

## **ЕФЕКТИВНОСТ НА РЕКУПЕРАТИВНОТО СПИРАНЕ**

**Георги Павлов, Илко Търпов**

[eet@vtu.bg](mailto:eet@vtu.bg)

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”*

*1574 София, ул. „Гео Милев № 158,*

*БЪЛГАРИЯ*

*Ключови думи: Рекулперация, ефективност, БДЖ, тягов подвижен състав.*

*Резюме: Внедряването и използването на рекулперативното спиране в транспортните средства подобрява тяхната ефективност, както по отношение на енергийните разходи, така и по отношение на ремонт и поддръжка. Понижава нивата на прах и шум. В настоящия доклад ще бъдат разгледани и анализирани стойностите на върнатата енергия и ще се дадат предложения за нейното използване и увеличаване.*

### **УВОД**

Рекулперативното спиране, като вид електрическо спиране се осъществява благодарение на обратимостта на електрическите машини. Натрупаната кинетична енергия в състава по време на ускоряване и потенциалната при спускане се преобразува в електрическа при спиране. Тази енергия върната в контактната мрежа или съхранена в акумулаторни батерии, наричаме рекулперативна. Рекулперативното спиране се определя и като екологично, поради регенерирането на енергията, намалената прах и шум на пътя от спиращите калодки и понижените нива на шум, иначе предизвикан от конвенционалната спираща система. Като основно предимство на електрическите спиращки се изтъква тяхната възможност да регулират плавно скоростта на движение на влака и осигуряването на допълнителна сигурност за спиращия процес поради дублирането ѝ с основната пневматична спираща система. За разлика от резисторното спиране, при което получената електрическата енергия от тяговите двигатели, работещ в режим на генератор се превръща в топлина от спиращи съпротивления, рекулперативното спиране отдава енергията обратно в мрежата. Намалените експлоатационни разходи, подобрената езда и регенерирането на част от използваната енергия за движение, определят рекулперацията, като технологичен процес за подобряване на енергийната ефективност на тяговия подвижен състав. Значителен ефект от този вид спиране може да се наблюдава при продължителни стръмни спускания или в участъци с голям брой спирки. Размера на върнатата енергия в мрежата, според някои автори [2], може да достигне до 30% от консумираната такава в зависимост от стила на управление на транспортното средство.

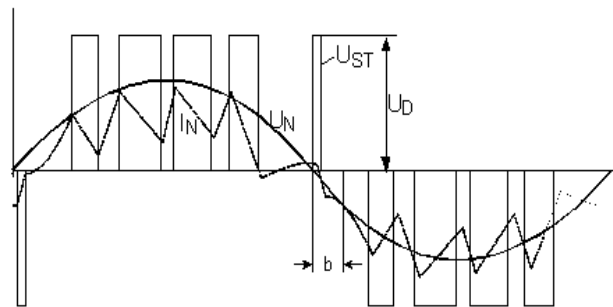
## СЪЩИНСКА ЧАСТ

В БДЖ се експлоатират електрически мотрисни влакове „Дезиро” на фирмата „SIMENS”, които успешно реализират рекуперативно спиране.

Електрическата спирачка е интегрирана в тяговата уредба. Тя се управлява с лоста "движение/спиране" чрез блока за управление на спирачката.

Формата на реалния ток в тягов режим е показана на фиг.1, където  $U_N$  - вид на реалното напрежение;  $I_N$  - вид на реалния ток.

Чрез превключване на фазовите елементи става възможно върху трансформатора да се получи напрежение, което се състои от напреженови импулси с избираема продължителност, интервал и поляритет. Ако се превключва с честота, съществено по-голяма от мрежовата, може чрез последователни приближения да се възпроизведе напрежението на контактната мрежа. Колкото по-висока трябва да е моментната стойност на възпроизведеното напрежение, толкова по-широки са импулсите.

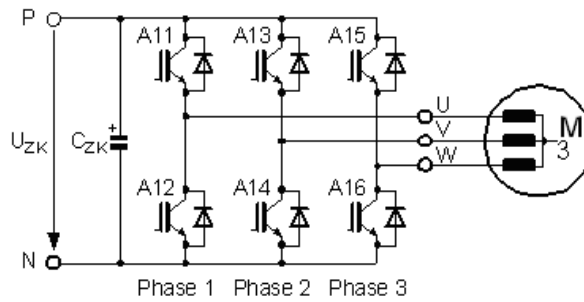


Фиг. 1

Чрез управление на IGBT елементите се създава показаната форма на напрежение (фиг. 1) на токоизправителя. Когато това напрежение е по-малко от синусоидалното мрежово напрежение, токът в трансформатора се увеличава, а ако то е по-голямо - токът намалява. Ако първия хармоник на импулсното напрежение съвпада по фаза с мрежовото напрежение, ток с мрежово честота не тече. Съществува само високочестотна съставна на паразитния ток. За да се предава активна мощност чрез токоизправителя в обратна посока, е необходимо да се измества фазата на импулсното напрежение.

