

Zasobnikowe układy zasilania w pojazdach trakcyjnych

W niniejszym artykule znajdują się wyniki badań układu zasobnika kondensatorowego przeprowadzone przez Zakład Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Superkondensator wraz z systemem sterowania został zaprojektowany, wykonany i zabudowany na trzech pojazdach trakcyjnych: trolejbusie Jelcz PR110 z napędem asynchronicznym w Lublinie, trolejbusie Jelcz M121E z napędem prądu stałego w Kownie oraz w tramwaju 116N również z napędem prądu stałego, który jest eksploatowany w Warszawie. W każdym z tych trzech przypadków została potwierdzona celowość zastosowania zasobnika.

1. Wstęp

Rzeczywista technologia produkcji kondensatorów dużej pojemności doprowadziła do opracowania ogniw 3000F przy napięciu 2,5÷2,7V.

Z takich ogniw budowane są moduły na napięcie 54÷390V o pojemności 150F÷18F.

Łączenie szeregowo takich modułów przy zastosowaniu zabezpieczeń napięciowych zapobiegających przekroczeniu maksymalnej wartości napięcia ogniw ok. 2,8V umożliwia wykonanie zasobników energii na napięcie 750÷780V dla pojazdów komunikacji miejskiej.

Energia użyteczna takich zasobników wynosi ok 2MJ.

Możliwość wykorzystywania pełnej wartości energii użytecznej zasobnika podczas rozruchu i hamowania pojazdu jest zależne od sposobu dystrybucji tej energii podczas jazdy pojazdu.

Wykorzystanie całej energii użytecznej zasobnika kondensatorowego możliwe jest w systemie regulacyjnym opracowanym i wdrożonym przez Instytut Elektrotechniki (Patent).

Instytut Elektrotechniki prowadzi prace nad zastosowaniem kondensatorowych zasobników energii od ponad 5 lat. Prace te doprowadziły do opracowania i wdrożenia zasobnikowych układów dla następujących pojazdów:

- układ dla trolejbusu Jelcz PR110 z napędem falownikowym AC-165kW i zasobnikiem 8,9F – 780V dla MPK Lublin – 2007r.
- układ dla trolejbusu Jelcz M121E z napędem silnikiem DC120kW i zasobnikiem 8,9F – 780V dla Autrolis w Kownie – 2008r.
- układ dla tramwaju 116N z napędem DC 4x50kW z zasobnikiem 10F – 760V dla Tramwajów Warszawskich – 2009r.

- kontenerowy zasobnik sieciowy 8,9F – 780V dla tramwajowej linii wybiegowej Tramwajów Elbląskich w Elblągu – 2010r.
- podstawowy zasobnik 10F – 760V dla sieci trolejbusowej PKT Gdynia – 2011r.

2. Kondensatorowe zasobniki energii

Najbardziej popularne zasobniki – baterie elektrochemiczne (akumulatory) przy dobrych parametrach energetycznych niestety mają szereg wad np.: duża masa, stosunkowo niska wydajność prądowa, krótka żywotność. Jednym z ostatnich osiągnięć dających możliwości do gromadzenia energii jest superkondensator. Łączy on w sobie cechy akumulatorów oraz zwykłych kondensatorów, a swoje zalety zawdzięcza bardzo dużej pojemności, nawet kilku tysięcy faradów! Napięcie maksymalne pojedynczego kondensatora nie przekracza 2,7V i dlatego trzeba je łączyć w stosy szeregowo.

Firmy, które zajmują się produkcją superkondensatorów oferują gotowe moduły połączonych szeregowo ogniw z wyrównywaniem napięć na poszczególnych celkach, co umożliwia wykorzystanie zasobnika jako gotowego podzespołu.

Superkondensatory produkowane są obecnie przez szereg firm i dostarczane w blokach modułowych:

- | | | |
|------------|------|---------|
| – Maxwell | 390V | - 17,8F |
| – Batscap | 54V | - 150F |
| – LS Mtron | 190V | - 41,7F |

Z modułów takich budowane kondensatorowe zasobniki energii dla pojazdów komunikacji miejskiej.

