

## **Energy storage devices for subway trains**

### **Zasobniki energii dla pojazdów metra**

*The article discusses the issues related to the use of energy storages on the example of Warsaw Metro. The application of stationary or vehicle energy storages is proposed based on the preliminary calculations of braking energy for metro trains operated in Warsaw. The return of financial expenditures for both types of energy storages occurs within approximately 5 years.*

*W artykule omówiono zagadnienia związane z zastosowaniem zasobników energii na przykładzie Metra Warszawskiego. Na podstawie wstępnych wyliczeń energii hamowania dla eksploatowanych w Warszawie pociągów metra zaproponowano zastosowanie stacjonarnych lub pojazdowych zasobników energii. Zwrot inwestycyjnych nakładów finansowych dla obu typów zasobników następuje w przeciągu około 5 lat.*

#### **1. Initial remarks**

Intensive development of alternative sources of electricity, so-called "green energy" produced by hydroelectric, wind, and solar power plants also brings to attention the energy lost in the resistors of urban and railway transport fleet. Energy consumption by urban transport is a significant part of the overall electricity generated in the country. The reduction of energy consumption from trams, trolleybuses and subway rolling stock can be achieved by reducing the energy losses during braking of the vehicles lost partly in the braking systems. Trains used by Metro Warszawskie on the first line consume about 20 million kWh for their traction needs. The energy recovered during braking from the amount consumed by other trains is about 20%, the rest of the braking energy is lost in the braking resistors and on supplying the train auxiliary systems. The use of energy storage devices installed on the rolling stock or in the power supply network would allow a significant portion of the energy wasted to be returned to the storage systems and recovered for later use. In the London Metro (consuming approx. 200 MWh per day) URENCO - POWER tanks with a capacity of approximately 100 - 200kW with a high-speed flywheel mounted on traction substations, which were tested as early as in the year 2000, were used. The test results showed that the train (with the power of 2,200 kW) consumes approximately 10 kWh during

#### **1. Uwagi wstępne**

Intensywny rozwój alternatywnych źródeł energii elektrycznej tzw. „zielonej energii” wytwarzanej przez elektrownie wodne, wiatrowe, a także solarne zwraca coraz większą uwagę też na energię traconą bezużytecznie w opornicach taboru komunikacji miejskiej i kolejowej. Zużycie energii przez transport miejski stanowi znaczącą część wytwarzanej w kraju energii elektrycznej. Zmniejszenie zużycia energii przez tramwaje, trolejbusy i tabor metra można uzyskać po przez zmniejszenie strat energii podczas hamowania pojazdów traconej częściowo w opornicach hamowania. Pociągi eksploatowane przez Metro Warszawskie na pierwszej linii zużywają na cele trakcyjne ok. 20 mln kWh. Odzysk energii podczas hamowania pobieranej przez inne pociągi wynosi ok. 20 %, reszta energii hamowania tracona jest w opornicach hamowania oraz zasila obwody pomocnicze pociągu. Zastosowanie zasobników energii instalowanych na taborze lub na sieci zasilającej pozwoliłoby znaczną część traconej energii zwrócić do zasobników i odzyskać podczas ponownego rozruchu. W Metrze Londyńskim (zużywającym ok. 200 MWh dziennie) zastosowano zasobniki firmy URENCO – POWER o mocy około 100 - 200kW z szybkoobrotowym kołem zamachowym montowane na podstacjach trakcyjnych, które były testowane już w 2000 roku. Wyniki badań testowych wykazały, że pociąg (o mocy 2200 kW) pobiera pod-

the start-up, while during braking (with the power of 3,200 kW) generates energy of about 7.3 kWh, approx. 10% of the energy consumed supplies auxiliary train systems, and about 5% is used due to friction. Fitting a 1MW storage tank can recover about 40% of the braking energy, which at a price of 0.06GBP/kWh gives a payback period of around 4 years.

Currently, a number of global companies offer storage tanks consisting of super capacitors with a capacity of several to several dozen Farads. Such sets with nominal voltage of 800 - 900 V have a large capacity of 8 - 10 farads and can accumulate the energy of 0.7 - 1.0 kWh. The useful energy of such storage tanks, when discharging up to 50% of the rated voltage, is 0.55 - 0.75 kWh. The peak power for the rated current of the storage tanks is approx. 120 kW and for the maximum current of the storage tanks (around 750 A) it can reach approx. 600 kW. Capacitor tanks have been installed on trams and trolleybuses in Warsaw, Lublin and Kowno and have passed operational tests.

For additional energy savings in the Metro, it is possible to use storage devices installed in trains or on the supply network:

- flywheel energy storage (FES) with a capacity of 1000 kW (due to its large mass of approx. 5 Mg more likely installed in the power grid)
- capacitor units with the power of 200 -400 kW in trains or about 1 MW at substations or between them.
- batteries
- other modern Energy storage systems

This article will discuss capacitor and flywheel energy storage devices.

## 2. Warsaw metro rolling stock

The INSPIRO Siemens trains, weighing 158 Mg, powered by 16 140 kW engines with a total power of 2240 kW (35 trains, 210 wagons) and 18 METROPOLIS trains by Alstom, with a total capacity of 16x 180 = 2,880 kW with a weight of 174 Mg, are operated on the first line of the Metro.

