

ПОДОБРЯВАНЕ НА КОНТРОЛА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ РЕЖИМНИ ПАРАМЕТРИ НА ТЯГОВАТА МРЕЖА НА ГРАДСКИЯ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТ

Тодор Лалев, Георги Димитров
tlalev@vtu.bg, dimitrov_gd@mail.bg

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

***Ключови думи:** Градски електрически транспорт, Защитни устройства за постояннотоково тягово електроснабдяване, Контрол на електрическите режимни параметри на тяговата мрежа.*

***Резюме:** Град София има най-развитата транспортна система за обществен градски електрически транспорт, включваща наземен (трамваи тролейбуси и електробуси) и подземен (метро) транспорт. За запазване на електрическите превозни средства е изградена тягова мрежа, включваща кабелни фидери и контактна мрежа, които работят при променливи режими на натоварване и метеорологични условия. Тяговата мрежа на наземния градски електрически транспорт се запазва от 24 стационарни токоизправителни станции /ТИС/, а тази на метрото – от 39 тягово-понизителните станции /ТПС/. 70% от ТИС и 15% от ТПС са с морално и физически остаряло защитно оборудване на постояннотоковите изводи. Все още и значителна част от тяговата мрежа на наземния градски електрически транспорт не е рехабилитирана през последните 35-40 години. Всичко това налага модернизация на защитите на тяговата мрежа в ТИС и ТПС, с цел подобряване контрола на режимните електрически параметри на кабелната и контактната мрежи и повишаване на експлоатационната им надеждност.*

В доклада е направен кратък анализ на състоянието на тяговата мрежа на градския електрически транспорт в град София. Анализирани са защитните и контролните функции на различни модели цифрови защитни устройства за постояннотокови /DC/ тягови мрежи Sitras на фирма Siemens, които са инсталирани в 7 ТИС на наземния градски електрически транспорт и 26 ТПС на метрополитена. На база проведените анализи е направена оценка на възможностите за подобряване контрола на режимните параметри и са формулирани съответни изводи и препоръки.

ВЪВЕДЕНИЕ

Масовият градски обществен транспорт в гр. София се извършва с автобуси, трамваи, тролейбуси и метровлакове. Делът на превозите извършвани с електрически превозни средства /ЕПС/ в общата транспортна задача на столицата е ~45% (~22,7% - трамваен и тролейбусен; ~12,8% - електробусен и ~9,5% - метро) [1], който се очаква в

следващите години да нараства за сметка на конвенционалния автобусен транспорт. Това изисква както изграждането на нова електрозахранваща инфраструктура, така и поддържане на високо ниво на експлоатационна надеждност на съществуващата тягова мрежа.

АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМА

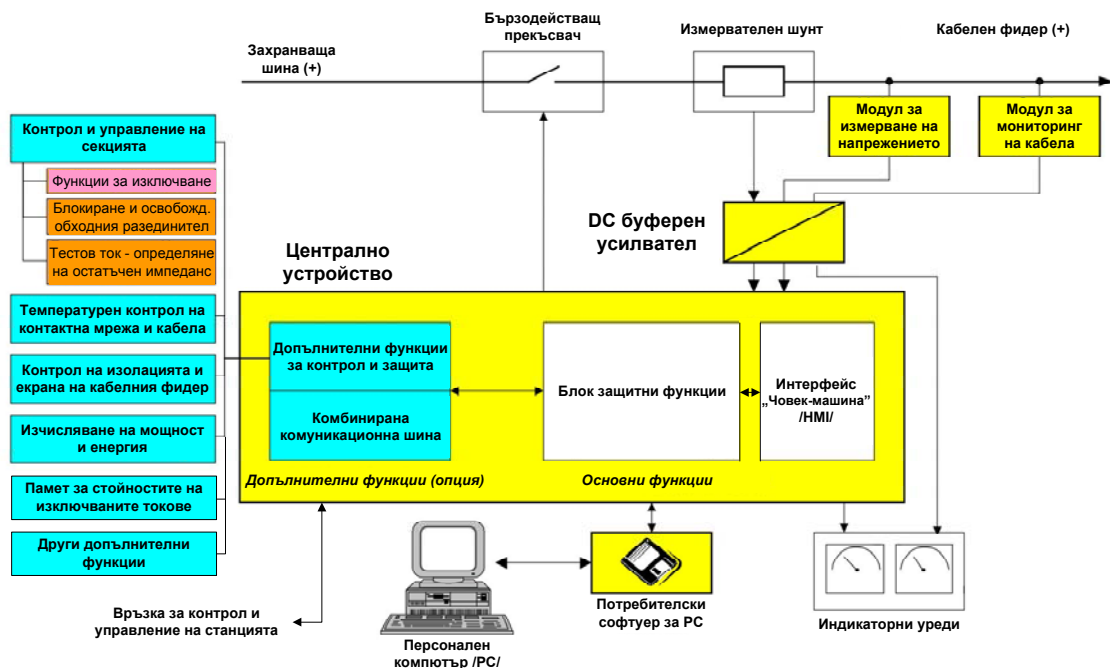
Тяговата мрежа на наземния градски електрически транспорт /НГЕТ/ се захранва от 24 токоизправителни станции /ТИС/, 7 от които, основно в периода 2010-2023 г., са модернизирани с цялостно оборудване на фирма Siemens. Тяговото електрозахранване на линиите на метрото се осъществява от 39 тягово-понизителните станции /ТПС/, от тях 26 също са изцяло с оборудване на Siemens. Независимо от непрекъснато изпълняваните проекти за рехабилитация на тяговата мрежа, все още значителна дължина от трамвайната и тролейбусната контактната мрежа /КМ/ е на границата на ресурса си, както и голям брой фидерни кабели, са в експлоатация повече от 40 години.