Zestawienie porównawcze baterii kondensatorowych

Tab. 1

Parametry	MAXWELL 2x HTM390	BATSCAP 14x M54V150F	LS MTRON 4x LS 190V/41.7F
Znamionowe napięcie pracy	780V	756V	760V
Znamionowa pojemność	8.9F	10.7F	10.4F
Oporność szeregową DC	~130mΩ	~56mΩ	~115mΩ
Energia zasobnika	752Wh	849Wh	834Wh
Dostępna energia ($U_{zn} \div \frac{1}{2} U_{zn}$)	564Wh	634Wh	625Wh
E_{max} . odniesiona do masy	2.28Wh/kg	3.57Wh/kg	2.00Wh/kg
Żywotność	>1 000 000 cykli	>1 000 000 cykli	>1 000 000 cykli
Min. temperatura pracy	-40°C	-30°C	-40°C
Max. temperatura pracy	+65°C	+60°C	+65°C
Stopień IP	IP65	IP65	IP65
Masa	~330kg	~238	~416kg

Parametry katalogowe modułów kondensatorowych LS Mtron

Tab. 2

Parametry	LS 190V/41.7F
Maksymalne napięcie pracy	190V
Znamionowa pojemność	41.7F
Tolerancja pojemności	b.d.
Oporność szeregową DC	28.8mΩ
Oporność szeregową 100Hz	b.d.
Dostępna energia od U_{zn} do $\frac{1}{2} U_{zn}$	156.81Wh
Energia max. odniesiona do masy	2.01Wh/kg
Energia max. odniesiona do objętości	2.11Wh/l
Maksymalny prąd ciągły	150A
Maksymalny prąd	400A (~10 sec.)
Żywotność	>1 000 000 cykli
Napięcie izolacji AC	5 250V
Minimalna temperatura pracy	-40°C
Maksymalna temperatura pracy	+65°C
Stopień IP	IP65
Masa	104kg
Wymiary (długość / szerokość / wysokość)	918 / 453 / 238mm

W trolejbusach zastosowaliśmy po dwie szeregowo połączone baterie firmy Maxwell 390V – 17,8F a w tramwaju 116N 4 szeregowo połączone baterie f-my LS Mtron 190V – 41,7F.

3. Energia rekuperacji pojazdów

Głównym kryterium doboru energii użytecznej zasobnika kondensatorowego jest akumulacja energii kinetycznej pojazdu podczas hamowania. Dla warunków komunikacji miejskiej można przyjąć kryterium akumulacji energii przy hamowaniu z prędkości 50km/h pojazdu średnio załadowanego.

Podczas hamowania w tramwajach wieloczołowych o masie 30÷40Mg osie toczne hamowane są za pomocą hamulców mechanicznych pochłaniających od 0,2÷0,3 energii kinetycznej tramwaju.

Jednocześnie można założyć, że ok. 25÷30% energii hamowania mogą odebrać inne pojazdy znajdujące się na tym samym odcinku zasilania. Możliwa do rekuperacji energia pomniejszona jest o opory ruchu i sprawność układu przetwarzania. Sumaryczną sprawność można określić na ok. 0,80÷0,85.

Zasobnik kondensatorowy powinien być dobrany zgodnie z normami na maksymalną wartość napięcia sieci trakcyjnej – 720V i minimalną wartość – 400V. Energia zasobnika wynosi więc ok. 180kJ/1F, czyli ok. 0,07kWh/1F.

l.p.	Pojazd	Masa własna [Mg]	Obciążenie [Mg]	Energia kinetyczna [kWh]	Energia rekuper. [kWh]	Pojemność "C" [F]
1	Trolejbus	12	6	0,43	0,36	5,2
2	Tramwaj czteroosiowy	17	10	0,72	0,61	8,7
3	Tramwaj trójczłonowy	30	15	1,2	1,00	14,3
3a*	Tramwaj trójczłonowy 0,75	30	15	0,8	0,68	10,0
4	Tramwaj pięcioczłonowy	40	18	1,55	1,32	19,0
4a*	Tramwaj pięcioczłonowy 0,75	40	18	1,04	0,88	11,0

* 25% energii zwrócona jest do sieci trakcyjnej lub tracona w hamulcach mechanicznych

Przedstawione w tabeli 3 wartości niezbędnej pojemności zasobnika powinny być skorygowane koniecznością zmniejszenia maksymalnej wartości prądu pobieranego z sieci trakcyjnej podczas rozruchu a także maksymalną wartością prądu obciążenia kondensatorów ciągła i krótkotrwała.