The passenger mass at 100% load is around 110 Mg (and for 50% load this value is 55 Mg)

For calculating the kinetic energy of a train as a function of speed according to the formula:

$$E = \frac{QV^2}{2}$$

(Q in Mg, V in m/s, E in kW) the following assumptions were made:

- train mass Q = 160 Mg
- passenger mass 55 Mg
- flat route 0 %
- the efficiency of the vehicle drivetrain and internal friction 0.85
- 50% of the energy returned by the braking process is taken over by other traveling trains, and 10% consumed by own auxiliary systems (converters, compressors, ventilation, lighting and control).

czas rozruchu energię ok 10 kWh, a podczas hamowania (z mocą 3200 kW) generuje energię ok 7,3 kWh., z czego ok. 10% pobranej energii zasila odbiory pomocnicze pociągu, a ok.5% idzie na opory ruchu. Instalacja zasobnika o mocy 1MW może odzyskiwać ok. 40 % energii hamowania, co przy cenie 0,06GBP/kWh daje czas zwrotu nakładów ok. 4 lata

Obecnie szereg firm światowych oferuje zestawy zasobnikowe składające się z super kondensatorów o pojemności kilku do kilkudziesięciu faradów. Zestawy takie na napięcie znamionowe 800 – 900 V charakteryzują się dużą pojemnością 8 - 10 faradów i mogą akumulować energię 0,7 - 1,0 kWh. Energia użyteczna takich zasobników, podczas rozładowywania do 50 % napięcia znamionowego, wynosi 0,55 – 0,75 kWh. Moc szczytowa dla prądu znamionowego zasobników wynosi ok. 120 kW a natomiast dla prądu maksymalnego zasobników (około 750 A) może osiągnąć ok. 600 kW. Zasobniki kondensatorowe zostały zamontowane w tramwajach i trolejbusach w Warszawie, Lublinie i Kownie i pomyślnie przeszły badania eksploatacyjne.

Dla uzyskania dodatkowych oszczędności energii w Metrze można więc zastosować zasobniki montowane w pociągach lub na sieci zasilającej:

- zasobniki bezwładnikowe o mocy 1000 kW (ze względu na dużą masę ok. 5 Mg raczej na sieci)
- zasobniki kondensatorowe o mocy 200 -400 kW w pociągach lub ok. 1 MW na podstacjach trakcyjnych lub między podstacjami.
- zasobniki akumulatorowe
- inne nowoczesne rozwiązania zasobników energii

W niniejszym artykule omówione będą zasobniki kondensatorowe oraz bezwładnikowe.

## 2. Tabor metra warszawskiego

Na pierwszej linii Metra eksploatowane są pociągi INSPIRO Simensa o masie 158 Mg napędzane 16 silnikami 140 kW o łącznej mocy 2240 kW (35 pociągów, 210 wagonów) oraz 18 pociągów typu METROPOLIS firmy Alstom o łącznej mocy 16x 180=2880 kW o masie 174 Mg.

Masa pasażerów przy 100 % zapelnieniu wynosi ok. 110 Mg (a dla 50 % jak przyjęto do obliczeń 55 Mg)

Do obliczeń energii kinetycznej pociągu w funkcji prędkości wg wzoru:

$$E = \frac{QV^2}{2}$$

(Q w Mg, V w m/s, E w kW) przyjęto następujące założenia:

- masa pociągu Q = 160 Mg
- masa pasażerów 55 Mg
- trasa płaska 0 %
- sprawność układu napędowego opory ruchu pociągu 0,85
- 50 % energii zwracanej przez pociąg hamujący przejmowana jest przez inne jadące pociągi, a 10 %

The storage system should therefore absorb about 40% of the braking energy after taking into account the efficiency of the drive system and the friction values. The graph of the braking energy as a function of the vehicle speed is shown in Fig. 1.

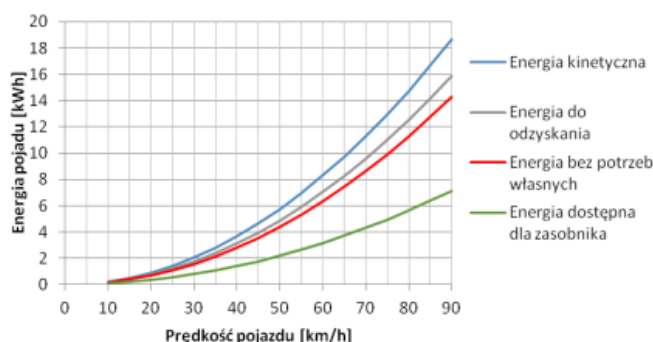


Fig. 1. Braking Energy function  $E=f(V)$  for a train weighing 160 Mg and a 55 Mg passenger weight

- the line --- shows the energy as a function of speed
- the line --- presents the same function after taking into account the drive efficiency - 0.85
- the line --- presents the function after subtracting own system's consumption - 10 %
- the line --- presents the function after adjusting for the 50% energy consumed by other trains.

Rys. 1. Charakterystyka energii hamowania  $E=f(V)$  dla pociągu 160 Mg oraz 55 Mg masy pasażerów

- charakterystyka --- przedstawia zależność energii od prędkości
- charakterystyka --- przedstawia zależność po uwzględnieniu sprawności napędu - 0,85
- charakterystyka --- przedstawia zależność po uwzględnieniu potrzeb własnych - 10 %
- charakterystyka --- uwzględnia odbiór 50% energii przez inne pociągi, czyli energię do akumulacji.

pobierają własne pomocnicze (przetwornice, sprężarki, wentylacja, oświetlenie i sterowanie).

Zasobnik powinien więc przejmować ok. 40 % energii hamowania po uwzględnieniu sprawności napędu oraz oporów ruchu.