Всички тези особености на текущото състояние на тяговата захранваща мрежа на НГЕТ, изискват използването в тяговите захранващи станции на съвременни защитни устройства на постояннотоковите /DC/ изводи, с цел подобряване контрола на някои специфични режимни електрически параметри на контактната и кабелната мрежи.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ЗАЩИТНИТЕ И КОНТРОЛНИ ФУНКЦИИ НА ЦИФРОВИ ЗАЩИТНИ УСТРОЙСТВА ЗА DC ТЯГОВИ МРЕЖИ SITRAS

От 2000 г. при ново строителство, реконструкция и модернизация на ТИС и ТПС в гр. София преимуществено се използва оборудване на фирмата Siemens, включващо и цифрови защитни устройства на изводите за захранване на контактната мрежа. През годините са използвани три модела защитни устройства за DC тягови мрежи – **Sitras DPU96**, **Sitras PRO** и **Sitras MDC**, изградени на модулен принцип [2, 3, 4].

На фиг. 1 е показана блокова схема на системната конфигурация на защитните устройства **Sitras**.



Фиг. 1. Блокова схема на системната конфигурация защитни устройства Sitras

Съгласно действащите стандарти, всички защитни устройства за DC тягови мрежи трябва да задължително да осигуряват защита от късо съединение и токово претоварване, както и срещу минимално и максимално напрежение. В допълнение към задължителните защитни функции, цифровите DC защитните устройства **Sitras** притежават и редица допълнителни незадължителни такива, които могат да бъдат внедрени като последващи надстройки към тях, включващи допълнителен хардуер и съответна параметризация.

В таблица 1 е показано сравнение между основните защитните функции, включени в базовата конфигурация на DC защитните устройства **Sitras**, и техните допълнителните функции [2, 3, 4].

Таблица 1. Основни и допълнителни функции на различните модели защитни устройства Sitras

МОДЕЛ	Sitras DPU96	Sitras PRO	Sitras MDC
ФУНКЦИЯ			
<i>Защитни функции на базовата конфигурация на защитите</i>			
Максималнотокова защита (I_{max} , $I_{max\text{обр.}}$)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Защита от рязко нарастване на тока (ΔI)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Защита от скорост на нарастване на тока (di/dt) - стандартна	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Максималнотокова защита с времезакъснение (I_{DMT} , $I_{DMT\text{обр.}}$)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Минимално напреженова защита (U_{min})	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Максимално напреженова защита (U_{max})	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Контрол на напрежението на изводите към контактна мрежа	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Памет за събития, предупредителни съобщения и измервани стойности	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Функции изискващи допълнителен хардуер и/или параметризация</i>			
Разширена защита от скорост на нарастване на тока (di/dt adaptation)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Контрол на изолацията на кабелния фидер и за прекъсване на кабелния екран	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Изчисляване на мощността и енергията	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Съхраняване на изключвания ток от бързодействащия прекъсвач	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Изчисляване на остатъчното съпротивление на линията	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Защита от топлинно претоварване на кабелния фидер	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Защита от топлинно претоварване на контактния проводник	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Интегриран програмируем логически контролер (PLC) в централното устройство	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Честотен мониторинг (100 Hz) за хармоници в контактната мрежа	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

От показаните в таблица 1 данни се вижда, че в базовата си конфигурация различните модели (продуктови линии) цифрови защитни устройства **Sitras** притежават всички защитни функции според стандартите. Разлики между различните поколения защити има само в част от допълнителните функции, като развитието им през годините основно е в посока разработване на модулен дизайн, увеличаване обемите на паметта за измервани стойности и регистрирани събития, подобряване функционалността на интерфейса „Човек-машина /HMI/, нови комуникационни протоколи за местна и дистанционна комуникация със защитните устройства, както и разширяване функциите на потребителския софтуер.