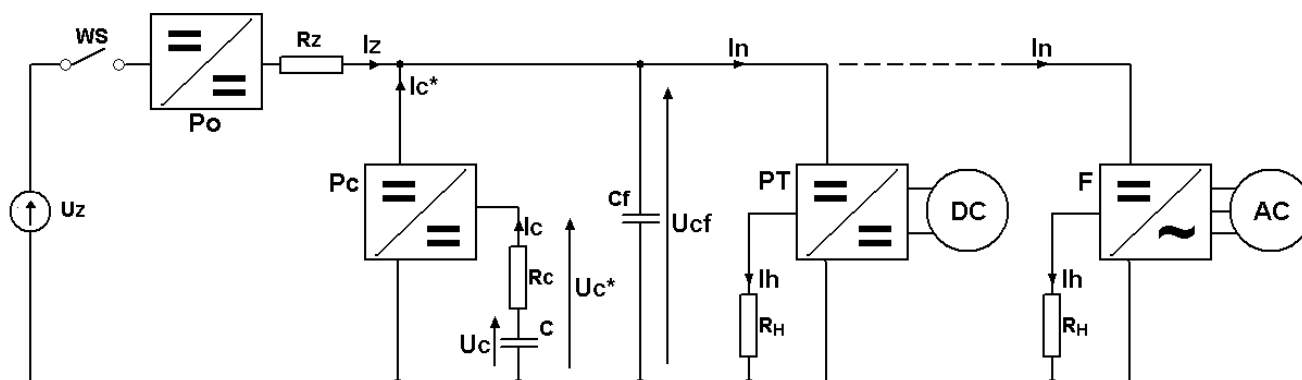
4. Układ regulacyjny pojazdu z kondensatorowym zasobnikiem energii

Schemat ideowy układu elektrycznego pojazdu napędzanego silnikami prądu stałego lub asynchronicznymi z kondensatorowym zasobnikiem energii oraz przekształtnikami regulującymi dystrybucję energii zasobników pokazana jest na rys 1

Działanie układu regulacyjnego

Dla wykorzystania pełnej energii użytecznej zasobnika odpowiadającej różnicy energii kondensatorów dla maksymalnego napięcia U_n i minimalnej dla napięcia $0,5 U_n$ zastosowano specjalny system dystrybucji energii zasobnika (Patent IEL).

System ten uwzględnia prędkość pojazdu – zmienną wartość napięcia sieci trakcyjnej, maksymalną żadaną wartość prądu sieci trakcyjnej, maksymalną dopuszczalną krótkotrwałą wartość prądu kondensatorów, a także wymaganą dla pojazdów trakcyjnych maksymalną wartość momentu hamującego silników podczas hamowania z dużych prędkości.



Rys. 1 Schemat układu napędowego pojazdu z silnikiem DC / AC

- U_z – napięcie sieci trakcyjnej
- R_z – rezystancja sieci (przyjęto do obliczeń 0,1?)
- WS – wyłącznik szybki
- P_o – przetwornik hamowania rekuperacji
- P_c – przetwornik zasobnika kondensatorowego
- R_c – rezystancja zasobnika kondensatorowego (przyjęto do obliczeń 0,15?)
- P_T – przetwornik DC/DC – dla silnika prądu stałego
- F – falownik DC/AC - dla silnika asynchronicznego
- R_H – opornica hamowania
- I_z – prąd sieci trakcyjnej
- I_n – prąd przetwornika napędu
- I_c^* – prąd zasobnika kondensatorowego odbierany lub przekazywany do napędu

Rozruch pojazdu

Przekształtniki PT lub F regulują wartość prądu silników. Prąd pobierany przez napęd narasta liniowo osiągając wartość maksymalną równą sumie prądów rozruchu silników przy prędkości znamionowej pojazdu.

Przekształtnik PC reguluje wartość prądu I_{c^*} dostarczonego do napędu wspomagając sieć trakcyjną. Dla $U_c < U_z$ przekształtnik PC podwyższa wartość napięcia dostarczanego do napędu aż do rozładowania kondensatorów do U_{min} . Ograniczając maksymalną wartość prądu pobieranego z sieci trakcyjnej.

Przykładowy przebieg takiej regulacji dla trolejbusu z napędem silnikami DC – 120kW pokazany jest na rys 2.

dla rozruchu do prędkości $V = 60\text{km/h}$ otrzymujemy:

droga rozruchu pojazdu	$L_r = 200\text{m}$
energia pobrana z zasobnika	$E_{cr} = 1540\text{kWs}$
energia pobrana z sieci zasilającej	$E_{zr} = 1425\text{kWs}$
energia pobrana do napędu	$E_{nr} = 2872\text{kWs}$

dla hamowania z prędkości $V = 55\text{km/h}$ otrzymujemy:

droga hamowania pojazdu	$L_h = 117\text{m}$
energia zgromadzona w zasobniku	$E_{ch} = 1540\text{kWs}$
energia pobrana z napędu	$E_{nh} = 1664\text{kWs}$
energia oddana do sieci zasilającej	$E_{zh} = 49\text{kWs}$
energia stracona w R_H	$E_{hh} = 0\text{kWs}$