Wykres zależności energii hamowania od prędkości jednostki pokazany jest na rys. 1.

Zasobnik powinien przejąć ok. 40 % energii hamowania pojazdu, czyli dla prędkości hamowania:

- $V = 80\text{km/h}$  energię ok 6,0 kWh
- $V = 70\text{ km/h}$  energię ok 4,5 kWh
- $V = 60\text{ km/h}$  energię ok 3,2 kWh.

Badania ruchowe tramwaju 116 N z zasobnikiem kondensatorowym 9 F wykazały oszczędność energii ok. 30-40 %

### 3. Zasobniki kondensatorowe

#### 3.1. Super kondensatory

Super kondensator jest elektrochemicznym kondensatorem dwuwarstwowym z dwiema elektrodami zanurzonymi w elektrolicie. Gdy elektrody są naładowane, to jony elektrolitu poruszają się pod wpływem pola elektrycznego do elektrod o przeciwnym ładunku. Część anionów i kationów lokują się w pobliżu elektrod równoważąc nadmiar ładunku w zaktywizowanym węglu. Tworzą się więc między elektrodą węglową a elektrolitem dwie warstwy o przeciwnym ładunku. Duża wartość pojemności osiągnięta jest dzięki zastosowaniu elektrod węglowych o bardzo dużej powierzchni (ok. 200 m<sup>2</sup> z 1 grama przez stosowanie proszkowej lub tkaninowej struktury) oraz bardzo małej odległości pomiędzy przeciwnymi ładunkami rzędu nanometrów (2 – 5 nm). Wartość napięcia ogniwa nie jest więc wysoka i wynosi ok 2,5 V, co powoduje konieczność szeregowego łączenia ogniw dla uzyskania wymaganych dla trakcji napięć.

#### Parameters of selected energy storage systems Parametry wybranych zasobników energii

Table 1  
Tablica 1

Parametry	Maxwell HTM390	Maxwell HTM125	Batscap M54V150F	LS LS 190V41.7F
Maksymalne napięcie	394V	130V	54V	190V
Znamionowa pojemność	17.8F	63F	150F	41.7F
Oporność szeregową DC	65mW	18mW	4mW	28.8mW
Dostępna energia	282Wh	101.7Wh	45.6Wh	156.81Wh
Gęstość energii [kg]	2.28Wh/kg	2.36Wh/kg	3.57Wh/kg	2.01Wh/kg
Gęstość energii [l]	1.58Wh/l	1.59Wh/l	3.28Wh/l	2.11Wh/l
Maksymalny prąd ciągły	150A	150A	b.d.	150A
Maksymalny prąd	950A	750A	b.d.	750A
Żywotność cykli	>1mln	>1mln	>1mln	>1mln
Napięcie izolacji [V]	3 500	4 000	2 000	5 250
Min temperatura pracy	-40°C	-40°C	-30°C	-40°C
Max temperatura pracy	+65°C	+65°C	+60°C	+65°C
Masa [kg]	165	58	17	104
Wymiary [mm]	1200 / 664 / 299	762 / 425 / 265	428 / 333 / 130	918 / 453 / 238

The storage device should take about 40% of the braking energy of the vehicle, i.e. for the different braking speeds:

-  $V = 80\text{ km/h}$  the energy equal to 6.0 kWh

-  $V = 70\text{ km/h}$  the energy equal to 4.5 kWh

-  $V = 60\text{ km/h}$  the energy equal to 3.2 kWh.

The operating tests of the 116 N tramline with a 9 F capacitor based storage system showed energy savings of around 30-40%

### 3. Capacitor systems

#### 3.1. Supercapacitors

The super capacitor is a two-layer electrochemical capacitor with two electrodes immersed in an electrolyte. When the electrodes are charged, the electrolyte ions move under the influence of the electric field to the electrodes with the opposite charge. Some of the anions and cations locate near the electrodes, balancing the excess charge in the activated carbon. Thus, two layers with an opposite charge are formed between the carbon electrode and the electrolyte. The large capacity value is achieved by using carbon electrodes with a very large surface area (about  $200\text{ m}^2$  from 1 gram by using a powder or fabric structure) and a very small distance between opposite charges in the order of nanometers (2 - 5 nm). Thus, the voltage value of the cell is not high and amounts to about 2.5 V, which makes it necessary to connect the cells in series to obtain the voltage required for traction.

The development of a high-capacity capacitor manufacturing technology, in the order of thousands of farads and cell voltage of approx. 2.5 - 2.7 V, when connected in series, enabled the energy storage systems for applications in public transport vehicles to accumulate braking energy to be constructed. Currently, systems operating in voltage ranges from 54 V to 390 V are available with an excess cell voltage control system and operating temperature control. Such energy storage systems are manufactured by a number of global companies, and with larger orders they can be made in the desired configuration. The Electrotechnical Institute used storage devices with a nominal voltage of 780V in trams and trolleybuses. In a container solution (mounted at or outside of substations), Korean LS 190 V 41.7 F systems were used. These solutions have successfully passed operational tests in Warsaw, Lublin, Gdynia and Kowno. An example set of parameters for some of the energy storage systems is shown in Table 1.

#### 3.2. Rail systems

The braking of the train should be carried out the energy being returned to other trains moving or driving at that time, at a voltage equal to the supply voltage. However, if this energy is not received, the voltage value is stabilized by the capacitor bank converters, and the system current value is limited by the maximum value of the capacitor current.