Важна особеност на различните модели DC защитни устройства **Sitras** е, че съществува ограничена съвместимост между съответните модули на две последователно произвеждани във времето продуктови линии.

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ КОНТРОЛА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ РЕЖИМНИ ПАРАМЕТРИ НА ТЯГОВАТА МРЕЖА

За подобряване експлоатационната надеждност на тяговата мрежа на градския електрически транспорт е необходим непрекъснат контрол както на техническото ѝ състояние, така и на температурата на проводниците на КМ и кабелните жила, а също и на изолацията на фидерните кабели. Въз основа на направени проучвания беше установено, че защитите на изводите в ТПС са оборудвани и параметризирани за контрол на изолацията и температурата на фидерните кабели, а предвид използването на контактна релса или контактна шина, не е необходим температурен контрол за тях. По-долу са посочени още функции, които следва да бъдат прилагани за изводите на модернизирания ТИС, но поради различни технически причини към момента е невъзможно те да бъдат въведени.

1. Разширена защита от скорост на нарастване на тока (di/dt adaptation).

Тази защитна функция следи скоростта на нарастване на тока (di/dt), като непрекъснато променя стойността на I_{max} във функция на di/dt , за да се постигне по-фина настройка на импедансната защита и значително по-бързо изключване в случай на неизправност. Тя е особено удачна за прилагане при двустранно захранените секции на КМ, тъй като при далечни к.с., свръх токът се разделя между 2 или 3 захранващи фидера и може да не достигне бързо фиксираната прагова стойност I_{max} за задействане на максималнотоковата защита.

2. Контрол на изолацията на захранващите кабелни фидери.

Както вече беше посочено, голям брой фидерни кабели, захранващи контактната мрежа на наземния градски електрически транспорт, са в експлоатация повече от 40 години. За да се осигури експлоатационната им надеждност и да се планира бързата замяна на такива с остаряла изолация, е необходимо вътрешното им изолационно съпротивление (между (+) проводник и екран) и външната им изолация (между екран и (-) проводник или земя) да бъдат контролирани и оценявани отделно. Освен това, късите съединения между тоководещото жило и екрана, също трябва се установяват отделно, за да се изключи напрежението на кабела. За тази цел е необходимо в ТИС да бъдат инсталирани специализираните модули за мониторинг на фидерния кабел.

3. Температурен контрол на проводниците на контактната мрежа и захранващите кабелни фидери на наземния градски електрически транспорт.

По време на експлоатация, максимално допустимата работна температура на проводниците на въздушната контактна мрежа и фидерните кабели може да бъдат надвишени по време на режим на токово претоварване или к.с., без някоя от функциите за токова защитата да регистрира и изключи секцията на КМ. Поради тази причина е целесъобразно текущите работни температури на въздушно окачените проводници на контактната мрежа и фидерните кабели да бъдат контролирани непрекъснато.

Върху динамичното температурно състояние на въздушната контактна мрежа, освен непрекъснато изменящият се по стойност електрически ток, протичащ в проводниците, влияние оказват и метеорологичните фактори като температура на околната среда, интензивност на слънчевото греене, скорост и посока на вятъра. Влиянието на посочените метеорологични фактори се изразява в погълната топлина от слънчевата радиация, разсейваната от вятъра топлина чрез конвекция и разсейваната чрез излъчване топлина в резултат на разликата между температурата на проводника и температурата на околната среда.

При фидерните кабели, които са положени подземно в тръбни мрежи и колектори, интензивността на слънчевото греене и скоростта на вятъра не оказват влияние върху температурното им състояние. Единствено оказва влияние протичащият през тях електрически ток и разсейваната чрез излъчване топлина.

