

Изследване на енергетичните показатели и възможности за модернизация на електрически транспортни средства за променлив ток

Георги Павлов, Георги Димитров

Research on energetic indicators and possibilities for modernization of electric vehicles for AC power: *The main problem of the thyristor locomotives operated in the country are low values of power factor. The paper presents results of a survey of the quality of power consumption in this type locomotives. Based on the experimental data have been analyzed the main parameters characterizing the traction power consumption. Indicated are some general guidelines for optimization.*

Key words: *Electric locomotives with thyristor rectifier, Power factor, Reactive power compensator.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМА

Основното изискване към електрическите транспортни средства /ЕТС/ за променлив ток – локомотиви и електрически мотрисни влакове /ЕМВ/, експлоатирани в железопътния транспорт, е да реализират плавно регулиране на теглителната и спирачна сила с подходящи пусково-регулирущи устройства /ПРУ/, позволяващи поддържане на високи енергетични показатели, т. е. висок коефициент на мощност K_M , в целия работен диапазон. Коефициента на мощност при несинусоидални ток и напрежение се дефинира с формулите [1]:

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{P}{U_{eff} \cdot I_{eff}}, \text{ като при } U_{eff} \approx U_{(1)}, \quad K_M \approx \frac{P_{(1)}}{S} = \frac{U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)}}{U_{(1)} \cdot I_{eff}} = v_1 \cdot \cos \varphi_{(1)}, \quad (1)$$

където:

P и S са съответно общата активна мощност, W и общата привидна мощност, VA ;
 U_{eff} , I_{eff} – действителни ефективни стойности (True rms) на тока и напрежението;
 $U_{(1)}$, $I_{(1)}$, $\varphi_{(1)}$ и $P_{(1)}$, са съответно ефективните стойности на напрежението, V и тока, A на 1^{-ви} хармоник, ъгълът на дефазирание между тях и активната мощност, W пренасяна от основния хармоник;
 v_1 – коефициент на несинусоидалност на тока – $v_1 = I_{(1)} / I_{eff}$.

В железопътния транспорт у нас голям процент от експлоатираните ЕТС са с диодни и тиристорни ПРУ (токоизправители) и постояннотокови електродвигатели. Единствено електрическите мотрисни влакове „SIEMENS DESIRO Classic“ на Siemens са оборудвани с четириквadrантни преобразуватели с IGBT, които позволяват регулиране на коефициента на мощност, като същите се задвижват с асинхронни електродвигатели.

Основният проблем на всички ЕТС за променлив ток с постоянноотоково електрозадвижване, независимо от начина на регулиране на режимите на работа, са влошените им енергетични параметри. Увеличеното потребление на реактивна мощност и деформацията на формата на тяговия ток води до ниски стойности на коефициента на мощност. Всичко това е свързано и с формирането на допълнителни загуби в тяговата електроснабдителна система, а оттам и намаляване на ефективността ѝ.

Известно е, че парка на железопътния транспорт у нас е морално и физически остарял. Необходимо е спешно обновяване на част от парка на ЕТС, както и модернизация на определени транспортни средства чрез използване на преобразуватели с IGBT [5]. Разбира се за да се направи модернизация на едно транспортно средство, в него трябва да има достатъчен ресурс за експлоатация

след преустройството. Това е въпрос на една задълбочена предварителна оценка на техническото състояние на състава.