Assuming the maximum train braking voltage value to

Rozwój technologii wytwarzania kondensatorów dużej pojemności rzędu tysięcy faradów i napięciu ogniwa ok. 2,5 – 2,7 V umożliwił, przy szeregowym ich łączeniu, budowę zasobników dla zastosowań w pojazdach komunikacji miejskiej do gromadzenia energii hamowania. Obecnie dostępne są zestawy od 54 V do 390V z systemem kontroli nadmiarowej dopuszczalnej wartości napięcia ogniwa oraz dopuszczalnej temperatury pracy. Zestawy takie produkowane są przez szereg firm światowych, a przy większych zamówieniach mogą być wykonane w żądanej konfiguracji. Instytut Elektrotechniki zastosował w tramwajach i trolejbusach zasobniki o napięciu znamionowym 780V. W rozwiązaniu kontenerowym (montowanym na podstacjach lub poza nimi) zasobniki Koreańskie typu LS 190 V 41,7 F. Rozwiązania te pomyślnie przeszły badania eksploatacyjne w Warszawie, Lublinie, Gdyni i w Kownie. Przykładowe zestawienie parametrów niektórych zasobników pokazane jest w tablicy 1.

#### 3.2. Zasobniki taborowe

Hamowanie pociągu powinno być realizowane ze zwrotem energii do innych pociągów ruszających lub jadących w tym czasie, przy napięciu równym napięciu zasilania. Natomiast przy braku odbioru tej energii wartość napięcia jest stabilizowana przekształtnikami zasobnika kondensatorowego, a wartość prądu zasobnika ograniczona jest maksymalną wartością prądu kondensatorów.

Przyjmując maksymalną wartość napięcia hamowania pociągu 900 V przy braku poboru prądu przez inne pociągi zasobniki zamontowane na taborze powinny przejąć ok. 4 -6 kWh (rys.1) przy hamowaniu z prędkości 60 – 80 km/h. Na rys. 2 przedstawione są charakterystyki energii maksymalnej zasobnika o pojemności 9 F w funkcji napięcia kondensatorów, oraz energii użytecznej w funkcji różnicy napięcia początkowego 850 V i napięcia końcowego rozładowania.

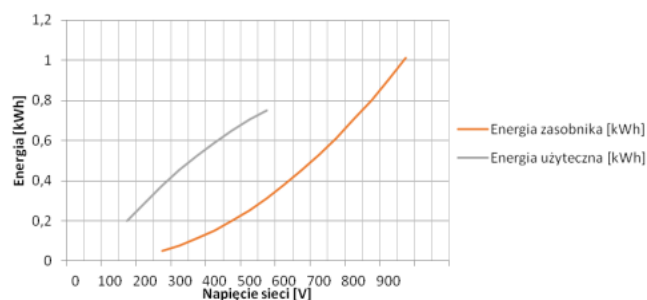


Fig. 2. The relation between the 9f storage device  $U_c$  voltage energy and the usable energy values to the storage device energy discharge level

Rys. 2. Zależność energii zasobnika 9F napięcia  $U_c$  oraz energii użytecznej od głębokości rozładowania zasobnika

Przyjmując wartość napięcia zasobnika 850 V energia maksymalna wynosi ok. 0,9 kWh a przy rozładowaniu do wartości minimalnej 450 V energia użyteczna wynosi ok. 0,7 kWh.

Z porównania energii wymaganej (rys. 1) oraz energii

be 900 V in the absence of power demand from other trains, the energy storage systems mounted on the rolling stock should be able to take in around 4 - 6 kWh (Fig.1) when braking at 60 - 80 km/h. Fig. 2 shows the maximum energy characteristics of the 9 F energy storage as a function of the capacitor voltage, and the useful energy as a function of the voltage difference between the initial value of 850 V and the final discharge voltage.

Assuming the device voltage value to be 850 V, the maximum energy is about 0.9 kWh and when discharged to a minimum value of 450 V, the usable energy is about 0.7 kWh.

możliwej do przejścia przez zasobnik 9 F (rys. 2) wynika, że dla hamowania z  $V = 60$  km/h należy przyjąć 2 zasobniki po  $2 \times 9$  F, natomiast dla  $V = 80$  km/h 3 zasobniki. Przyjmując maksymalną wartość prądu kondensatorów 750 A (10 sek.), a minimalną wartość napięcia zasobnika 425 V wartość prądu  $I_z$  zasobnika  $2 \times 9$  F wynosi ok 750 A (bowiem  $I_z = I_c \max * U_c/U_{zn}$ ), więc prawie połowa prądu będzie tracona w opornicach. Przy napięciu ponad 850 V prąd zasobnika może osiągać wartość 1500 A. Schemat włączenia zasobnika w obwód główny jednostki pokazany jest na rys. 3, a schemat blokowy przekształtników tranzystorowych na rys. 4.

