



---

## ЗАПАСЯВАНЕ НА ЕНЕРГИЯ ПРИ ТРАНСПОРТНИТЕ СРЕДСТВА

**Петко Костадинов, Мартин Златков, Ирена Божичкова**  
[petko\\_kostadinov@abv.bg](mailto:petko_kostadinov@abv.bg), [dj\\_marti79@mail.bg](mailto:dj_marti79@mail.bg), [milenium26@abv.bg](mailto:milenium26@abv.bg)

**ВТУ „ТодорКаблешков”  
София, 1574, ул. "Гео Милев" 158  
БЪЛГАРИЯ**

**Ключови думи:** *електрически транспортни средства, акумулиране енергия, електропотребление, маховик, акумулатор, суперкондензатор, сгътен въздух, съд под високо налягане.*

**Резюме:** *В доклада е представена идея за за внедряване в електрически транспортни средства на съоръжение акумулиращо енергията от спирането така че, тя да бъде употребена при последващо потегляне. Упоменати са методите за акумулиране на енергия. Направен е енергиен и финансов сравнителен анализ между тях.*

### **Увод.**

При потегляне електрически транспортни средства консумират максимална мощност поради което напрежението в контактната мрежа може да спадне под минималнодопустимите стойности.

При спиране рекупериратите я отдават обратно в контактната мрежа от което могат да се получи превишаване над максимално допустимите стойности.

Целта е да бъде избегнато огромното електропотребление при потегляне изразяващо се в като огромна „гърбица” в началото на товарната графика докато транспортното средство се ускорява. След това при спиране транспортното средство да запаси енергия, която да бъде употребена при последващо потегляне. Така ще бъде реализирана „саморекулперация”.

### **1. Начини за акумулиране на енергия**

Метода за акумулиране на енергия в маховик е известен от древни времена. Поради простата му конструкция, лесната поддръжка, възможността за използване на запасената енергия в много кратък период от времето и евтина изработка ще направим някои примерни изчисления с цел изработване и вграждане на система за акумулиране на енергията по време на рекуперативно спиране което би довело до подобряване качеството на електрозахранването в контактната мрежа.



(фиг.1) Средства за акумулиране на енергия.Маховик, суперкондензатор, акумулатор, въздух под налягане.

## 2. Електрически магистрален локомотив.

При железопътните транспортни средства спиранията и тръгванията не са толкова чести както при градските транспортни средства. Въпреки това маховикът е приложим и е с допълнително приложение.

Освен за спиране и потегляне той може да подпомага кратки изкачвания. Също така може да бъде развъртан по време на престоя на гарата. В този случай е необходимо да се знае какво количество енергия е натрупана в композицията, като предположим, че същата тежи 1000 тона и се движи със скорост 70 км/ч (19.4 m/s).



(фиг.2) Примерен маховик на електрически магистрален локомотив.

$$(1) E_k = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 1000000 * 19.4^2 = 188180000 \approx 188 \text{ MJ} \approx 52 \text{ kW.h}$$

- където:  
 $-E_k$  – запасената енергия на композицията [ J ]  
 $-m$  – масата на композицията [kg]  
 $-v$  – скоростта на композицията [m/s]

Тъй като се налага двупосочно пробразуване на енергията по време на запасяването и обратното и използване, то неминуемо води до загуба на енергия като сумарно в двете посоки могат да достигнат до 50%.

$$(2). E = 0.5 * E_k = 0.5 * 52 = 26 \text{ [kW.h]}$$

В този случай при цена на електроенергията приблизително от 0.15лв/kW.h реализираната икономия при един цикъл от спиране и тръгване ще бъде в размерна:

$$(3). \text{Икономия} = \frac{\text{спиране}}{\text{потегляне}} = 0.15 * 26 \approx 3.90 \text{ [лв.]}$$

Това е прекалено малко за да бъде икономически ефективно в разглеждания случай с магистрален локомотив. Може би по различен ще е случаят с маневрени локомотив тъй като естеството на работата му е свързана с множество спирания и тръгвания но за по точна оценка на икономическата целесъобразност са необходими подробни статистически данни за режимите му на работа.

Резултатите от направените изчисления красноречиво доказват че, може да се търси рентабилност при вграждане на такава типсистема в превозни средства при които има честа промяна на скоростта на движение, каквито са метрорисните метро-влакове от градски тип, трамваите и тролбусите, същевременно такава система би решила и един сериозен проблем по време на рекуперация, какъвто е пренапрежението в контактната мрежа.

### 3. Метромотриса

При обща маса на метромотрисата от 145 тона заедно с пътниците (около 7 пъти по малко от влакова композиция) и скорост 70 км/час, запасената енергия, а съответно и реализираната икономия ще бъдат около 7 пъти по малко.  
 $\text{икономия} \frac{\text{спиране}}{\text{потегляне}} \approx 0.56 \text{ лв.}$

При средно 10 на брой спирки в една метро-линия общата икономия на енергия в едната посока на движение ще бъде не повече 5.60 лв. от което става ясно че системата предназначена само за икономия на енергия чрез нейното акумулиране при спиране ще бъде икономически неизгодна. При отчитането на икономическата целесъобразност се вземат под внимание както икономията на енергия така и понижените разходи за обслужване на спирачната система, намаления брой аварии на изправителни станции възникнали в следствие на претоварване по време на ускоряване, намален брой аварии в следствие на пренапрежение в контактната мрежа, а погледнато в перспектива намаленият брой аварии ще намали загубите в бъдещи периоди предизвикани от неспазване на разписанието.