Energia pobrana przez napęd wynosi ok 2900kWs

Energia pobrana z zasobnika wynosi ok 1570kWs

Energia pobrana z sieci trakcyjnej wynosi ok 1450kWs

Hamowanie

Podczas hamowania dla uzyskania dużej wartości momentu silników napięcie filtru wejściowego U_{CF} otrzymywane jest na poziomie wyższym niż wartość napięcia sieci trakcyjnej $U_{CF} = 700 \div 750\text{V}$. Wartość prądu zwracanego do sieci trakcyjnej i zasobnika kondensatorowego regulowane są przekształtnikami PO i PC.

Zastosowany system regulacyjny ma za zadanie dostarczenie do zasobnika energii zapewniające naładowanie kondensatorów do maksymalnej dopuszczalnej wartości napięcia.

Przykładowy przebieg hamowania trolejbusu z prędkości 55km/h pokazane są na rys 2.

Energia zwrócona przez napęd wynosi ok 1700kWs

Energia zgromadzona w zasobniku wynosi ok 1570kWs

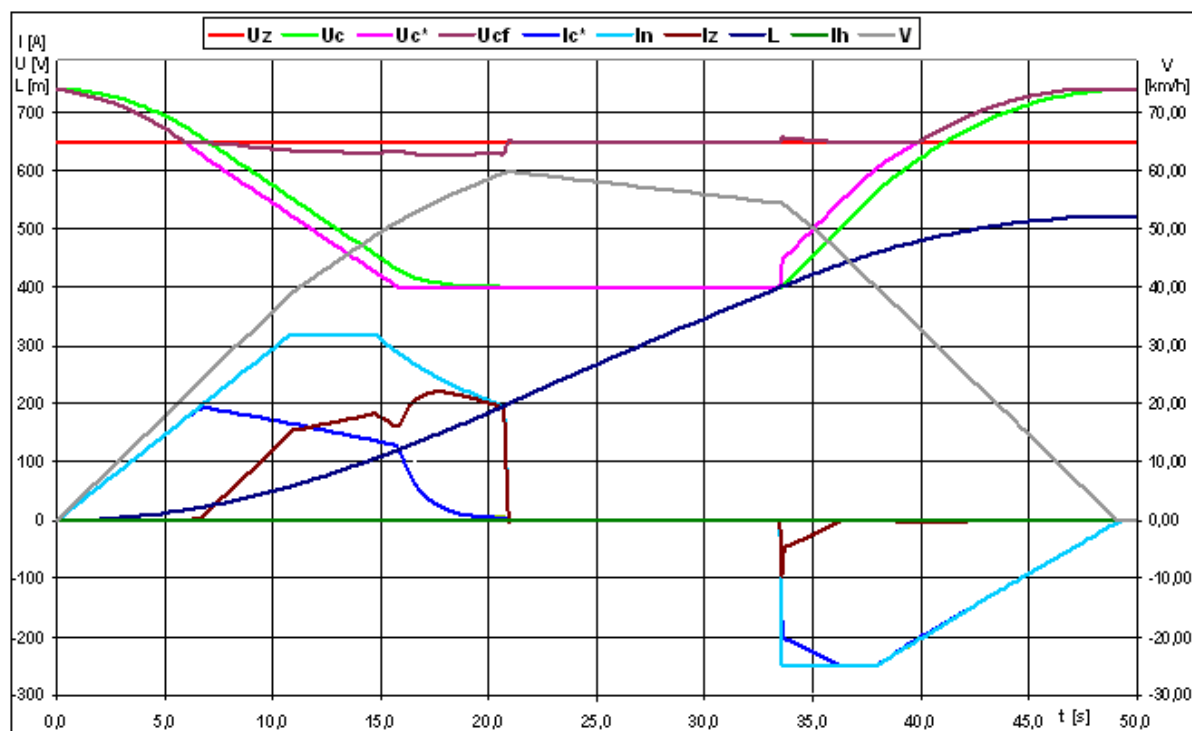
Energia zwrócona do sieci trakcyjnej wynosi ok 12kWs

Rys. 2 Rozruch i hamowanie trolejbusu

(silnik DC, T_o – sterowany, $m = 10 + 6\text{Mg}$, $L = 520\text{m}$, $C = 8\text{F}$, $U_z = 650\text{V}$, $U_{c_0} = 740\text{V}$, $I_{r_{max}} = 320\text{A}$, $I_{h_{max}} = 250\text{A}$)

