

АНАЛИЗ НА РАЗЛИЧНИ ПО КОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИЧНИ КОМПЕНСАТОРИ НА РЕАКТИВНА МОЩНОСТ, ИЗПОЛЗВАНИ В ТЯГОВИТЕ ПОДСТАНЦИИ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИЯ ТРАНСПОРТ В БЪЛГАРИЯ

Георги Димитров, Тодор Лалев

gdimitrov@vtu.bg tlalev@vtu.bg

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

Ключови думи: *Електрифициран железопътен транспорт, Тягови подстанции, Динамични компенсатори на реактивна мощност, Сравнителен анализ.*

Резюме: *Превози по националната железопътна инфраструктура на Република България се извършват с над 240 електрически локомотива и електрически моторни влака. Повече от 75% от тях са с постоянно-токово задвижване, захранвано през понижаващ трансформатор и неуправляеми или управляеми токоизправители. Този тип електрически подвижен състав, се явява значителен консуматор на реактивна мощност и емитира в тяговата мрежа висши хармоници на тока. От своя страна, въздушната контактна система 25 kV, 50 Hz на железопътния транспорт притежава значителна капацитивна проводимост и се явява генератор на реактивна капацитивна мощност. Всички тези особености изискват използването в тяговите подстанции на специализирани уредби за компенсиране на реактивна мощност, с цел подобряване качеството на тяговото електропотребление от енергийната система.*

В доклада е представен анализ на различни по конструкция и принцип на работа динамични компенсатори на реактивна мощност, инсталирани в тяговите подстанции на железопътния транспорт в България. На база енергийни измервания на различни типове локомотиви, е направена оценка на необходимата компенсираща реактивна мощност. Проведено е изследване за ефективността на компенсиране на реактивната мощност при различните модели компенсатори, инсталирани в някои характерни тягови подстанции. Резултатите са представени в табличен и графичен вид и са формулирани съответни изводи.

ВЪВЕДЕНИЕ

В Република България превозите с електрическа тяга се извършват от осем лицензирани железопътни превозвачи. Четири от тези превозвачи все още основно експлоатират променливотокови токоизправителни локомотиви, явяващи се значителен консуматор на реактивна мощност Q_L и емитиращи в тяговата мрежа висши хармоници на тока [1, 2, 3].

Специфична особеност на въздушната контактна система 25 kV, 50 Hz на железопътния транспорт е, че тя притежава значителна капацитивна проводимост и се явява генератор на реактивна капацитивна мощност Q_C . Според проведени изследвания у нас, публикувани в [4], стойността на генерираната капацитивна мощност, отнесена към единица дължина на контактната система е около 2,06 kvar/km при двупътни участъци, около 2,2 kvar/km при еднопътни, като достига до 3,0 kvar/km в еднопътни тунели. Следва да се отбележи, че при повишаване на напрежението в контактната система, тези стойности нарастват.

Всички тези особености водят до общо влошаване качеството на тягово електропотребление в железопътния транспорт, изискващо монтиране в тяговите подстанции на специализирани уредби за компенсиране на реактивната мощност.

АНАЛИЗ НА ЕНЕРГИЙНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЕКСПЛОАТИРАНИЯ ЖЕЛЕЗОПЪТЕН ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПОДВИЖЕН СЪСТАВ

Основен фактор за влошаване качеството на електропотребление от железопътния тягов електрически подвижен състав /ТЕПС/, по отношение фактора на мощност и хармоничните изкривявания, са масово експлоатираните у нас токоизправителни локомотиви с постоянно-токово тягово електрозадвижване.

В таблица 1 са показани данни за номиналната и реактивната мощност и средния фактор мощност на част от тяговия електрически железопътен подвижен състав, с различно тягово електрозадвижване, експлоатиран от железопътните превозвачи у нас.