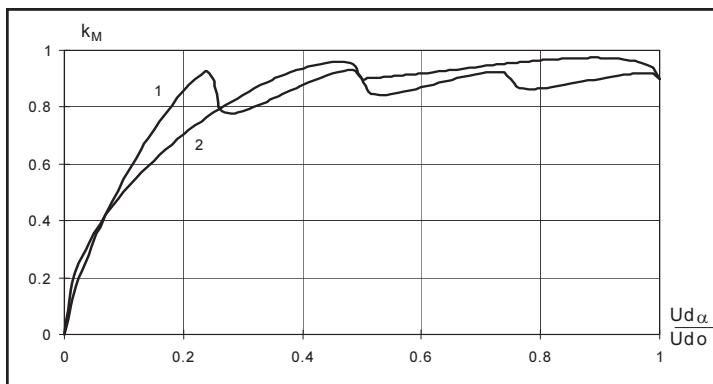
За ЕТС с диодни преобразуватели, експлоатирани в железопътния транспорт у нас (локомотиви серии 44 и 46), повишаването на k_M може да се постигне чрез преустройство на силовата схема на база използване на четириквadrантни преобразуватели и запазване на по-голямата част от съществуващото тягово електрообзавеждане. При локомотивите от серии 44-001 и 46-200, модернизирани с тиристорни токоизправители, този подход предполага тяхното премахване, което е нерентабилно от икономическа гледна точка. При тях по-доброто техническо решение е проектиране и вграждане на активен компенсатор на реактивна енергия свързан към вторичните намотки на тяговия трансформатор на локомотива.

В доклада са представени резултати от проведени експериментални измервания в реални експлоатационни условия, по-отношение на енергетичните показатели на локомотиви с тиристорни токоизправители. Предложени са техническите възможности за модернизация на този тип ЕТС, водещи до намаляване на разхода на реактивна енергия и повишаване на качеството на енергийно потребление.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕНЕРГЕТИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА МОДЕРНИЗИРАН ЛОКОМОТИВ СЕРИЯ 46-200

От 1998 г. до настоящия момент в завода „KONČAR – ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE“ d.d. Zagreb в Хърватия поетапно бяха модернизирани 13 локомотива от парка на БДЖ – 2 от серия 44 и 11 от серия 46 (означения след модернизацията 44-001 и 44-002, и серия 46-200) на базата на тиристорни изправители с естествена комутация и двузоново регулиране на напрежението. От енергетична гледна точка това техническо решение не е най-удачно и води до значително влошаване на качествените показатели на енергийно потребление.

Известни са редица технически възможности за подобряване на енергетичните параметри на ЕТС с тиристорни токоизправители, реализирани с еднооперационни тиристори. В практиката се използват основно две технически решения. Първото от тях е с използване на многозоново регулиране, като най-често се прилага такова с до четири зони, което дава сравнително добри резултати по отношение на k_M . Увеличаването на броя на зоните води до подобряване на енергетичните параметри (повишаване на k_M), но усложнява конструкцията на тяговия трансформатор и поради това се избягва. Второто техническо решение по отношение на повишаването на k_M е свързано с използването на изкуствена комутация в тиристорните изправители. Чрез неговото прилагане значително се подобряват енергетичните параметри на ЕТС.



Фиг. 1. Изменение на коефициента на мощност при четиризоново регулиране с естествена комутация и двузоново регулиране с изкуствена комутация

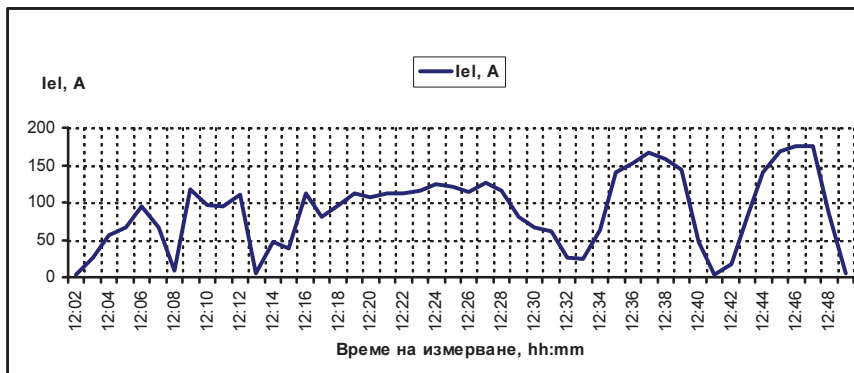
На фиг. 1 са показани зависимостите за $k_M = f(U_{d\alpha} / U_{d0})$ при четиризоново регулиране с естествена комутация (крива 1) и двузоново регулиране с изкуствена комутация (крива 2). Тук $U_{d\alpha}$ и U_{d0} са съответно текущата ефективна стойност на изправеното напрежение на изхода на токоизправителя и неговата пълна стойност при напълно отпушени на тиристори.