Освен импулсен токоизправител, преобразувателя се нарича още четириквadranten, защото може да пропуска ток, който да е дефазирен на произволен ъгъл от напрежението, т. е. да прехвърля активна енергия от трансформатора към постояннотоковата междинна верига в тягов режим и обратно в режим на рекуперация, а също и произволна реактивна енергия – индуктивна или капацитивна. Принципната схема на автономен инвертор и преобразуването на импулсното напрежение в променливо трифазно е показано на фигура 2. Същата схема се използва и в режим на рекуперативно спиране.

Служебно спиране се задейства от машиниста на мотрисния влак посредством лоста „движение/спиране”. Спирането се осъществява преимуществено чрез електрическата спирачка с цел да се сведе до минимум износването на накладките в процеса на спиране. Едва когато спирачната сила не е достатъчна за постигане на желаното спиране, се активира допълнително пневматичната спирачка.



Фиг. 2

При нормално движение спирачната уредба се управлява електропневматично от собствен блок за управление на спирачката, в зависимост от товара. Когато спирачната сила на електродинамичната спирачка се окаже недостатъчна или когато едната или двете тягови уредби не са в готовност за работа, недостигащата спирачна сила се допълва от пневматичната спирачка. За да може при отпадане на електрическата спирачка по време на въведено спиране, възможно най-бързо да се извърши превключване на пневматичната спирачка, без това да предизвика тласъци, при всяко спиране предварително се задава спирачното налягане, необходимо за компенсиране на електродинамичната спирачна сила [1].

Размера на върнатата енергия при спускате по наклон -  $E_{рк}$  се изразява чрез формула 1:

$$(1) \quad E_{рк} = K_u \cdot U_{рк} \cdot \eta_{рк} \cdot (w_i - w_o - w_R) \cdot T_{спу}$$

където:

$K_u$  - коефициент на използваемост на рекуперативната енергия;

$U_{рк}$  - частта от спирачната сила от рекуперация през целия процес на спиране;

$\eta_{рк}$  - среден коефициент на полезно действие на рекуперацията;

$T_{спу}$  - товаропоток при спускане

$w_i, w_o, w_R$  - съпротивление на движение при наклон, основно съпротивление и съпротивление от криви.

След намиране на размера на рекуперативната енергия можем да определим нейното влияние върху общия разход чрез формула 2:

$$(2) \quad E_{об} = E_{ов} + E_{сн} - E_{рк}$$

където:

$E_{об}$  - общ разход на енергия;

$E_{ов}$  - разход за движение;

$E_{сн}$  - разход за собствени нужди;

$E_{рк}$  - енергия от рекуперация.

За да се получи реална представа за разхода на енергия при състави, оборудвани със спирачна система за рекуперирание е необходимо да се използва специфичния разход на енергия-  $E_{сп}$ , който отразява употребената енергия за определен обем извършена работа.

$$(3) \quad E_{ен} = \frac{E_{об}}{Q \cdot S}, \text{ W/t km}$$

където:

$Q$  - масата на състава;

$S$  - пропътувани километри.

Определянето на ефективността на рекуперативното спиране става чрез коефициента  $K_{рк}$ .

$$(4) \quad K_{рк} = \frac{E_{рк}}{E_{об}},$$

В планински участъци  $K_{рк}$  може да достигне до 10-20 %, ако използваемостта на върнатата енергия е висока и ако товаропотока на спускане е по-голям от този на изкачване.

При спиране с рекуперация ефективността се характеризира с отношението на върнатата енергия към пълната, необходима за спиране на състава. Тук коефициента може да достигне до  $K_{рк} \sim 0,49$  [2], но благодарение на загубите от порядъка на 40÷60% от цялата изразходвана енергия за рекуперация икономията на енергия достига до 15÷30% от общо изразходваната.

$$(5) \quad K_{рк} = \frac{V_n^2 - V_k^2}{V_n^2} \eta_{рк} \eta_l K_u,$$

където:

$V_n, V_k$  - начална и крайна скорост на рекуперативно спиране;

$\eta_{рк}, \eta_l$  - коефициент на полезно действие на рекуперацията и на локомотива.

Локомотивният машинист трябва да се стреми частта от спирачната сила от рекуперация -  $U_{рк}$  през целия процес на спиране да е по-голяма от общата при използване и на друг вид спирачки.

$$(6) \quad K_{рк} = \frac{T_2}{T_1} \frac{w_i - (w_0 + w_R)}{w_i + w_0 + w_R} \eta_{рк} \eta_l K_u U_{рк}, [2]$$

където:

$T_1, T_2$  - годишни товаропотоци в двете посоки;

$w_i$  - относително съпротивление на движение от наклона;

$w_R$  - съпротивление от крива;

$w_0$  - основно съпротивление на движение.