За да се избегне връщането на енергия в контактната система е необходимо тя да бъде съхранена и по късно използвана при повторното потегляне на мотрисата

Енергия на движещата се мотриса(145 тона 70 км/час):

$$(4). E_k = \frac{1}{2} * 145000 * 19.4^2 = 27286100 \approx 27.3 \text{ MJ} \approx 7.6 \text{ [kW.h]}$$

При КПД от 70% на системата са подаване на енергията към маховика запасената енергия в него ще трябва да бъде:

$$(5). E = E_k * 0.7 = 27.3 * 0.7 = 19.1 \text{ [MJ]}$$

Ако във всеки вагон има система за акумулиране на енергия то тогава количеството енергия ще се раздели на четири и ще бъде почти 4 MJ. Нека предположим че съществува възможността да вградим маховик в транспортното средство с формата на плътен цилиндър като диаметърът му е 1000мм и можем безопасно да го развъртим със скорост от порядъка на  $n=3000$  оборота/минута. Ограничението на скоростта на въртене е наложено от загубите в лагерите и възникващия жирокопен ефект който от своя страна води до необходимостта от система за окачване и амортизация на агрегата (системата от маховик и модул за предаване и отнемане на енергията) но има и положителен ефект изразен в стабилизиране на транспортното средство и повишаване на комфорта за пътниците.

В случай че при избраните параметри системата е достатъчно безопасна то запасената енергия в маховика може да бъде изчислена:

$$(6). \quad E = \frac{1}{2} * I * \omega^2 [J] \quad \text{където:}$$

$E_k$  запасена енергия в маховика

$\omega$  е ъгловата скорост [rad/s]

$I$  инерционния момент на масите спрямо оста на въртене [kg.m<sup>2</sup>]

Инерционния момент на плътен цилиндър е:

$$(7). \quad I_z = \frac{1}{2} * M * r^2 \quad [kg.m^2] \quad \text{където:}$$

$M$  маса на цилиндъра (маховика) [kg]

$r$  радиус на цилиндъра [m]

Ъгловата скорост:

$$(8). \quad \omega = 2 * \pi * \frac{n}{60} = 2 * \pi * \frac{3000}{60} \approx 314 \text{ [rad/s]}$$

Необходимия инерционния момент изведен от формула (6) е:

$$(9). \quad I = \frac{2 * E}{\omega^2} = \frac{2 * 4 * 10^6}{314^2} = 81.14 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

От формула (7) за масата на цилиндъра получаваме:

$$(10). \quad M = \frac{2 * I_z}{r^2} = \frac{2 * 81.14}{(\frac{1.0}{2})^2} = 649.12 \text{ [kg]}$$

#### 4. Трамвай

Значително по малката маса на трамвая – средно 18.5 тона (празен) и по ниската максимална скорост (50 км/час) предопределят многократно по малко количество енергия:

$$(11). \quad E_k = \frac{1}{2} * 18500 * (\frac{50}{3.6})^2 = 1784336 \approx 1.8 \text{ MJ} \approx 0.49 \text{ [kW.h]}$$

На пръв поглед много малко количество енергия но при неофициални проучвания е установено че по време на една смяна спирачната система на трамвая се задейства повече от 1000 пъти, като в по голямата част от случаите загубата на скорост е над 50% съответно загубата на енергия е над 75% . В такъв случай загубата на енергия в една смяна е не по малко от:

$$(12). \quad \sum E_k = 500 * 0.75 * 0.49 = 184 \text{ [kW.h]}$$

Тъй като трамвайните мотриси в България са с по малко междурелсие то и диаметъра на вградения маховик ще бъде ограничен до около 0.7 метра

Енергията която трябва да се запаси в двата маховика ще бъде:

$$(13). \quad E_2 = \frac{1}{2} E_k * 0.7 = \frac{1}{2} * 1.8 * 0.7 = 1.26 \text{ [MJ]}$$

А на единия съответно:

$$(14). \quad E = \frac{1}{2} E_2 = \frac{1}{2} 0.63 = 0.63 \text{ [MJ]}$$

Необходимия инерционен момент по формула(9) ще е:

$$(15). \quad I = \frac{2*E}{\omega^2} = \frac{2*63*10^4}{314^2} = 12.78[\text{kg.m}^2]$$

От формула (10) за масата на маховика получаваме:

$$(16). \quad M = \frac{2*I_z}{r^2} = \frac{2*12.78}{(\frac{0.7}{2})^2} = 209 \text{ [kg]}$$

Интересен е въпросът до колко може да бъдат увеличени оборотите на развъртане на маховика, тъй като при удвояване на оборотите запасената енергия се учетворява то тя ще бъде достатъчна за ускоряване на трамвайната мотриси и поддържане на скоростта и на движение за определено време с цел преминаване на участъци от линията при които построяването на контактна мрежа е невъзможно, скъпо или неестетично(около паметници на културата).