Забелязва се, че в диапазона $U_{d\alpha} / U_{d0} = 0,25 \div 1$, който е и основния диапазон на регулиране на напрежението, крива 2 лежи над крива 1. От това може да се направи извода, че при двузоновото регулиране с изкуствена комутация се получават по-добри резултати в енергетично отношение в сравнение с тези при многозоновото регулиране без изкуствена комутация [4, 5].

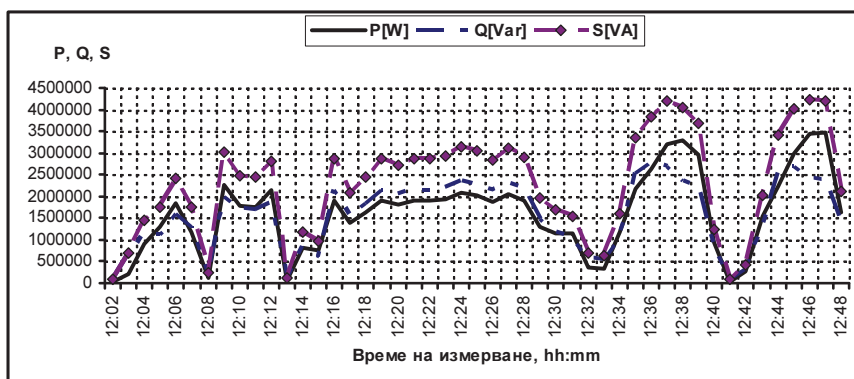
С цел изследване и анализ на енергетичните параметри на модернизирани ЕТС от парка на БДЖ, бяха проведени експериментални измервания на влакови състави теглени от локомотиви серия 46-200 в предварително избрани за целта тягови подстанции и захранващи фидери. Измерванията са извършени с микропроцесорна измервателна апаратура – мрежови анализатори тип МС 750 и UMG 604E. Използваните анализатори измерват моментните стойности на напрежението и тока и въз основа на тях изчисляват техните действителни ефективни стойности, електрическата мощност (активна, реактивна и привидна), фактора на мощност и се извършва хармоничен анализ на кривите на тяговия ток и напрежение в контактната мрежа [2]. Избраният при измерванията интеграционен период е 1 минута, като всички посочени величини се записват във вградената памет на уредите. Свързването на анализаторите към тяговата електрическа верига е направено през токови трансформатори 800/5 А и напреженови трансформатори 35000/100 V.

Представени са резултатите от измерванията, проведени в ТПС «Илиянци», на влак теглен от модернизирани локомотив серия 46-200 с номинална тягова мощност 5400 kW. По време на измерванията в участъка се движи само този влак. Въз основа на получените експериментални данни са определени основните енергетични показатели на изследвания тип локомотив.

На фиг. 2 е показано изменението на тяговия ток I_{el} , А на локомотива за определен часови период на времепътване – от 12:00 до 12:50 ч. За анализ е избран такъв времеви интервал, в който изследвания влаков състав е реализирал всички основни режими на движение – ускоряване по определен алгоритъм на управление, движение с установена скорост и реализиране на електродинамично резисторно спиране.



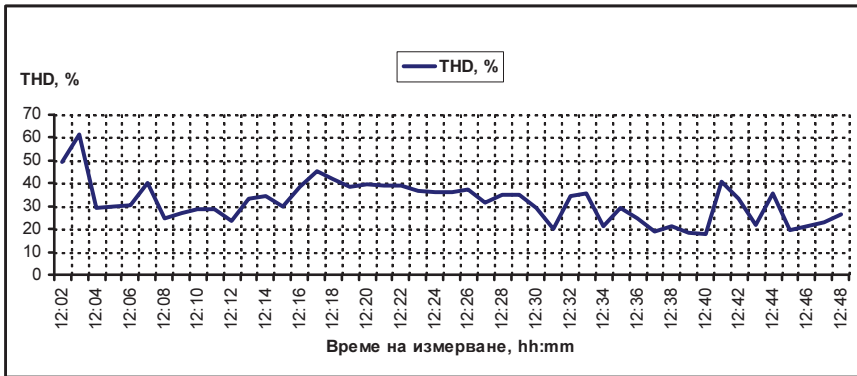
Фиг. 2. Диаграма на изменение на тяговия ток на локомотива



