



---

**ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ТЯГОВИТЕ АГРЕГАТИ,  
ИЗПОЛЗВАНИ В ТПС НА МЕТРОПОЛИТЕНА  
И ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ НА РЕКУПЕРИРАНАТА ЕНЕРГИЯ  
ЧРЕЗ ВРЪЩАНЕ В МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ**

**Емил Додов**  
[edodov@abv.bg](mailto:edodov@abv.bg)

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

**Ключови думи:** *Метрополитен, тягов трансформатор, токоизправител*

**Резюме:** *В статията са показани и анализирани схеми на тягови агрегати (ТА), които са на експлоатация в тягово понизителните станции (ТПС) на първа, втора, трета и четвърта линия на столичния метрополитен. Разгледани са режимите на работа и е направено сравнение между отделните видове токоизправители. Изтъкнати са предимствата на многоимпулсните схеми на изправяне. Съгласно възприетите режими на работа на ТА са разгледани възможностите за повишаване на качеството на енергетичните параметри на електроразпределителната мрежа. Рекуперативното спиране и спускането по наклон на моторните оборудвани с асинхронни тягови двигатели с честотно управление са свързани с връщане на енергия в мрежата. Анализирана е възможността за оползотворяване на тази енергия и са направени препоръки за подмяна на токоизправителите на ТА.*

### **1. Въведение**

В Столичният 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. Метрото е първа категория по отношение на електрозахранването. Съгласно [1] потребителите от първа категория се электроснабдяват от два независими взаимно резервиращи се източника и допустимото прекъсване на электроснабдяването е само за времето на автоматичното превключване от единия източник към другия. Това обуславя начина на захранване и видът на шинната система. Разпределителна уредба 10kV се състои от две секции, които са свързани помежду си чрез секционен разединител. Всяка секция се захранва от градска подстанция чрез въвод 10kV и има връзки към съседните ТПС и ПС. Тяговите агрегати (ТА) са захранени от съответните секции. Двата полюса след изправителя са свързани към общи шини съответно плюсова (+825 V) и минусова. По този начин двата агрегата работят в паралел на страна ниско напрежение. В уредба +825 V има обходна шина и резервиращ бързодействащ прекъсвач. Трансформаторите са оразмерени така, че в нормален режим на работа да работят разделно и едновременно с максимум 50 %

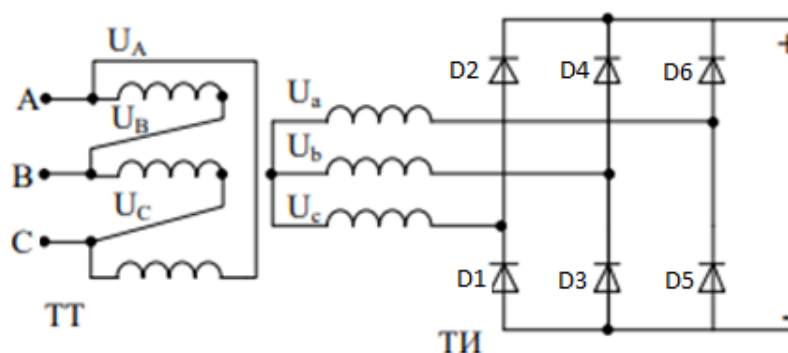
натоварване, а при аварийен режим (дефектиране на трансформатор, изправител или отпадане на трансформаторен извод в уредба 10 kV) всеки един от тях да поеме самостоятелно целия товар на другия. Участъка на линията между две съседни МС се захранва двустранно от съответните ТПС. По този начин се подsigурява непрекъснато захранване от единия трансформатор.

Към днешна дата в ТПС на метрополитена се използват два вида (ТА). В подстанциите от МС „Консантин 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. Анализ и схемни решения на тяговите агрегати използвани в тяговата електроснабдителна система на метрополитена.

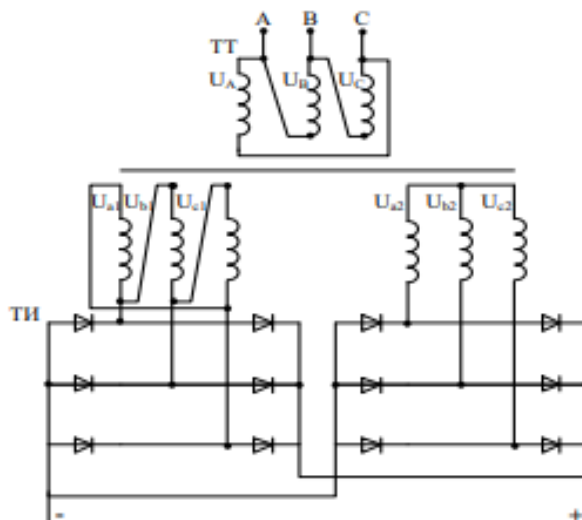
В ТПС се използват ТА с два вида трифазни неуправляеми мостови токоизправители. Първият от тях е шестимпулсен свързан по схема „Ларионов“ (фиг.1).