Това показва, че рекуперацията е по-ефективна при спиране отколкото при спускане в надолнище или поддържане на максимално допустима скорост на движение.

За нуждите на анализа на ефективността на рекуперацията в държавния железопътен транспорт бе проведено измерване на използваната и регенерирана енергии в период на две години. Данните са отчетени от електромери ЛЕМ монтирани във всяко едно ЕМВ. Общо мотрисите са 25 бр., като 15 бр., серия 30-00 /тривагонни/ и 10 бр., серия 31-00 /четривагонни/. Резултатите са показани в таблиците по-долу [3].

**За 2010 г.**

Таблица 1

ЕМВ	Потребена енергия в kWh	Енергия от рекуперация в kWh	Изминато разстояние в km	Икономии в %	Маса на състава в t	Брой места	
						За сядане	Прави
30-00	9827510	1922921	1688741	19,56	133	190	143
31-00	9540453	2044247	1407681	21,42	155	254	184

За 2011 г.

Таблица 2

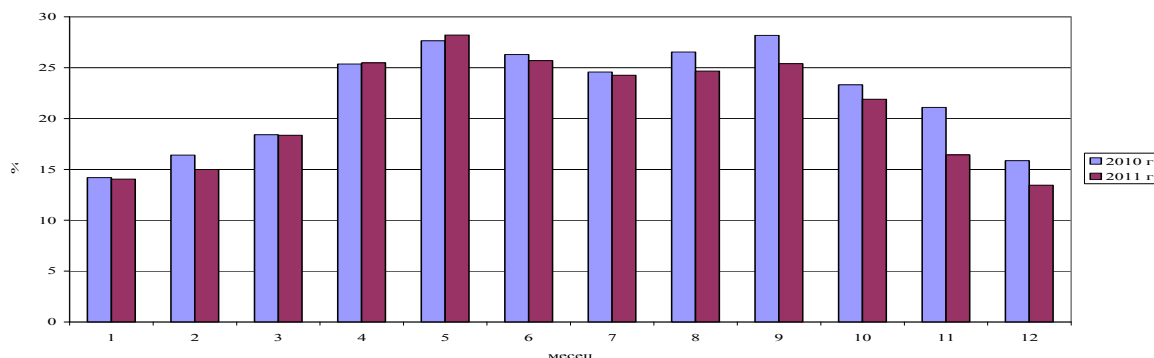
ЕМВ	Потребена енергия в kWh	Енергия от рекуперация в kWh	Изминато разстояние в km	Икономии в %	Маса на състава в t	Брой места	
						За сядане	Прави
30-00	11646019	2322405	1977044	19,94	133	190	143
31-00	95134444	1923323	1365711	20,21	155	254	184

Сравнявайки двете серии ЕМВ се констатира, че при 31-00 консумацията на енергия за километър е около 16% по-голяма от тази на 30-00. Също така рекупериранията енергия за изминат километър е с 21,58% по-голяма при 31-00. Тези разлики се дължат на по-голямата маса и завишените разходи за собствени нужди от допълнителния вагон.

През 2011 г. се забелязва завишен разход на енергия за километър с 1,18%, което представлява 75 Wh/km при една и съща работа. В същото време рекуперативната енергия е намаляла с 1,11%

На диаграма 1 е показано отношението в % на регенерирана енергия спрямо изразходваната и отразява влиянието на климатичните условия върху общия разход. През зимата той е по-голям от летния, поради покриването на по-големи температурни разлики от климатите в самото транспортно средство.

Енергията от рекуперация в % от общата консумирана за две години



Диаграма 1

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направения литературен обзор и извършените измервания може да се направят следните изводи:

- Достигнатите размери /4 GWh/ на върната енергия в мрежата за 1 година, представляват основание за разработване на ценова политика между превозвачи и инфраструктура;

- Съчетаване на влаковото движение във фидерните зони с подчертана експлоатация на ЕМВ “Дезиро” с цел оползотворяване на регенерираната енергия;

- Ефективността на ЕМВ се е понижила през 2011 г. в сравнение с предходната. Това може да се дължи, както на различните климатични условия, така и на удълженото време за паркиране с включен пантограф.

- Създаване на мотивация и информираност на персонала чрез обучение, кампании и конкурси със сигурност ще се възприеме добре в сравнение с въвеждане на контрол и оказване на натиск върху локомотивните машинисти.

Изследванията за определяне на рекуперативната енергия по повески и най-ефективното ѝ използване по участъци ще бъде разгледано в следващ доклад.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

[1] Техническо описание „Електрически моторен влак Siemens Desiro” СЕРИЯ 30/31 на „БДЖ” ЕАД.

[2] Българанов Л., Електрически транспорт, София 2004.

[3] Месечни справка за отчетената енергия на „Дезиро”, ППП София