Фиг. 3. Диаграма на изменение на активната, реактивната и привидната мощност на локомотива

На фиг. 3 е показано изменението на активната – P , W , реактивната – Q , Var и привидната – S , VA мощност на състава. Наблюдава се значителното потребление на реактивна мощност с индуктивен характер, като тя е съизмерима по стойност с потребяваната активна мощност. В рамките на изследвания интервал от време влаковия състав е реализирал няколко пускови процеса, като при всеки от тях е използван различен алгоритъм за управление от страна на машиниста. При всеки един от тях за забелязва, че съотношението между реактивната и активната мощност се променя, като в интервала от 12:16 до 12:30 ч. тя има по-високи стойности от активната. От графиките на фиг. 2 и 3 може да бъде направен извода, че текущите стойности на активната и реактивната мощност до голяма степен зависят от режимът на работа на ЕТС.

На фиг. 4 е показано в графичен вид изменението на показателя THD_i , % (обща хармонични изкривявания) на тяговия ток, измерван на извода 27,5 kV на тяговата подстанция. Този показател характеризира деформацията на кривата на тока и наличието на висши хармоници в процентно отношение от ефективната стойност на тока на първия хармоник $I_{(1)}$.

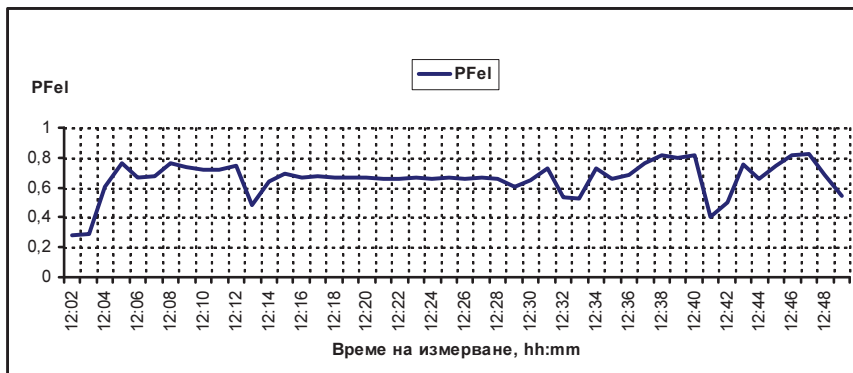


Фиг. 4. Диаграма на изменение на коефициента на хармонични изкривявания на тяговия ток

За изследвания интервал от време стойността на THD_i , % се изменя в широки граници – от 20% до 60%, в зависимост от режима на движение на влаковия състав и текущата стойност на мощността. С използването на изчислителния апарат в [6] по формула (2) е определено и изменението на коефициента на несинусоидалност на тяговия ток – v_i , който от своя страна има стойности от 0,858 до 0,98.

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_i\%}{100}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sum_{i=2}^{\infty} I_{(i)}^2}{I_{(1)}^2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{I_{eff}^2}{I_{(1)}^2}}} = \frac{I_{(1)}}{I_{eff}} \quad (2)$$