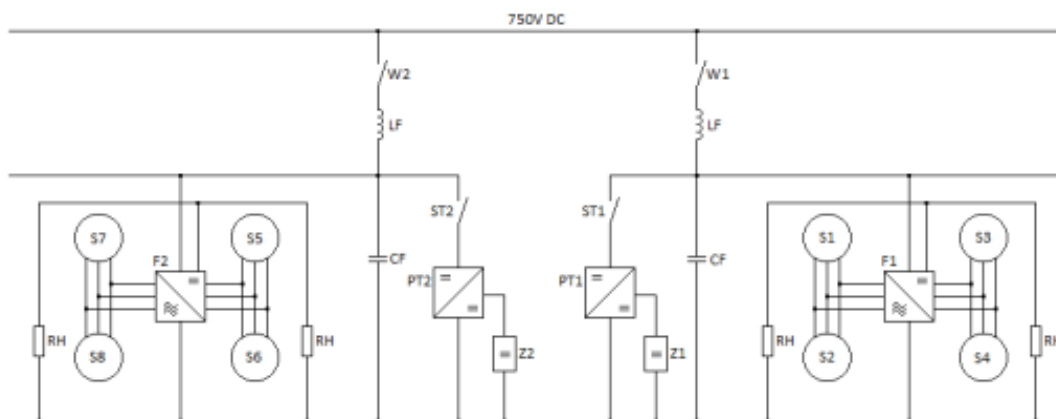


Fig. 3. Schematic of storage unit integration into the system

Rys. 3. Schemat włączenia zasobnika w obwód jednostki

From the comparison of the required energy (Fig. 1) and the energy capacity of the 9 F storage device (Fig. 2) it follows that for braking at  $V = 60$  km/h, 2 containers with  $2 \times 9$  F devices should be used, while for  $V = 80$  km/h it should be 3 containers. Assuming the maximum value of the 750 A capacitor current (10 sec), and the minimum 425 V reservoir voltage, the  $I_z$   $2 \times 9$  F current is around 750 A (because  $I_z = I_c \max * U_c/U_{zn}$ ), so almost half of the current will be lost in the resistors. At over 850 V, the device current can reach 1500 A. The schematic depiction of integrating the storage system into the main circuit of the vehicle is shown in Fig. 3, and the block diagram of transistor converters can be found in Fig. 4.

The storage device consists of ST1 and ST2 contactors, PT1 and PT2 converters, and two capacitor sets of 18 F each. The vehicle's drivetrain schematic does not change. The control scheme requires only the addition of the ST1 and ST2 contactors control by switching on circuit breakers W1 and W2. PT converters have their own current and voltage protection as well as control enabling voltage boosting during train start up and discharging of capacitors up to approx. 400 V. The usable energy of each storage device is approx. 1.4 kWh. The weight of the  $2 \times 9$  F container is about

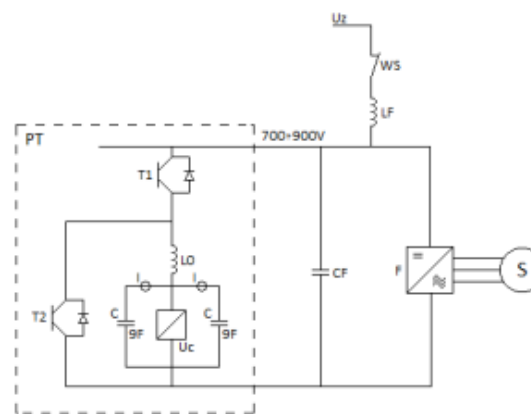


Fig. 4. Diagram of the PT converter

Rys. 4. Schemat przekształtnika PT

Zasobnik składa się z styczników ST1 i ST2, przekształtników tranzystorowych PT1 i PT2 oraz dwóch zestawów kondensatorowych po 18 F każdy. Schemat napędowy jednostki nie ulega zmianie. W schemacie sterowania należy wprowadzić tylko uzależnienie włączenia styczników ST1 i ST2 od włączenia wyłączników W1 i W2. Przekształtniki PT posiadają własne zabezpieczenia prądowe i napięciowe oraz sterowanie umożliwiające podbijanie napięcia podczas rozruchu pociągu i rozładowywania kondensatorów do

400 - 500 kg, and the inverter about 200 kg. The total additional weight for the unit is therefore approx. 2.5 Mg, which is approx. 1.5% of the vehicle's own weight. The total cost of the energy storage system will amount to approx. PLN 1 million. During the annual train operation distance, about 150 000 km, and the price of 1 kWh being 0.5 PLN, the return of expenditures is expected to take about 4 - 5 years.

Figure 4 shows the PT converter electrical circuit diagram. It consists of T1 transistor charging capacitors up to about 850 V, T2 transistor, which together with L0 stuffing box, raises the accumulator voltage to the supply voltage value during start up, current measurement elements I and the voltage of capacitors  $U_c$ .

Such a system was tested in operation on trams and trolleybuses. Examples of starting and braking patterns of tram 116N are shown in Figures 5 and 6.

ok.400 V. Energia użyteczna każdego zasobnika wynosi ok. 1,4 kWh. Masa zasobnika 2 x 9 F wynosi ok. 400 – 500 kg, a przekształtnika ok. 200 kg. Łączna masa dodatkowa dla jednostki wynosi więc ok. 2,5 Mg co stanowi ok. 1,5 % masy jednostki. Całkowity koszt zasobnika energii wyniesie ok. 1 mln zł. Przy przebiegu rocznym pociągu ok 150 tys km. i cenie 1 kWh 0,5 zł. zwrot nakładów wyniesie ok. 4 – 5 lat.

Rysunek 4 przedstawia schemat obwodu elektrycznego przekształtnika PT. Składa się on z tranzystora T1 ładowania kondensatorów do napięcia ok 850 V, tranzystora T2, który wraz z dławikiem L0 powoduje podbijanie napięcia zasobnika do wartości napięcia zasilania podczas rozruchu, członów pomiaru prądu I oraz napięcia kondensatorów  $U_c$ .

Układ taki został zbadany eksploatacyjnie w tramwajach i trolejbusach. Przykładowe przebiegi rozruchu i hamowania tramwaju 116N pokazane są na rysunkach 5 i 6.