Таблица 1

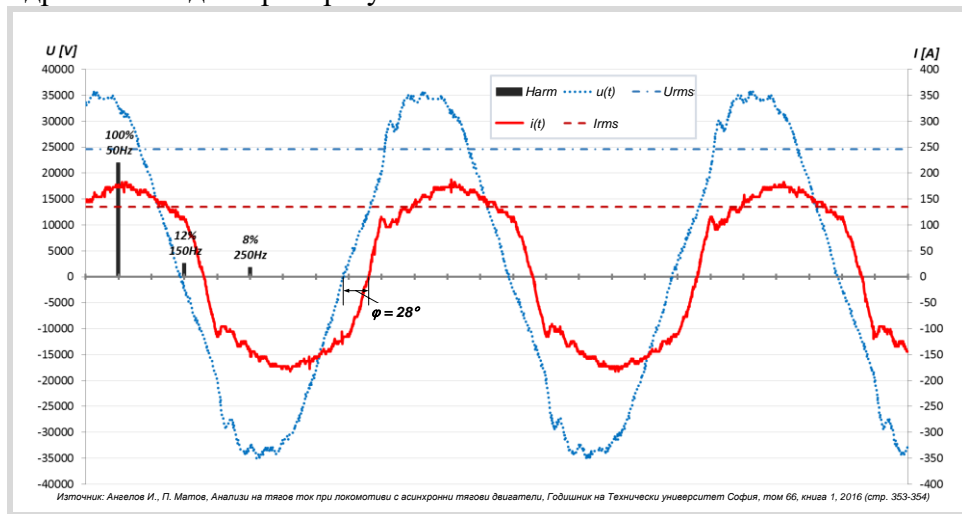
Номинална и реактивна мощност и среден фактор мощност на ТЕПС експлоатиран в България

Локомотив модел серия	Тягово задвижване	Начин на регулиране	Номинална първична мощност P_N	Реактивна мощност при 75% P_N	Ср. фактор на мощност при 75% P_N	Средно $TND_T\%$
			kW	kvar	-	%
Škoda серия 43	ПТД	Степенно Диодни ТИ	3420	1784	0,821	~17
Škoda серии 44,45	ПТД	Степенно Диодни ТИ	3450	1806	0,820	~17
Elektroputere серия 46	ПТД	Степенно Диодни ТИ	5680	3084	0,810	~18
Elektroputere серия 46-200	ПТД	Плавно Зоново-фазово	5650	3828	0,742	~32
Siemens EMB сер.30/31	АТД	Плавно 4Q + 3Ф инвертор	1450/1500	203/210	0,983	< 3
Siemens Vectron сер.80	АТД	Плавно 4Q + 3Ф инвертор	5600	657	0,988	< 3
Siemens Taurus сер.1116	АТД	Плавно 4Q + 3Ф инвертор	6800	1062	0,979	< 3
Siemens Smartron сер.80	АТД	Плавно 4Q + 3Ф инвертор	5800	651	0,989	< 3

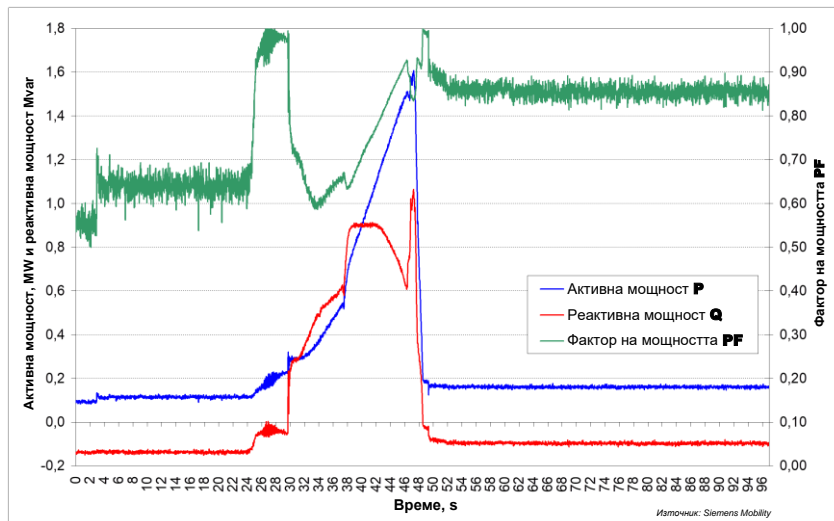
Забележка: ПТД – постоянно-токови тягови двигатели; АТД – асинхронни тягови двигатели; ТИ – токоизправители; 4Q – четириквандрантен входен преобразувател.