Отделно е проведено изследване и върху изменението на фактора на мощност PF_{el} , като резултатите са показани на фиг. 5. Поради ниското съдържание на висши хармоници в напрежението ($THD_U\% < 10\%$), измерваният фактор на мощност PF_{el} според [6] почти напълно се припокрива с коефициента на мощност k_M , т.е. $PF_{el} \approx k_M$. От диаграмата се вижда, че в почти целия период на измерване той има стойности по-ниски от 0,80. В интервала на движение на състава от 12:19 до 12:22 ч., характерен със сравнително установен режим на енергийно потребление, средната стойност на PF_{el} е около 0,67. Чрез по-детайлен анализ на данните от измерванията са определени и стойностите на параметрите $\cos \varphi_{(1)} = 0,72$ и коефициента на несинусоидалност на тяговия ток $v_i = 0,93$. От получените стойности може да се направи извода, че върху ниската стойност на k_M много съществено влияние оказва потреблението на реактивна мощност. Следва да се отбележи също така, че при разгледаният режим на движение, текущата мощността на локомотива е била около 36% от номиналната. През интервалите от време от 12:37 до 12:39 и от 12:45 до 12:47, когато локомотивът е работил с мощност над 60% от номиналната тези параметри имат стойности $\cos \varphi_{(1)} \approx 0,81$ и $v_i \approx 0,98$, а факторът на мощност PF_{el} , респ. k_M , има стойност 0,80-0,81. Последното показва, че с увеличаване на мощността значително се подобряват енергетичните показатели на тези ЕТС. Такъв продължителен режим на движение в реални експлоатационни условия обаче е трудно да бъде реализиран.



Фиг. 5. Диаграма на изменение на фактора на мощност на локомотива

По време на провеждане на изследванията са направени множество измервания на локомотиви от сериите 44-001 и 46-200. Установено е, че при отделните измервания върху различни влакови състави съотношенията между мощностите при идентични режими на движение не се различават значително по форма и големина. Получените резултати напълно се припокриват с тези, получени при сродни измервания по други изследователски задачи [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведените подробни измервания за качеството на електропотребление при модернизирания електрически локомотиви от сериите 44-001 и 46-200 в редица подстанции показват незадоволителни резултати по отношение на техните енергетични параметри. В реални експлоатационни условия фактора на мощност PF_{el} се колебае в границите $0,60 \pm 0,82$ и е значително по-нисък от дефинираните европейски норми в това отношение. От графиките на фиг. 3 се вижда, че при различните режими на движение консумираната от локомотива реактивна мощност е значителна по стойност, което е и основната причина за влошения коефициент на мощност.

За подобряване на енергетичните параметри и качеството на потребяваната от състава енергия е необходимо разработване на ново иновативно техническо решение по посока на тяхната модернизация, а именно проектиране на активен компенсатор на реактивна мощност /АКРМ/, които да бъде свързан към вторичните тягови намотки на локомотивния трансформатор. Чрез него до голяма степен ще се реши основният проблеми при експлоатация на тези ЕТС, свързан с потреблението на значителна реактивна мощност от тяговата мрежа, като по този начин ще се повиши и енергийната ефективност на специализираната железопътна електроснабдителна система.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ганов М., Електрообзавеждане на електрически транспортни средства, София, 1990.
- [2] Димитров Г., Г. Павлов, Специализиран модулен измервателен стенд за изследване на електроенергийното потребление и енергийната ефективност в транспорта, XX Международна научна конференция „Транспорт 2011“, София, сп. „Механика, Транспорт, Комуникации“, бр. 3/2011.

[3] Матов П., А. Вецков, Коефициент на полезно действие на тяговата мрежа за променлив ток в еднопътен участък, XVIII Международна научна конференция „Транспорт 2008“, София, сп. „Механика, Транспорт, Комуникации“, бр. 3/2008.

[4] Павлов Г., Дисертация „Изследване на преобразуватели с изкуствена комутация в електрически подвижен състав с неавтономно захранване“, ТУ София, 2001.

[5] Павлов Г., Повишаване на енергетичните параметри на електрическите транспортни средства чрез използване на входни импулсни токоизправители, Семинар „Електроенергетика и електрообзавеждане на транспорта“, Сборник доклади, стр. 23-28, Национално дружество на електроинженерите в транспорта в Република България, 2002.

[6] W. Mack Grady, R. J. Gilleskie, Harmonics and How They Relate to Power Factor, Proc. Of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA '93), San Diego, CA, November 1993.

За контакти:

Доц. д-р инж. Георги Павлов, ръководител катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта“, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“, тел.: 02 9709 348, e-mail: g_pavlov61@abv.bg

Гл. ас. инж. Георги Димитров, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта“, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“, тел.: 02 9709 471, e-mail: dimitrov_gd@mail.bg

Докладът е рецензиран.