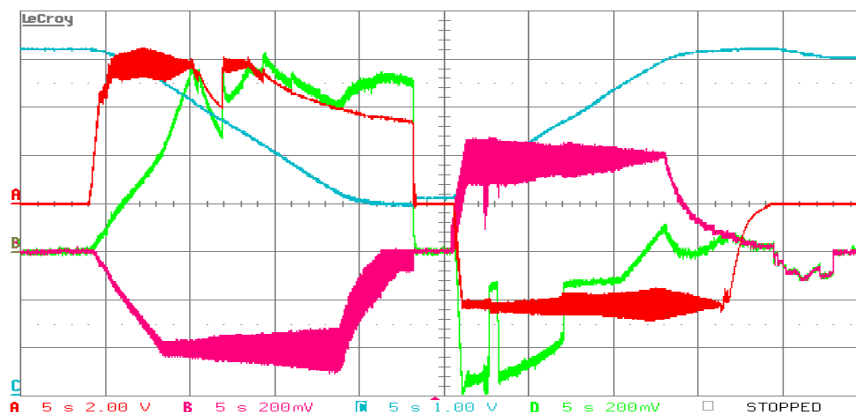


Fig. 5. Starting and braking the tram  $U_Z = 700V$ ,  $U_C = 720 - 400V$ ,  $I_{Sh} = 2x 220A$ ,  $I_{Sr} = 2x 290A$ , maximum speed of about 50km/h

Where:

$I_S$ – motor group current	100 A/dz.
$I_Z$ – traction network current	100 A/dz.
$I_C$ – storage device current	100 A/dz.
$U_Z$ – storage device voltage	100 V/dz.
Time scale	5 s/dz.

Rys. 5. Rozruch i hamowanie tramwaju  $U_Z = 700V$ ,  $U_C = 720 - 400V$ ,  $I_{Sh} = 2x 220A$ ,  $I_{Sr} = 2x 290A$ , prędkość maksymalna ok. 50km/h

Oznaczenia:

$I_S$ – prąd grupy silników	100 A/dz.
$I_Z$ – prąd sieci trakcyjnej	100 A/dz.
$I_C$ – prąd zasobnika	100 A/dz.
$U_Z$ – napięcie zasobnika	100 V/dz.
Skala czasu	5 s/dz.

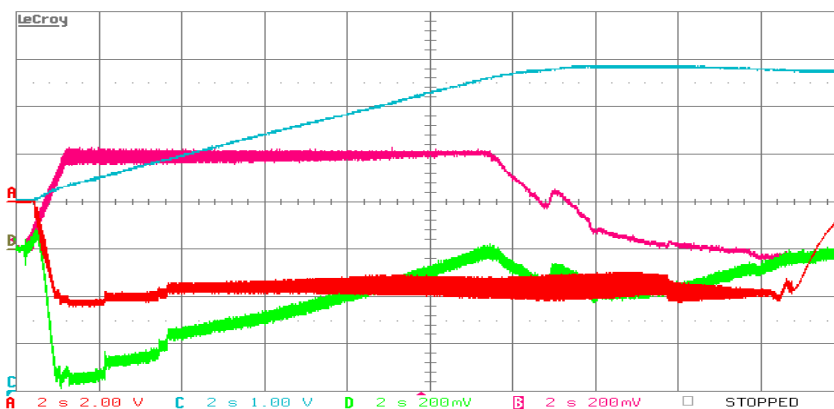


Fig. 6. Tram braking  $I_S = 200A$ ,  $U_Z = 650V$ ,  $U_{Co} = 400V$

Where:

$I_S$ – motor group current	100 A/dz.
$I_Z$ – traction network current	100 A/dz.
$I_C$ – storage device current	100 A/dz.
$U_Z$ – storage device voltage	100 V/dz.
Time scale	2 s/dz.

Rys. 6. Hamowanie tramwaju  $I_S = 200A$ ,  $U_Z = 650V$ ,  $U_{Co} = 400V$

Oznaczenia:

$I_S$ – prąd grupy silników	100 A/dz.
$I_Z$ – prąd sieci trakcyjnej	100 A/dz.
$I_C$ – prąd zasobnika	100 A/dz.
$U_Z$ – napięcie zasobnika	100 V/dz.
Skala czasu	2 s/dz.

### 3.3. Traction network energy storage units

Another solution is the use of stationary energy storage devices installed on intermediate stations (without power substations) or at other network locations, preferably at the end of the power line. Such a storage device should take over 50% of the braking energy of one train, or about 6 kWh, with a braking voltage of 600 - 900 V. At the same time, it would return energy to the traction network, reducing voltage drops, especially in places distant from the power substation. From the graph shown in Fig. 2 it follows that for a voltage difference of 200-250 V the usable energy of the 9 F storage device is approx. 0.4 kWh, so 12 containers of 9 F should be used.

Fig. 7 and 8 show two possible solutions:

- a solution with a transistor current control system for the current returned to the 2 x 9 F storage device and a fixed connection (via a diode) with the traction network enabling the return of energy. (Fig. 7)
  - the second possible solution (Figure 8) is to connect the storage device with contactors (two or three) directly to the traction network after pre-charging the capacitors through additional resistors up to 600 V.
- The weight of the storage devices would be approx. 4 Mg, continuous current equal to  $12 \times 150 = 1800$  A, power of approx. 1350 kW, and the application cost of approx. 1.5 million PLN.