На фиг. 1 са показани осцилограми на напрежението и тока на локомотив със степенно регулиране на напрежението и диодни токоизправители, заснети на извод в тягова подстанция. На фиг. 2 са показани осцилограми на активната и реактивната мощности и фактора на мощност на токоизправителен локомотив с плавно зоново-

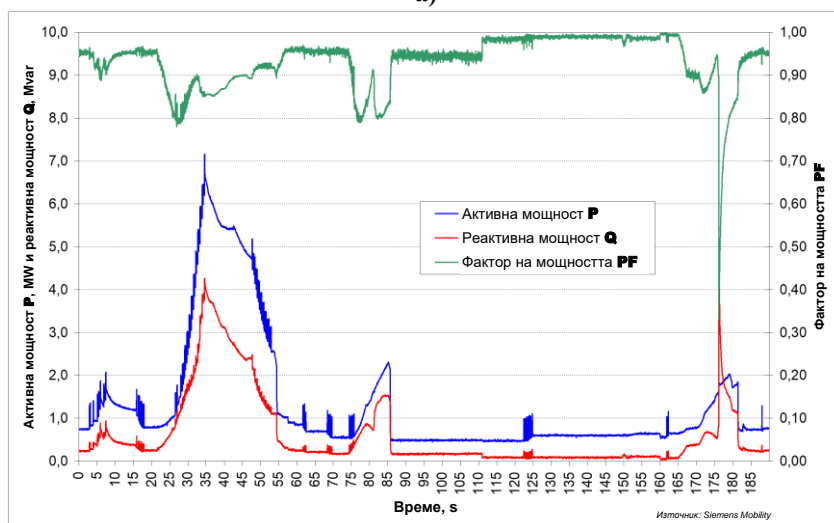
фазово регулиране и на локомотив с трифазни асинхронни тягови двигатели и четириквадрантен входен преобразувател.



Фиг. 1. Осцилограми на напрежението и тока на локомотив Škoda с диодни токоизправители



а)



б)

Фиг. 2. Осцилограми на активната и реактивната мощности и фактора на мощността на локомотиви с плавно регулиране
а) Локомотив серия 46-200; б) Локомотив Siemens Taurus серия 1116

От данните в таблица 1 може да се заключи, че товарен влак обслужван с два токоизправителни локомотива „Шкода”, всеки от тях работещ с първична мощност (мощност измерена на токоснемателя) около 2600 kW, ще консумират общо около 3500-3600 kvar реактивна индуктивна мощност. Изхождайки от изискванията на ДП „НКЖИ” за поддържане на среден 15 минутен фактор на мощността $PF_{ind}/0,95$ и минимален – 0,90, то необходимата минимална компенсираща реактивна мощност с капацитивен характер $Q_{C\ comp}$ може да се изчисли по формулата:

$$(1) \quad Q_{C\ comp} = \sum Q_{L\ loc} - K_{PF} \cdot \sum P_{loc}$$

където:

$Q_{L\ loc}$ е консумираната реактивна мощност от група локомотиви при реализиран фактор на мощност $PF_{ind} < 0,90$, kvar;

P_{loc} – консумирана активна мощност от група локомотиви, kW;

K_{PF} – корекционен коефициент на консумираната активната мощност ($K_{PF} = 0,49$ за $PF_{ind} = 0,90$ и $K_{PF} = 0,33$ за $PF_{ind} = 0,95$).