Фиг. 1. ТА с шестимпулсна схема на изправяне

В експлоатация са 5 бр такива ТА монтирани в ТПС на метростанциите от „Сливница“ до „Константин Величков“. Работата им е свързана със загуби на мощност, нисък коефициент на мощност изкривена форма на изправеното напрежение и мрежов ток.

Най-много на брой ТА са оборудвани с тринамотъчен силов трансформатор и диоден неуправляем 12 фазен мостов токоизправител. Трансформатора е с една първична свързана в триъгълник и две вторични намотки, едната свързана в звезда а другата в триъгълник. Всяка от намотките работи с един токоизправител свързан по схема на "Ларионов (фиг.1).



Фиг. 2. Многофазна схема на ТА с тринамотъчен трансформатор

В табл.1 са дадени номиналните данни на трансформаторите използвани в ТПС на метрополитена.

Таблица 2. Номинални данни на трансформаторите

Тягов тр-р	$S_n$ , kVA	$\cos\varphi_n$	$\Delta P_0$ , kW	$\Delta P_M$ , kW	$\Delta I_0$ , %
ТТ I линия	3000	0,8	6,3	18,6	8,84
ТТ II,IV линия	3000	0,86	5,219	17,59	6,3
ТТ III линия	4000	0,9	6,8	14,3	6,1

Паралелният тип на свързване на вторичната страна осъществява дефазирание на векторите на напреженията на  $60^\circ$ , което намалява пулсациите на изправения ток [2].

Практиката е доказала, че най-добрата изправителна схема е мостовата [5]. От направените изследвания е доказано, че най-перспективните от сложните изправителни схеми са схемите с последователно свързани мостове, тъй като при паралелните са необходими уравнителни реактори с голяма мощност. Както беше казано по горе в най-новите ТПС на метрополитена се прилагат схеми от паралелен тип. Тези схеми имат и други недостатъци, свързани с по-големи загуби на мощност.

Напрежението на входа на токоизправителите на първа, втора и четвърта линия е 650V, а на тези от трета линия 1300V.

За изправеното напрежение са в сила зависимостите [3]:

$$(1) \quad U_d = 2 \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_{2z} = 4,68 \cdot U_{2z} = 2,7 \cdot U_{2t}$$

където:

$U_{2z}$  - напрежение на вторична намотка свързана в звезда

$U_{2t}$  - напрежение на вторична намотка свързана в триъгълник

При тези стойности на вторичното напрежение на трансформатора, изправеното напрежение на празен ход на плюсовата шина в уредба DC е около 1000 V при I, II, IV линия а на III линия достига и до 1800V. Доста високи стойности на напрежението,

което дори при максимален пад вследствие на увеличаване на товара до тяговите двигатели на мотрисите достига напрежение близко до горната граница на допустимото. Такова натоварване обаче има само в „час пик“ сутрин и вечер. В останалата част от времето, през което се движат влаковете (които са много по-малко на брой) товарът е малък и напрежението остава високо. В момента няма възможност за намаляване на напрежението на страна 10 kV на трансформаторите, защото янсените регулатори са поставени на най-ниската степен.

Извода е, че рекуперативния режим на спиране ще бъде трудно осъществим. Това е така, защото за да има рекуперация, трябва напрежението генерирано от ЕТС  $U_{ТМг}$  да бъде по-високо от номиналното на тяговата мрежа. Напрежението в контактната релса е много високо, често и над горната граница. При такива стойности на напрежението режима на спиране с рекуперация е затруднен.

Има и други особености, които влияят отрицателно на рекуперативния режим, разгледани по-долу.

Влаковете, съставени от вагони модел 81-740.2/81-741.2 са с асинхронно тягово електрозадвижване, захранвано чрез инвертори, изградени с IGB транзистори, които реализират векторно управление на двигателите и им позволяват да работят в режим на рекуперативно спиране [4]. Тава се случва, когато тяхната честота на въртене  $\omega$  стане по-висока от синхронната  $\omega_0$  [3]:

$$(2) \quad \omega > \omega_0$$

Синхронната честота  $\omega_0$  се намалява, като се намали честотата на захранващото напрежение от честотния преобразувател (намаляване на скоростта на движение). Тогава се изпълнява условие (2) и тяговият двигател преминава в генераторен режим.

Това обаче става при спазване на оптималния закон на управление:

$$(3) \quad \frac{U_n}{f_n} = \frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \dots = const$$

От което следва, че се понижава и напрежението на тяговият двигател работещ като генератор. Т.е. мотрисата се движи с висока скорост, която обаче е ограничавана от различни условия (спиране до 0км на станция, терен, предавки, максимална скорост на въртене на тяговите двигатели и др.).