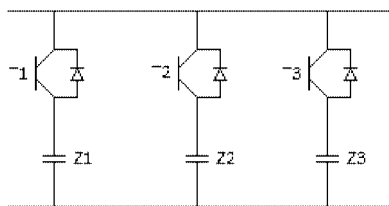


Fig. 7. Network storage device with transistor regulation  
Rys. 7. Zasobnik sieciowy z regulacją tranzystorową

The train frequency in rush hour means one train arrives every 2.5 minutes, the number of brakes per one storage device would be more than 50 per hour, so with a 10-hour long train drive the energy accumulation will reach around  $E = 0.4 \text{ kWh} \times 12 \times 50 \times 10 = 2400 \text{ kWh}$ . Taking the cost of 1 kWh as approx. PLN 0.5 daily savings will amount to approximately PLN 1,200 or approximately PLN 240,000 to 300,000 a year. Thus the full investment cost return would take about 5 years. The number and location of the storage devices depends on the supply network and the technical and economic possibilities.

### 4. Flywheel energy storage device (High-speed flywheels).

High-speed flywheels were used to accumulate the braking energy of trains by the Piccadilly Line trains of the London subway in 2002. Such storage devices return energy during the train start-up, which reduces the voltage drop in the power supply and significantly

### 3.3. Zasobniki sieciowe

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie zasobników stacjonarnych instalowanych na stacjach pośrednich (bez podstacji zasilających) lub w innych miejscach sieci, najkorzystniej na krańcu linii zasilającej. Zasobnik taki powinien przejąć 50 % energii hamowania jednego pociągu, czyli ok. 6 kWh, przy napięciu hamowania 600 – 900 V. Jednocześnie zwracałby energię do sieci trakcyjnej zmniejszając spadki napięcia, zwłaszcza w miejscach odległych od podstacji zasilającej. Z wykresu pokazanego na rys. 2 wynika, że dla różnicy napięć 200 - 250 V energia użyteczna zasobnika 9 F wynosi ok. 0,4 kWh, należałoby więc zastosować 12 zasobników 9 F.

Na rys. 7 i 8 pokazane są dwa możliwe do zastosowania rozwiązania:

- rozwiązanie z tranzystorowym układem regulującym prąd zwracany do zasobnika 2 x 9 F i stałym połączeniem (przez diodę) z siecią trakcyjną umożliwiającym zwrot energii. (rys. 7)
- drugie możliwe rozwiązanie (rys. 8) to włączanie zasobnika stycznikami (dwoma lub trzema) bezpośrednio do sieci trakcyjnej po wstępnym naładowaniu kondensatorów poprzez dodatkowe oporniki do 600 V. Masa zasobnika wynosiłaby ok. 4 Mg, prąd ciągły  $12 \times 150 = 1800$  A, moc ok. 1350 kW, a koszt ok. 1,5 mln. zł.

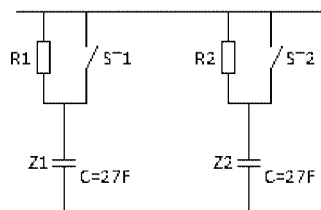


Fig. 8. Network storage device switched on with contactors  
Rys. 8. Zasobnik sieciowy włączany stycznikami

Dla częstotliwości ruchu pociągów w godzinach szczytu co 2,5 min. liczba hamowań na jeden zasobnik będzie wynosiła więcej niż 50 na 1 godzinę, więc przy 10 godzinnym ruchu pociągu akumulacja energii wyniesie ok.  $E = 0,4 \text{ kWh} \times 12 \times 50 \times 10 = 2400 \text{ kWh}$ . Przyjmując koszt 1 kWh ok. 0,5 zł. oszczędność dzienna wyniesie ok. 1200 zł., czyli rocznie ok 240 - 300 tys. zł., zatem zwrot nakładów nastąpiłby po ok. 5 latach. Liczba i miejsce instalowania zasobników zależy od sieci zasilającej oraz możliwości technicznych i ekonomicznych.

### 4. Zasobniki bezwładnikowe (Szybkoobrotowe koła zamachowe).

W metrze londyńskim na Piccadilly Line w 2002 roku zastosowano do akumulacji energii hamowania pociągów szybkoobrotowe koła zamachowe. Zasobniki takie zwracają energię podczas rozruchu pociągu, co zmniejsza spadki napięcia zasilania i znacznie zmniejszają wartość energii pobieranej przez pociągi. Typo-

reduces the energy consumed by the trains. A typical train (according to tests performed in England) takes about 10 kWh of power during start-up, and during braking it can generate approx. 7.3 kWh. Installation of a 1 MW storage device can recover up to 40% of the braking energy, giving an investment costs return time of about 4 years.

The flywheel produced by URENCO has a rotor made of a carbon fiber composite with a glass fiber casing. The stator is made of high silicon steel laminates, with a star-connected winding and powered with an IGBT inverter. The high vacuum and bearingless rotor ensure approximately 20 years of unattended operation. The weight of the 1 MW storage device consisting of 5 flywheels with a power of 200 kW is approx. 5 Mg.

## 5. Conclusions

A technical and economic analysis of two possible types of energy storage devices - supercapacitor and inertial with a flywheel, enabling the absorption of the train braking energy and returning this energy during start-up was carried out.