За разгледания случай необходимата компенсираща мощност, изчислена по формула (1), ще бъде около 1000 kvar за $PF_{ind} = 0,90$ и около 1700 kvar за $PF_{ind} = 0,95$.

АНАЛИЗ НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ ОТ „НКЖИ” КОНСТРУКЦИИ ДИНАМИЧНИ КОМПЕНСАТОРИ

От 2007 г. ДП „НКЖИ” започна инсталиране на компенсатори на реактивна мощност в тяговите подстанции /ТПс/ на железопътния транспорт, като до 2014 г. основно са използвани статични индуктивни компенсатори (реактори), оразмерени да компенсират генерираната от тяговата мрежа капацитивна мощност Q_C .

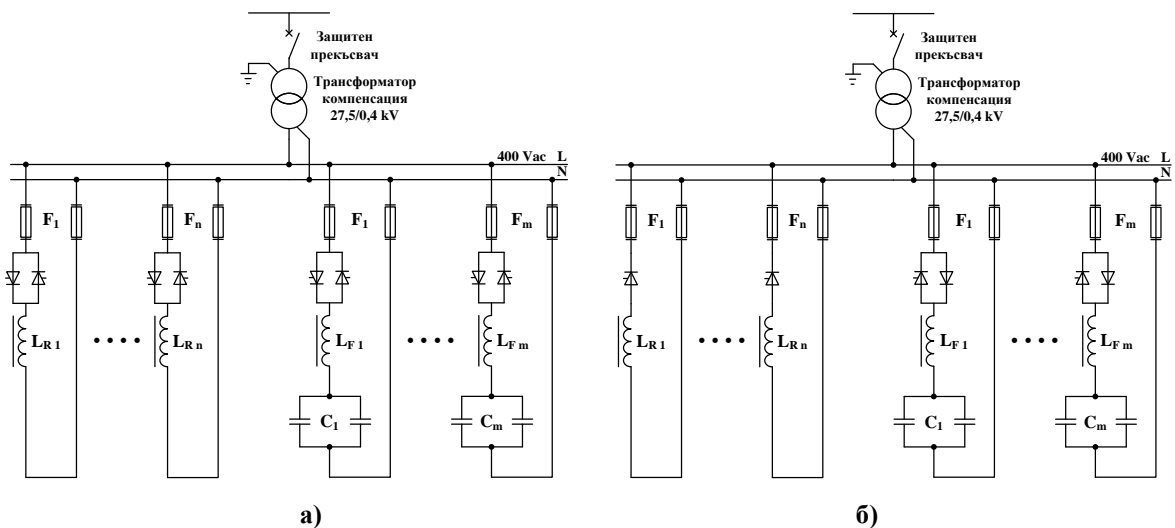
Съвременните конструктивни решения, които се използват за компенсиране на реактивната мощност в тяговата мрежа са следните:

- Динамичен комбиниран индуктивно-капацитивен компенсатор за Q_L и Q_C ;
- Активен динамичен компенсатор, използващ конвертор на напрежение, който позволява компенсиране на реактивните мощности и хармониците.

През 2014 г. ДП „НКЖИ” стартира програма за модернизиране на тяговите подстанции. Към 2021 г. от общо 54 броя ТПС на територията на железопътната инфраструктура, 19 бр. са напълно модернизирани с изцяло нови електрически уредби, в т.ч. и динамични компенсатори от двете конструкции, а в още 8 немодернизирани са монтирани динамични комбинирани индуктивно-капацитивни компенсатори. На фиг. 3 е посочен броя на различните конструкции компенсатори, инсталирани в ТПС у нас.