Съгласно предписанията на специализирания стандарт на IEEE [5], скоростта на изменение на температурата на въздушно окачен проводник може да се определи чрез уравнението на топлинния баланс в преходно състояние с използване на формулата:

$$(1) \quad \frac{dT_{c\ cat}}{dt} = \frac{I^2 \cdot R(T_{c\ cat}) - q_{cj} - q_{rj} + q_{sj}}{m_{cat} \cdot C_{pi}}, \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

където:

$T_{c\ cat}$ е текущата температура на проводника на контактната мрежа, $^\circ\text{C}$

I – протичащ през съответния проводник постоянен електрически ток, А;

$R(T_{c\ cat})$ – активно съпротивление за единица дължина на проводника, при температура $T_{c\ cat}$, Ω/m ;

$I^2 \cdot R(T_c)$ – генерирана в проводника топлинна мощност, при протичане на ток I , W/m ;

m_{cat} е масата за единица дължина на проводник на контактната мрежа, kg/m ;

C_{pi} – специфичен топлинен капацитет на i -тият материал, от който е изработен проводника, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ или $\text{W} \cdot \text{s}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

q_{cj} – разсейвана топлинна мощност чрез конвекция на j -тият тип проводник, W/m ;

q_{rj} – разсейвана топлинна мощност чрез излъчване на j -тият тип проводник, W/m ;

q_{sj} – генерирана в j -тият тип проводник топлинна мощност от слънчева радиация, W/m .

За кабелните фидери скоростта на изменение на температурата на токопроводящото им жило може да се определи по формулата:

$$(2) \quad \frac{dT_{c\ cab}}{dt} = \frac{I^2 \cdot R(T_{c\ cab}) - q_{rk}}{m_{cab} \cdot C_{pi}}, \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

където:

$T_{c\ cab}$ е текущата температура на тоководещото жило на кабелния фидер, $^\circ\text{C}$

m_{cab} – маса за единица дължина на тоководещото жило на кабелния фидер, kg/m ;

q_{rk} – разсейвана топлинна мощност чрез излъчване на k -тият тип кабел, W/m .

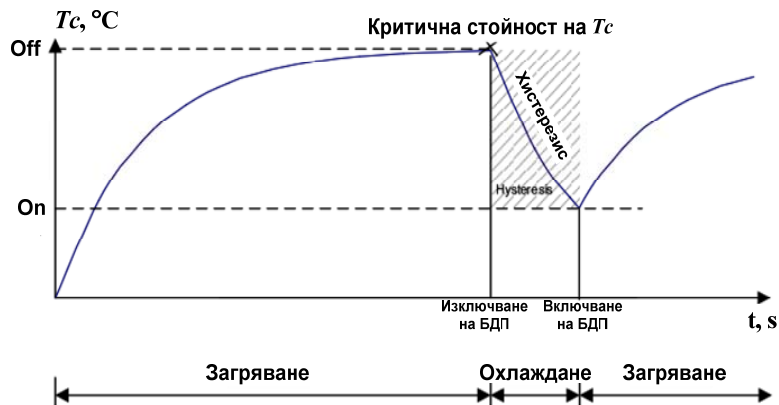
При защитните устройства **Sitras** температурата на проводниците и кабелите се изчислява от текущата стойности на тока I протичащ в тях, изчислената текуща температура T_c , физическите им параметри и температурата на околната среда. При защитните устройства **Sitras PRO** и **Sitras MDC** чрез външен сензор може текущо да се измерва и температурата на околната среда. На база на измерената околна температура, предварително зададени в защитата статични стойности за скорост на вятъра ($0,6 \div 1,0 \text{ m/s}$) и интензитет на слънчевото греене (900 W/m^2), както и с отчитане на изчислената текуща температура $T_{c\ cat}$ на съответния проводник на КМ, с помощта на вградения в защитните устройства топлинен модел и изчислителен алгоритъм се определя разсейваната топлина чрез конвекция $q_{c\ cat}$ и излъчване $q_{r\ cat}$. За кабелните фидери $q_{r\ cab}$ се определя според начина им на полагане.

Температурните изчисления за съответните проводници и кабели се извършват на всяка 1 s, като текущата им температура $T_{c(n)}$, $^\circ\text{C}$, се определя с формулите:

$$(3) \quad \Delta T_{c\ cat} = \frac{I^2 \cdot R(T_{c\ cat}) - q_{cj} - q_{rj} + q_{sj}}{m \cdot C_{pi}} \cdot \Delta t, \quad \Delta T_{c\ cab} = \frac{I^2 \cdot R(T_{c\ cab}) - q_{rk}}{m_{cab} \cdot C_{pi}} \cdot \Delta t,$$

$$T_{c\ cat(n)} = T_{c\ cat(n-1)} + \Delta T_{c\ cat}, \quad T_{c\ cab(n)} = T_{c\ cab(n-1)} + \Delta T_{c\ cab}$$

Критичната температура за проводниците на въздушната контактна мрежа се определят от приложените към тях сили за натягането им и степента им на износване, а за кабелите – от типа на тяхната изолация. При достигане на критична стойност на температурата за съответния тип контактен проводник или кабел, защитата подава команда за изключване на бързодействащия прекъсвач на извода (фиг. 2). Повторното включване на прекъсвача може да стане едва след охлаждане на проводника до определена температура (определя се по изчислителен път), като температурния хистерис се задава при параметризиране на защитната функция. Защитите позволяват също и подаването на сигнал при надвишаване на предварително зададена максимална работна температура.