### a) Supercapacitor storage devices

- Storage devices mounted on the train, with a capacity of 2 x 18 F with an energy of approx. 1.2 kWh with IGBT converters enabling full utilization of the stored capacitors energy by adjusting the charging voltage to 850 V and discharging to 450 V;
- Stationary storage devices located at stations, that do not have power supply units, with a capacity of approx. 50 F, powered by IGBT converters or contactors. The voltage will then be equal to the voltage of the overhead line in a place further away from the power substation. The device will therefore take in excess energy while braking the train and return this energy during the start-up. The voltage difference caused by the traffic volume will be about 150 - 250 V, and the useful energy of the storage device approx. 40 kWh.

It seems that due to the lack of interference in the electric system of the wagons and the lack of additional train weight (additional energy consumption), the use of stationary storage devices will be a more convenient solution.

### b) Flywheel energy storage

A flywheel storage device with a capacity of 5 x 200 kW installed on the power supply line (according to preliminary test data of the London metro) also fulfills the task of energy saving. However, current operating data are still required.

### c) Other solutions utilizing modern batteries currently used in hybrid cars and buses should also be considered, paying particular attention to the costs and durability as well as losses on the battery resistance.

wy pociąg (wg. badań angielskich) pobiera podczas rozruchu ok. 10 kWh, a w czasie hamowania może generować ok. 7,3 kWh. Instalacja zasobnika o mocy 1 MW może odzyskiwać do 40 % energii hamowania, dając okres zwrotu kosztów instalacji ok 4 lat.

Koło zamachowe produkowane przez firmę URENCO posiada rotor wykonany z kompozytu włókien węglowych z obudową z włókna szklanego. Stojan jest wykonany z wysokokrzemowych stalowych laminatów, z uzwojeniem połączonym w gwiazdę i zasilane z falownika IGBT. Wysoka próżnia oraz bezłożyskowy wirnik zapewniają ok 20 letnią bezobsługową pracę. Masa zasobnika 1 MW składającego się z 5 kół zamachowych o mocy 200 kW wynosi ok. 5 Mg.

## 5. Wnioski

Przeprowadzono analizę techniczną i ekonomiczną dwóch możliwych do zastosowania rodzajów zasobników energii - superkondensatorowych oraz bezwładnikowych z kołem zamachowym, umożliwiających przejmowanie energii hamowania pociągów i zwrot tej energii podczas rozruchu.

### a) Zasobniki kondensatorowe

- Zasobniki montowane w pociągu, o pojemności 2 x 18 F o energii ok. 1,2 kWh z przekształtnikami IGBT umożliwiające pełne wykorzystanie energii użytecznej kondensatorów poprzez regulację napięcia ładowania do 850 V oraz rozładowania do 450 V;
- Zasobników stacjonarnych usytuowanych na stacjach nie posiadających zespołów zasilających o pojemności ok. 50 F zasilanych przez przekształtniki IGBT lub styczniki. Napięcie będzie wówczas równe napięciu sieci trakcyjnej w miejscu odległym od podstacji zasilającej. Zasobnik będzie więc przejmować nadmiar energii podczas hamowania pociągu, a zwracać energię podczas rozruchu. Różnica napięć zależna od natężenia ruchu będzie wynosić ok. 150 – 250 V, a energia użyteczna zasobnika ok. 40 kWh.

Wydaje się, że ze względu na brak ingerencji w układ elektryczny wagonów oraz brak dodatkowej masy pociągu (dodatkowe zużycie energii) korzystniejszym rozwiązaniem będzie zastosowanie zasobników stacjonarnych.

### b) Zasobniki bezwładnikowe

Zasobniki z kołem zamachowym o mocy 5 x 200 kW montowane na linii zasilającej (wg. wstępnych danych testowych metra Londyńskiego) spełniają również zadanie oszczędności energii. Wymagają jednak aktualnych danych eksploatacyjnych.

### c) Należy rozpatrzyć również inne rozwiązania z nowoczesnymi akumulatorami stosowanymi obecnie w samochodach z napędem hybrydowym oraz w autobusach zwracając uwagę zwłaszcza na koszty i trwałość oraz straty na rezystancji baterii.



## **Bibliography / Literatura**

- [1] Chris Jackson: „Szybkoobrotowe koła zamachowe tną rachunki za energię” [tłumaczenie polskie] *Railway Gazette Internationale*. Kwiecień 2001 r.
- [2] Zygmunt Giziński, Marcin Żuławnik, Paweł Giziński: „Kondensatorowe zasobniki energii w pojazdach komunikacji miejskiej.” *Materiały Konferencji SEMTRAK*. Zakopane 2010 r.
- [3] Zygmunt Giziński, Marcin Gąsiewski, Paweł Giziński: „Zasobnikowe układy zasilania w pojazdach szynowych,,” *Pojazdy Szynowe* nr. 3 2011 r.
- [4] Zygmunt Giziński, Adam Szelaż, Paweł Giziński: „Zasobniki sieciowe,,” wyd.: *Polski Produkt Przyszłości*. Październik 2011 r. [www.parp.gov.pl](http://www.parp.gov.pl)
- [5] Zygmunt Giziński: „Super kondensatorowe zasobniki dla tramwajów i trolejbusów”. *Referaty wygłoszone na konferencji w Kownie (2008 r.) oraz na spotkaniu Grupy Roboczej Unii Europejskiej [-541 COST] do spraw super kondensatorów*. Liege - Belgia. 2006 r.
- [6] *Materiały reklamowe firmy URENCO POWER: e-mail: cad@cap.urencoco.uk lub www.theflywell.com*
- [7] David Kelsall: „Zastosowanie magazynu energii koła zamachowego w systemach komunikacji masowej. 29. 06 1999 r.
- [8] Colin Davies: „Nowy system zasilania stawia londyńskie metro w czołówce światowej”