Oznaczenia:

U_z	– napięcie sieci trakcyjnej
U_{cf}	– napięcie kondensatora filtru
U_c	– napięcie kondensatora zasobnika
U_{c^*}	– napięcie zasobnika
I_z	– prąd sieci trakcyjnej
I_n	– prąd zespołu napędowego
I_{c^*}	– prąd przekształtnika zasobnika
I_h	– prąd rezystora hamowania
L	– droga pojazdu
V	– prędkość pojazdu

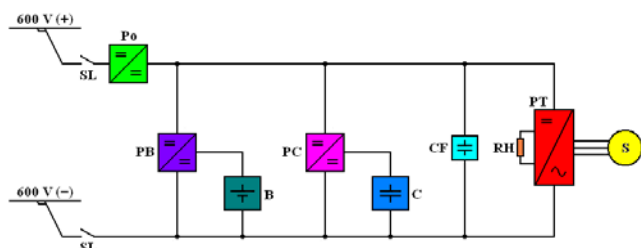


5. Badania ruchowe i eksploatacyjne zrealizowanych układów

5.1. Trolejbusy

Dla Kowna dla trolejbusu Jelcz M121 z napędem silnikiem DC=120kW wykonano i dostarczono zasobnik 8,9F-780V wraz z układem regulacyjnym.

Dla MPK Lublin wykonano i zbadano trolejbus Jelcz PR110 z zasobnikiem napędzanym silnikiem AC165kW kondensatorowym 8,9F-780V oraz dodatkowo z zasobnikiem akumulatorowym ok 6kWh umożliwiającym przejazd odcinka 2÷3km bez zasilania z sieci trakcyjnej.



Oznaczenia:

SL	Styczniki liniowe
PT	Przetwornik trakcyjny DC/DC (lub falownik)
S	Silnik trakcyjny prądu stałego DC (lub asynchroniczny AC)
RH	Opornik hamowania
CF	Kondensator filtru
Po	Przetwornik odzysku energii do sieci trakcyjnej
PC	Przetwornik zasobnika kondensatorowego
C	Zasobnik kondensatorowy
PB	Przetwornik zasobnika akumulatorowego
B	Zasobnik akumulatorowy

Rys.3 Schemat blokowy obwodu głównego z zasobnikami kondensatorowym i akumulatorowym

(Dla Autrolis Kowno schemat jest podobny tylko bez baterii akumulatorów)

Przykładowe przebiegi wielkości elektrycznych pokazane są na rys 4-6

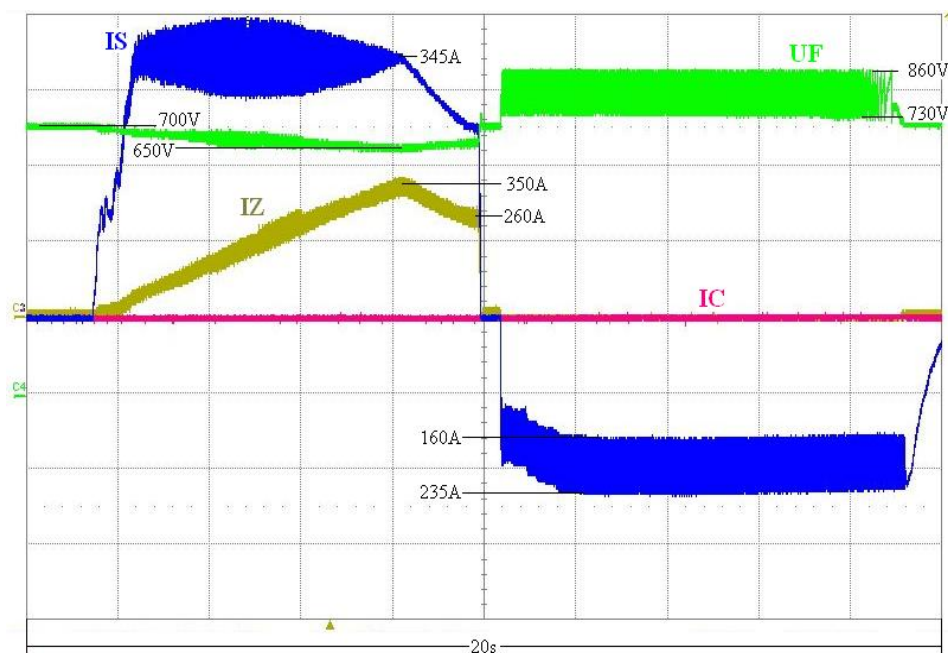
Badania ruchowe i eksploatacyjne trolejbusów z kondensatorowym zasobnikiem energii 8.9F, 780V wykonano:

- W Lublinie z falownikowym układem napędowym o mocy silnika 165kW w okresie czerwiec – październik 2007 roku. Trolejbus podczas prób obciążony był dodatkową masą 8Mg. W MPK wykonano również badania z dodatkowym akumulatorowym zasobnikiem energii.
- W Kownie z przekształtnikowym (DC/DC) układem regulacyjnym o mocy silnika 120KW w okresie lipiec – wrzesień 2008 roku i przekazano trolejbus do normalnej eksploatacji.

Przykładowe przebiegi napięć i prądów dla jazdy trolejbusu z zasobnikiem kondensatorowym pokazane są na oscylogramach 1 ÷ 3.

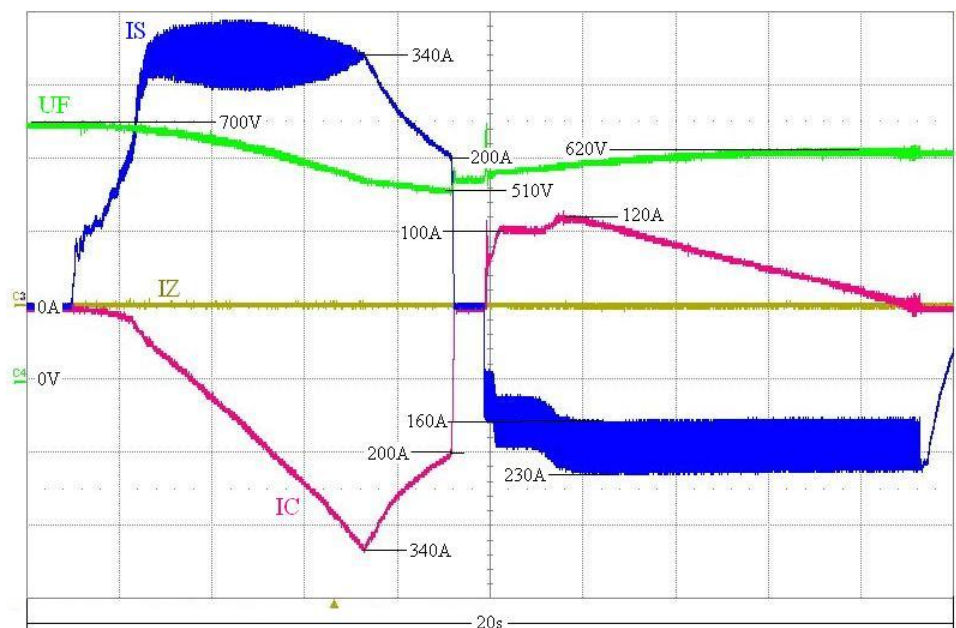
Oscylogram osc.1 przedstawia przebiegi dla jazdy bez kondensatorowego zasobnika energii. Maksymalna prędkość trolejbusu wynosiła ok. 50km/h. Średnia wartość prądu silnika (IS) podczas rozruchu wynosi ok. 345A. Prąd pobierany z sieci trakcyjnej (IZ) narasta liniowo i osiąga wartość ok. 350A przy prędkości ok. 36km/h. Energia pobrana z sieci trakcyjnej podczas rozruchu wynosi ok. 0,2kWh, a dla jazdy do V = 45km/h wynosi ok. 0,3kWh. Podczas hamowania energia kinetyczna trolejbusu wytracana była w opornicy hamowania.

Osc.1 Przejazd trolejbusu zasilanego z sieci trakcyjnej bez zasobnika kondensatorowego



Legenda:

IS – prąd silnika,
IC – prąd zasobnika kondensatorowego,
IZ – prąd sieci trakcyjnej,
UF – napięcie kondensatora filtru wejściowego przetwornika DC/DC