Фиг. 3. Брой на инсталираните в ТПС различни конструкции компенсатори



Фиг. 4. Схеми на динамични комбинирани индуктивно-капацитивни компенсатори
 а) Компенсатор модел Elspec EQUALIZER; б) Компенсатор модел PQM

В ТПС на ДП „НКЖИ” се използват два модела индуктивно-капацитивни компенсатори – **Elspec EQUALIZER** на фирма Elspec Ltd, Израел и **PQM** на фирма Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, Германия (фиг. 4). Чрез тиристорно регулираните реактори $L_{R1} \dots L_{Rn}$, групирани в отделни стъпала, се поддържа необходимата средна стойност на компенсиращата индуктивна мощност. Кондензаторните батерии /КБ/ също са обособени в отделни стъпала с определен капацитет $C_1 \dots C_n$, които се управляват индивидуално с помощта на тиристорни комутационни модули. Свързаните последователно във веригата на КБ филтърни реактори $L_{F1} \dots L_{Fn}$ служат за предотвратяване възникването на резонанс с мрежата чрез изместване на резонансната честота на кондензатора под първия доминиращ хармоник (обикновено 3^{-ти}). Използвайки специфични алгоритми за автоматично управление и бързо електронно превключване на стъпалата, общото време за пълна компенсация на реактивния ток се постига в рамките на $\frac{1}{4} \div 1$ период на напрежението, независимо от броя на стъпалата. Основната разлика между двата модела индуктивно-капацитивни компенсатори се състои в различните конструкции тиристорни комутационни модули.

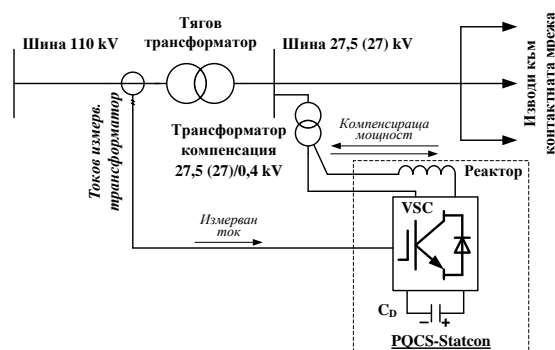
Важно е да се отбележи за тези конструкции компенсатори, че капацитетът на кондензаторите намалява с времето, следствие на което честотата на разстройване на реактор-кондензаторните филтри ще се промени и може да създаде условия за възникване на резонанс. Затова по време на експлоатация се изисква периодичната им проверка, като при установяване на отклонение повече от 10% е необходима смяна на кондензаторите.

Динамичните индуктивно-капацитивни компенсатори имат следните свойства:

- **динамично управление на индуктивната и капацитивната компенсация със средно време за реакция от около 13,2 ms (максимум 20 ms);**
- **изпълняват и функция на пасивен филтър за висши хармоници** (обичайно са настроени за филтриране на 3^{-ти} хармоник).

Друга конструкция компенсатори, използвана в тяговите подстанции у нас, са тези модел **PQCS-Statcon** на фирма АВВ, които са базирани на двупосочен конвертор на напрежение /VSC/ – фиг. 5. Последният представлява мостова схема, реализирана биполярни транзистори с изолиран гейт (IGBT). При входящо постоянно напрежение, формирано от кондензатора C_D , чрез широчинно-импулсна модулация на изхода на конвертора се генерира крива на напрежението, която съдържа желаните спектрални компоненти. Електрическото съпротивление на връзката, състоящо се от реактор,

преобразуват генерираното напрежение в компенсиращ ток, подаван към събирателната шина 27,5 (27) kV в тяговата подстанция. В зависимост от напрежението на кондензатора се осъществява двупосочен обмен на реактивна мощност между VSC и енергозахранващата система.



Фиг. 5. Структурна схема на активен динамичен компенсатор на реактивна мощност PQCS-Statcon на ABB

Тази конструкция компенсатори изпълнява и функциите на активен филтър на висши хармоници, като формира захранване към мрежата с амплитуда, обратна на тази на хармониците.