Токоизправителите на ТА са диодни мостови неуправляеми свързани по схема ”Ларионов”. Те не позволяват работа в инверторен режим, което означава, че не може да бъде върната енергията от рекуперация обратно в мрежата на високата страна на трансформатора. Това означава, че цялата произведена енергия от тяговите двигатели в режим на рекуперация трябва да се употреби или съхрани в DC мрежата. Вариантите не са много. Предвид размера и мястото, което биха заели високата цена и краткият живот, не е икономически оправдана инвестиция в устройства за акумулиране в мотрисите, суперкондензатори, както и акумулатори в ТПС. Остава варианта енергията да бъде оползотворена от мотрисите по трасето. Тука обаче е налице изискването мотрисата в рекуперативен режим и другите, които са в режим тяга да бъдат в един и същ участък. От графика за движение на влаковете се вижда, че това е възможно само в нотоварената част сутрин и вечер. В извънвърховия период в един участък може да няма дори и една мотриса, която да използва генерираната при рекуперация енергия. Тогава е възможно напрежението на контактната релса да се повиши много над допустимите стойности, което създава опасност от пробиви на изолацията.

Нормалната експлоатационна практика в метрополитена е ТТ да се държат постоянно включени, освен в периодите когато се налага изключване (профилактика или ремонти). Те черпят от електроразпределителната мрежа капацитивна енергия, която е необходима за намагнитването им (табл.2).

Таблица 2. Реактивна мощност за намагнитване на трансформаторите

Трансформатор	Sn, [kVA]	Io, [%]	$\Delta Q_{cr}$ , [kvar]
ТТ I линия	3000	8,84	<b>265</b>
ТТ II,IV линия	3000	6,3	<b>189</b>
ТТ III линия	4000	8,4	<b>336</b>

Реактивната капацитивна мощност за намагнитване на трансформаторите може да се изчисли по паспортните данни:

$$(4) \quad \Delta Q_{cr} = I_0 \frac{S_n}{100} , \text{ kvar}$$

Част от ТПС на метрополитена са с дълги захранващи линии 10kV от градските подстанции. По време на сервизният режим (през нощта) и в периодите с минимално натоварване се генерира капацитивна енергия, която се връща към електроразпределителната мрежа. За нея се заплаща надбавка и понеже количеството и е голямо се налага тя да бъде компенсирана. ТТ пряко компенсират част от капацитивната енергия, чийто количества имат изражението показано в табл.3.

Таблица 3. Количества компенсирана капацитивна енергия от един трансформатор

Трансформатор	Компенсирана КЕ, [kvarh/1h]	Компенсирана КЕ, [kvarh/6h]	Компенсирана КЕ, [kvarh/24h]
ТТ I линия	265	1590	6360
ТТ II, IV линия	189	1134	4536
ТТ III линия	336	2016	8064

### 3. Заключение

Тяговите агрегати използвани в електроснабдителната система на метрополитена не позволяват пълното оползотворяване на рекуперативната енергия генерирана от моторите в спиращ режим или при спускане по наклон. Причината е в неуправляемите токоизправители. Тяговите трансформатори затрудняват рекуперацията поддържайки много високо напрежение в мрежата. Поради режима им на работа частично компенсират генерираната капацитивна енергия. При последваща реконструкция би могло да се помисли за подмяна на тяговите агрегати с управляеми токоизправители и да се използват многопулсни схеми на изправяне, които са с по-добро енергетично поведение като цяло и дават реална възможност за повишаване на енергийната ефективност на ТЕС на метрополитена.

### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Наредба № 3 от 09 юни 2004 г. за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии, изм. и доп. ДВ бр. 108 от 19.12.2007 г.;
- [2] Щуров Н. И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта. Дисертация, Новосибирский государственный технический университет. 2003 г.;
- [3] Българанов Л., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електрозадвигване, София, 2009, стр. 281;
- [4] [4] Иван Петров, Георги Димитров, Тодор Лалев; Експериментално изследван на енергийната ефективност на метроваковете на Столичния метрополитен в реални експлоатационни условия–ТУ„София”VII научна кон. св.св. Константин и Елена, 2016г.;
- [5] [5] Томчева М., Изследване и анализ на параметрите на видовете токоизправителни схеми експлоатирани в токоизправителни станции, Механика транспорт комуникации т16, бр.3/2, 2018 г.
- [6]

## STUDY AND ANALYSIS OF THE TRACTION UNITS USED IN TRACTION POWER SUBSTATION OF THE SUBWAY AND UTILIZATION OF THE RECUPERATIVE ENERGY BY RETURNING IN NETS WITH LOW VOTAGE

**Emil Dodov**  
[edodov@abv.bg](mailto:edodov@abv.bg)

*Todor Kableshkov University of Transport*  
*Geo Milev 158 Str., Sofia 1574*  
**BULGARIA**

**Key words:** *Subway, traction transformer, rectifier*

**Abstract:** *The article analyses and focuses on schemes of traction units (TU) that are used in the traction power substations (TPSS) at first, second, third and forth line in Sofia subway. Operation modes are examined, and the different types of rectifiers are compared. The advantages of the multi-impulse schemes of rectifying are pointed out. Quality increase options for the power parameters of the electricity transmission grid are examined according to the accepted operation modes of TU. The recuperative braking and descent of the railcars, equipped with asynchronous traction motor with frequency control, are associated with returning the energy in the net. The possibility to utilize this energy is analyzed and recommendations on the replacement of the rectifiers of the TU are provided.*