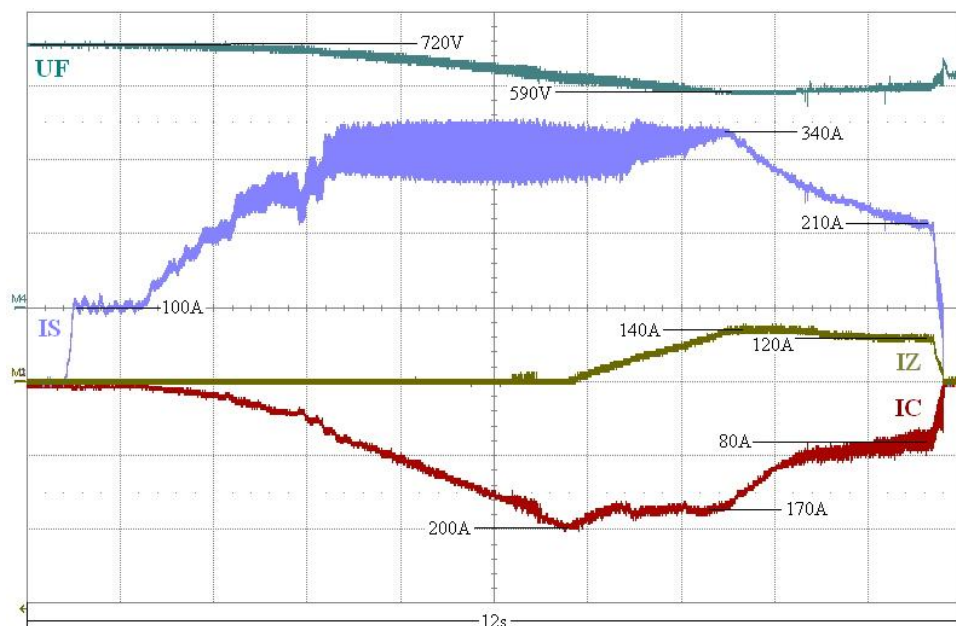


Osc.2 Przejazd trolejbusu bez sieci zasilanego z zasobnika kondensatorowego

Legenda:

*IS – prąd silnika,
IC – prąd zasobnika kondensatorowego,
IZ – prąd sieci trakcyjnej,
UF – napięcie kondensatora filtru wejściowego przekształtnika DC/DC*

Oscylogram osc.2 przedstawia przebiegi prądów i napięć podczas jazdy bez zasilania z sieci trakcyjnej na ulicy w Kownie. Początkowa wartość napięcia zasobnika kondensatorowego wynosi 700V. Podczas rozruchu z prądem silnika ~340A kondensator rozładowuje się do ok. 550V, a przy dalszej jeździe do 510V. Maksymalna wartość prądu pobranego z kondensatora wynosi ~340A. Energia pobrana z kondensatora wynosi ~0.26kWh. Podczas hamowania zasobnik kondensatorowy został doładowany do wartości napięcia ok. 620V. Energia zwrócona podczas hamowania wynosi ~0.14kWh.



Osc.3 Przejazd trolejbusu zasilanego z sieci trakcyjnej i zasobnika kondensatorowego

Legenda:

*IS – prąd silnika,
IC – prąd zasobnika kondensatorowego,
IZ – prąd sieci trakcyjnej,
UF – napięcie kondensatora filtru wejściowego przekształtnika DC/DC*

Wnioski:

Badania ruchowe i eksploatacyjne trolejbusów z napędem falownikowym zasilającym silnik asynchroniczny AC o mocy 165kW oraz przekształtnikowym zasilającym silnik prądu stałego DC o mocy 120kW wykazały prawidłową pracę i regulację kondensatorowego układu zasilania napędu współpracującego z siecią trakcyjną.

a) Podczas jazdy trolejbusu nieobciążonego (12Mg), przy zasilaniu z sieci trakcyjnej i zasobnika kondensatorowego (osc.3) następuje:

- zmniejszenie wartości maksymalnej prądu pobieranego z sieci trakcyjnej z 340A do ok. 140A;
- dla rozpędzenia trolejbusu (pustego) do prędkości ~45km/h, przy wyższym napięciu zasobnika od napięcia sieci, ok. 70% energii (potrzebnej na napęd) pobranej jest z zasobnika kondensatorowego, a zaledwie 30% z sieci trakcyjnej;