### 5. Тролейбус

Поради това че масата на несъчленен троллейбус е около 9 тона - наполовината спрямо масата на трамвая, то и енергията която се губи при спиране ще бъде наполовина- следователно един маховик с маса 209 килограма, диаметър 0.7 метра и 3000 обороти/минута ще бъде достатъчен за да съхрани енергията генерирана по време на спиране.

### 6. Обобщение

До тук във всички варианти разглеждахме система с бавно въртящ се маховик, но има разработки при които масата на маховика е значително по малка за сметка на повишените обороти при някои тестови модели до 100 000об/мин. като за намаляване на загубите се използват магнитни лагери и камерата в която се намира маховикът е вакумирана.

В таблицата по долу са представени някои варианти за акумулиране на енергия както и приблизителни цени, като при вариантите с маховик е направено допускане, че масата на завършената система ще двойно по горяма от масата на маховика.

Таблица 1. Сравнителна таблица енергозапасяване.

	оловен акумулатор р тягов	литиево- полимерен акумулатор	система сбавно въртящ се маховик 209кг 0.7м 3000мин <sup>-1</sup>	система сбързо въртящ се маховик 20кг 0.2м 20000мин <sup>-1</sup>	супер конден- затори
капацитет, kW.h			0.175	0.061	20
маса, kg			418	40	1000
специфичен капацитет kW.h/kg	0.035-0.1	0.1-0.265	0.00042	0.0015	0.02
брой работни цикли	500-2000	500-5000	много голям	много голям	>30000

От таблицата виждаме че система с маховик тежаща 208kg ще съхрани 0.0875 kW.h . В случай че решим да използваме литиево-полимерен акумулатор при специфичен капацитет 0.2 kW.h/kg то той би тежал:

$$(17). \quad m = \frac{0.175kWh}{0.2kWh/kg} = 0.875 \text{ [kg]}$$

Значително по лек, но с уговорка че енергията ще се запасява в продължение на 1 час (3600 секунди). Ако решим да зареждаме акумулаторната батерия в рамките на 10 секунди съответно ще превишим максималния заряден ток 360 пъти или другият вариант е да изберем 360 пъти по-голяма акумулаторна батерия като нейното тегло ще бъде:

$$(18). \quad m = 360 * 0.875 \approx 315 \text{ kg}$$

Кое то вече е съизмеримо с тежестта на маховика, а същевременно използването само на 0.3% от капацитета на акумулаторната батерия би довело до многократно например 10кратно увеличаване на работните цикли в случая 5000 ще станат 50000\* но при трамвайната мотриса при 500 цикъла на ден само след 100 работни дни акумулаторната батерия ще трябва да бъде подменена.

Запасена енергия в двата маховика е 1.26 MJ като приспадне загубите остава

$$(19). \quad E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{или} \quad E = 0.7 * 1.26 * 10^6 = 882 \text{ [kJ]}$$

При условие, че пренебрегнем загубите при ускорение и въздушно съпротивление, при спиране от скорост 50 km/h в последствие ще можем да ускорим транспортното средство до:

$$(20). \quad v = \sqrt{\frac{E}{\frac{1}{2}m}} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2*882*10^3}{18500}} = 9.76 \text{ [m/s]} \approx 35 \text{ [km/h]}$$

### **Заклучение**

Предимства:

- евтино;
- надеждно;
- намалява пренапрежението в контактната мрежа;
- намалява претоварването на контактната мрежа;
- стабилизира превозното средство;
- създава комфорт на возене

Забележка: Броя работни цикли при използването само на 0.3% от капацитета на акумулаторната батерия е само предположение и е тема на допълнително по обстойно изследване.

Недостатъци:

- добавя се още една система за поддръжка и ремонт;
- утежняване на транспортното средство макар и минимално.

## **STOCKING OF ENERGY IN VEHICLES**

**Petko Kostadinov, Martin Zlatkov, Irena Bozhichkova**

[petko\\_kostadinov@abv.bg](mailto:petko_kostadinov@abv.bg), [dj\\_marti79@mail.bg](mailto:dj_marti79@mail.bg), [millennium\\_26@abv.bg](mailto:millennium_26@abv.bg)

**Todor Kableshkov University of Transport, Sofia, 1574, str. "GeoMilev" 158  
BULGARIA**

**Key words:** *electric vehicles, energy storage, electricity consumption, flywheel, battery, supercapacitor, sgaten air, high pressure vessel.*

**Abstract:** *This report presents idea for introducing electric vehicles to the facility stored energy from braking so it can be consumed in a subsequent rolling. Mentioned are the methods for energy storage. An energy and financial benchmarking between them.*