $\cos \varphi$  спада значително като достига до минимални стойности около 0,72.



Фиг. 4. Изменение на фактора на мощност на въвод „Октомври”

### 3. Заключение

Наблюдава се силна зависимост на фактора на мощност  $\cos \varphi$  от натоварването на тяговите трансформатори. И при двата вида ТА през нощта, когато няма тягов товар, се влошават енергетичните параметри на мрежата. Трансформаторите работят в режим близък до празен ход около 1% товар, като  $\cos \varphi$  се понижава до 0,88 при първия и 0,72 при другия ТА. Забелязва се също, че трансформаторите работят в режим на слабо натоварване и при наличие на тягово натоварване. Най-високите стойности на  $\cos \varphi$  на въвод „Мотриса“ са измерени при едва 8% натоварване през първия ден и около 16% през втория. Средното натоварване през делничен ден е около 310 kW. Този режим на работа, както и по-дългото кабелно трасе 10 kV (2960m) са причини за генерирането на капацитивна мощност. При ТА на въвод „Октомври” виждаме, че натоварването е по-голямо. Максималните стойности на коефициента на мощност са около 0,975 и са отчетени при 15% натоварване на трансформаторите през първия ден и 24% през втория. Средното натоварване през деня е 465 kW.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Техническа документация, схеми, параметри и характеристики на тяговопонижителни 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 – KEIT 2018“, гр. Банско, 28-30.09.2018 г.

# RESEARCH AND ANALYSIS OF THE ENERGY PARAMETERS OF TRACTION SUBSTATIONS OF THE UNDERGROUND URBAN ELECTRIC TRANSPORT

*Emil Dodov, Georgi Pavlov*

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

**Key words:** *Metropolitan, tractionunit, rectifier, powerfactor*

**Abstract:** *The Sofia subway is the most important transport artery of the public mass urban transport. Passenger comfort and safety are constantly being improved. Along with this, however, attention should also be paid to the energy efficiency of traction energy supply networks.*

*The article presents and analyzes data gathered from the research of current, voltage, active power ( $P$ ), reactive inductive ( $Q_i$ ) and reactive capacitive power ( $Q_c$ ),  $\cos\varphi$  and others. There are shown different traction units (TRUs), that are in operation in the traction reduction stations (TRS) of the capital subway. The behavior of the energy indicators in different operating modes of the transformers has been examined. This article also analyzes the reasons for the low values of the power factor and the presence of capacitive energy, which leads to the deterioration of the quality of electrical energy and to penalties.*