Всички системи за компенсиране на реактивната мощност в модернизирани и новоизградените тягови подстанции се изпълняват като динамични, съставени от отделни модулни шкафове (секции). Последното осигурява възможност за бъдещо увеличаване на компенсиращата им мощност чрез добавяне на съответните секции. Към момента инсталираните индуктивно-капацитивни компенсатори са обичайно с обща компенсиращата индуктивна мощност на реакторите 480÷520 kvar, а общата компенсиращата капацитивна мощност е 1800÷2400 kvar. Мощността на използваните активни динамични компенсатори PQCS-Statcon е ±1500 kvar – разделно се използват до 1500 kvar за индуктивна или капацитивна компенсация.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА КОМПЕНСАТОРИТЕ

Изследването върху ефективността на компенсиране на реактивната мощност е проведено за 6 тягови подстанции с монтирани в тях различни конструкции динамични компенсатори и различен режим на натоварване. В таблица 2 са показани обобщени данни от енергийните измервания [5], осреднени за зимните и летните месеци на 2019 и 2020 г., както и изчислените стойности за средно месечния фактор на мощност PF_{ind} .

Таблица 2

Средно месечно електропотребление на изследваните ТПС и реализиран среден фактор на мощност

Тягова подстанция	Модел динамичен компенсатор	Средно месечна измерена акт. енергия (110 kV)		Средно месечна измерена инд. енергия (110 kV)		Средно месечна измерена капац. енергия (110 kV)		Среден индукт. фактор на мощност	
		Зима	Лято	Зима	Лято	Зима	Лято	Зима	Лято
		Mvarh		Mvarh		Mvarh		PF _{ind}	
Волюяк	Elspec	1076,4	793,0	288,4	272,3	1,45	2,29	0,966	0,946
Мездра	PQCS-Statcon	584,3	509,6	129,5	119,0	0,65	0,75	0,976	0,974
Търговище	Elspec	272,3	292,1	134,4	142,5	1,15	0,72	0,897	0,899
Нова Загора	PQCS-Statcon	359,5	408,4	63,6	79,4	0,83	1,04	0,985	0,982
Димитровград	PQM	339,6	350,6	26,6	31,3	1,10	1,52	0,997	0,996
Симеоновград	PQM	277,1	266,9	30,0	29,8	0,99	1,57	0,994	0,994

В таблица 3 са показани данни за дължината и изчислената съгласно [4] капацитивна мощност на въздушната мрежа, захранвана от изследваните ТПС, и средно месечната некомпенсирана реактивна енергия на страна 110 kV на ТПС.

Таблица 3

Дължина и капацитивна мощност на въздушната мрежа, захранвана от изследваните ТПС, и средно месечна некомпенсирана капацитивна енергия

Тягова подстанция	Разгъната дължина въздушната мрежа	Изчислителна капац. мощност на въздушната мрежа	Изчислителна макс. месечна капац. е-я при работа на п.х. на въздушната мрежа	Средно месечна измерена капац. енергия (110 kV)		Среден относит. дял на некомп. капац. енергия	
				Зима	Лято	Зима	Лято
	km	kvar	Mvarh	Mvarh		%	
Волюяк	145	302	217,2	1,45	2,29	0,67	1,05
Мездра	94	198	142,2	0,65	0,75	0,46	0,53
Търговище	58	120	86,1	1,15	0,72	1,34	0,84
Нова Загора	51	112	80,5	0,83	1,04	1,03	1,29
Димитровград	64	141	101,4	1,10	1,52	1,08	1,50
Симеоновград	65	143	103,0	0,99	1,57	0,96	1,52

ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ПРОВЕДЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Получените обобщени резултати от проведеното изследване, показани в таблици 1, 2 и 3, позволяват да са направят следните основни изводи:

- Експлоатираните у нас локомотиви с диодни токоизправители, реализират среден фактор на мощност **~0,80** и **ТНД_I ~17-18%**. Най-лоши качествени показатели на електропотребление имат локомотивите с плавно зоново-фазово регулиране, при които средният фактор на мощност е **~0,74** и **ТНД_I е ~32%** (виж табл. 1).

- Средният индуктивен фактор на мощност за изследваните 6 ТПС се движи в границите от **0,897** до **0,997**, което покрива изискванията за качество на потреблението.