Фиг. 2. Температурна характеристична крива при неизменна стойност на тока

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

Представеният анализ, позволяват да са направят следните основни изводи:

- Значителна част от тяговата мрежа на НГЕТ е амортизирана и изисква допълнителен контрол на специфични режимни параметри, както и на допълнителни защитни функции за бързо откриване и изключване на възникнали повреди.
- Модулните защитни устройства за DC тягови мрежи **Sitras** притежават необходимите допълнителни защитни и контролни функции, които могат да бъдат използвани за подобряване контрола на режимните параметри на тяговата мрежа.

За подобряване на защитата и контрола на тяговата мрежа, захранвана от модернизираният ТИС, могат да се направят следните препоръки:

- Да бъде включена и параметризирана разширената защита от скорост на нарастване на тока (**di/dt adaptation**) с цел по-прецизно откриване и изключване на възникнали к.с.;
- На всеки фидерен кабел да бъдат инсталирани специализираните модули за мониторинг на изолацията им;
- Защитните устройства на изводите, захранващи секции на контактната мрежа на НГЕТ с интензивно движение на ЕПС, да бъдат параметризирани за измерване текущата температура на фидерните кабели и проводниците на КМ.

За прилагане на направените препоръки е необходимо да се извърши подмяна на фидерните кабели с нарушена цялост на екраните, прецизно измерване на дължините на фидерните кабели, както и периодично измерване на относителното износване (в %) на контактните проводници на всяка секция с цел пренастройване на защитите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От средата на миналия век общественият градски електрически транспорт в София непрекъснато се развива, като през следващите 10 год. се очаква неговият дял в общата транспортна задача да надхвърли 80%. За сигурното и безотказното му функциониране е необходимо контролът и защитата на тяговата мрежа да позволява навременно откриване и предотвратяване на предпоставките за настъпване на аварии.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Икономическа рамка на обществения транспорт в Столична община за 2022 г. Приложение № 1 към Решение № 447 по Протокол № 58 от 23.06.2022 г. на СОС
- [2] Sitras DPU96 Digital Protective Unit and Controller (Version 2) - Operating instructions, Version 2.13. Siemens AG, Transportation Systems Group, 1998
- [3] Sitras PRO DC Protective Unit and Controller for DC Traction Power Supply - Operating instructions, Version 1.3.0. Mobility Division, Siemens AG, 2009
- [4] Sitras MDC DC Protective Unit and Controller for DC Traction Power Supply - Operating instructions, Version 1.0.1. Siemens Mobility GmbH, 2018
- [5] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE Std 738-2012/Cor 1-2013, Publisher: IEEE Xplore, 2013

IMPROVING THE CONTROL OF THE ELECTRICAL MODE PARAMETERS OF THE TRACTION NETWORK OF THE URBAN ELECTRIC TRANSPORT

Todor Lalev, Georgi Dimitrov
tlalev@vtu.bg, dimitrov_gd@mail.bg

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

Key words: *Urban electric transport, Protective unit for DC traction power supply, Control of electrical mode parameters of the traction network.*

Abstract: *Sofia-city has the most developed transport system for public urban electric transport, including ground (trams, trolleybuses, electric buses) and underground (subway) transport. To power the electric vehicles, a traction network has been built, including feeder cables and catenary, which work under variable load regimes and weather conditions. The traction network of the ground urban electric transport powered by 24 stationary rectifier substations /RSS/, and that of the subway - by 39 traction step-down substations /TSDS/. 70% of RSS and 15% of TSDS have morally and physically outdated protective equipment of the DC outputs. A significant part of the traction network of the ground urban electric transport has not yet been rehabilitated in the last 35-40 years. All this required modernization of the protection of the traction network in RSS and TSDS, in order to improve the control of the*

mode electrical parameters of the cable feeders and catenary and increasing their operational reliability.

In the report, a brief analysis of the state of the traction network of urban electric transport in the city of Sofia is made. The protection and control functions of different models of digital protection devices for direct current /DC/ traction networks Sitras of the company Siemens, which are installed in 6 RSS and 26 TSDS, have been analyzed. On the basis of the analyzes carried out, an assessment of the possibilities for improving the control of the regime parameters has been made and relevant conclusions and recommendations were formulated.