- Некомпенсираната капацитивна енергия се движи в границите **0,50÷1,50%**, от изчислителната капацитивна енергия на мрежата, което е допустимо за изискваната от ДП „НКЖИ” **99%** ефективност на компенсиране на капацитивната мощност.

- Като цяло динамичните компенсатори с активен филтър на висши хармоници модел **PQCS-Statcon** са относително скъпо решение, без да осигуряват съществено по-добри качествени ефекти. При един или два доминиращи хармоника, хармонично настроените капацитивни степени на компенсаторите модели **Elspec EQUALIZER** и **PQM** се явяват по-правилният технически и икономически избор, при който ефективно се минимизира реактивната енергия и се намалява общото хармонично изкривяване.

Наред с посочените изводи трябва да се отбележи, че по време на изследването бяха установени редица откази на единични модули (секции) и цялостно изключване на компенсиращи уредби. Към момента не е проведено детайлно изследване на причините за тези откази, но най-вероятно те се дължат на недостатъчно охлаждане на модулните шкафове при продължителна работа на максимална мощност и бъгове в управлението.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното изследване показва, че след инсталирането на динамични компенсатори на реактивната мощност в тяговите подстанции се наблюдава значително намаляване на реактивната енергия. За минимизиране на отказите е необходимо оптимизиране експлоатационния режим на работа и управлението на компенсиращите уредби, както и стриктно спазване на предписанията за текущо им поддържане.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Матов П., А. Вецков, , Разпределен капацитет на контактни мрежи за променлив ток, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, бр. 3, 2008 г. ISSN 1312-3823, статия № 0293
- [2] Павлов Г., М. Томчева, И. Търпов, Експериментално изследване на енергетичните параметри на модернизирани тиристорни локомотиви серия 46-200, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, том 12, бр. 1, 2014 г. ISSN 1312-3823, статия № 0929
- [3] Ангелов И., П. Матов, Анализи на тяговия ток при локомотиви с асинхронни тягови двигатели, Годишник на ТУ - София, Том 66, книга 1, 2016 г. ISSN 1311-0829
- [4] Матов П., Р. Кахърков, Разпределен капацитет на контактни мрежи за променлив ток, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, бр. 3, 2007 г. ISSN 1312-3823, статия № 0167
- [5] Данни за месечното електроенергийното потребление на тяговите подстанции за периода 2019-2020 г., Поделение „Електроразпределение” - ДП „НКЖИ”, 2021 г.

ANALYSIS OF DIFFERENT CONSTRUCTIONS OF DYNAMIC REACTIVE POWER COMPENSATORS, USED IN THE TRACTION SUBSTATIONS OF THE RAILWAY TRANSPORT IN BULGARIA

Georgi Dimitrov, Todor Lalev

gdimitrov@vtu.bg tlalev@vtu.bg

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

Key words: *Electrified railway transport, Traction substations, Dynamic reactive power compensators, Comparative analysis.*

Abstract: *Transport activities on the national railway infrastructure of the Republic of Bulgaria are carried out with over 240 electric locomotives and electric multiple-unit train trains /EMU/. More than 75% of them are with DC drives, fed through a step-down transformer and non-controlled or controlled rectifiers. This type of electric rolling stock is a significant consumer of reactive power and emits higher harmonics of the current in the traction network. On the other side the 25 kV, 50 Hz overhead contact system of railway transport has a significant capacitive conductivity, and is a generator of reactive capacitive power. All these features require the use in traction substations of specialized equipment to compensate for reactive power, with the aim of improving the quality of traction power consumption from the power system.*

The report presents an analysis of dynamic compensators of reactive power installed in the traction substations of the railway transport in Bulgaria, which differ in terms of construction and principle of operation. On the basis of energy measurements of different types of locomotives, an assessment of the necessary compensating reactive power has been made. A study was made on the effectiveness of reactive power compensation for different models of compensators installed in some typical traction substations. The results are presented in tabular and graphical form and appropriate conclusions are formulated.