- w przypadku trolejbusu obciążonego udział energii pobranej z sieci trakcyjnej wzrośnie, a także zwiększy się wartość maksymalnego prądu pobranego z sieci trakcyjnej.
- a) Podczas jazdy trolejbusu obciążonego masą pasażerów (12+8Mg), przy wartości napięcia sieci ~600V, z prądem rozruchu ~320A :
 - maksymalna wartość prądu pobranego z sieci trakcyjnej (przy $V \geq 30\text{km/h}$) wynosi ok. 260A;
 - maksymalna wartość prądu pobranego z zasobnika kondensatorowego wynosi ok. 125A;
 - zmniejszenie wartości maksymalnej prądu pobranego z sieci z ok. 330A do ok. 260A.
- b) Podczas badań w Kownie trolejbusu znajdującego się w normalnej eksploatacji (ze zmiennym obciążeniem, profilem trasy, sposobem jazdy i wartością napięcia sieci) uzyskano następujące wyniki:
 - stosunek poboru energii z sieci trakcyjnej do energii pobranej przez napęd i obwody pomocnicze ~0,68;
 - stosunek poboru energii z zasobnika kondensatorowego do energii pobranej przez napęd i obwody pomocnicze ~0,32;
 - stosunek energii zwróconej do zasobnika kondensatorowego do energii pobranej z sieci trakcyjnej ~0,35.
- c) Zastosowanie kondensatorowych zasobników energii umożliwia więc uzyskanie w normalnej eksploatacji oszczędności energii 30÷35%, czyli zgodnie z przyjętymi założeniami.
- d) Trolejbus z zasobnikiem energii ~9F może przejechać bez zasilania z sieci trakcyjnej, z opuszczonymi odbierakami prądu odcinek ok. 200÷300m (osc.2). Umożliwia to, w przypadku awarii, objazd uszkodzonego odcinka sieci trakcyjnej, a także jazdy po zajezdni podczas manewrów bez konieczności podłączania odbieraków do sieci.

5.2 Tramwaj 116N

Napęd tramwaju stanowią silniki 50kW - 300V połączone po dwa silniki w grupie. Zastosowano zasobnik kondensatora 10F – 760V f-my LS Mtron.

Działanie układu podobne z przedstawionym w punkcie 4.

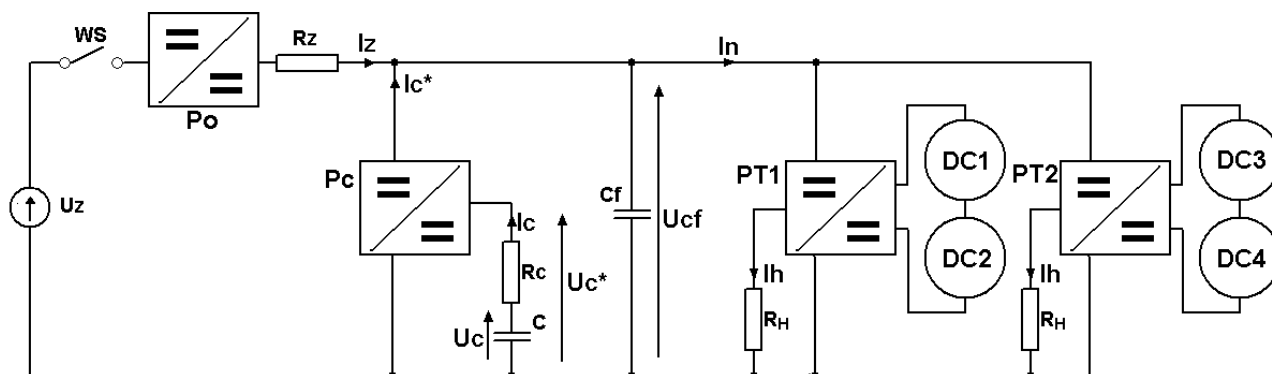
Uzyskane podczas badań ruchowych przebiegi wielkości elektrycznych podczas rozruchu i hamowania pokazane są na rys 5÷10.

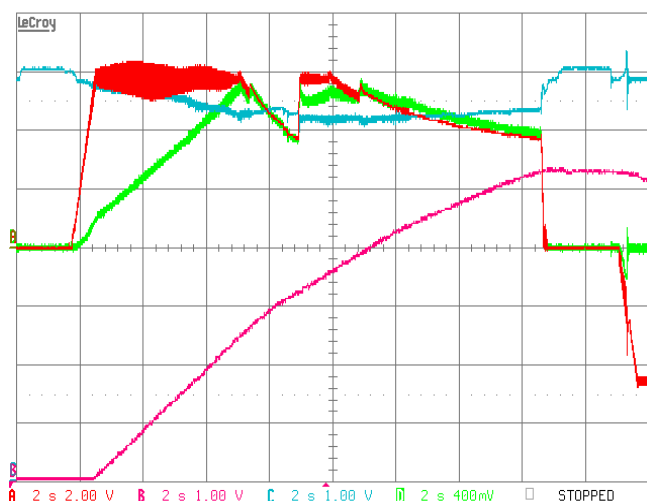
Rysunek 5 i 6 przedstawia przebieg dla rozruchu i hamowania bez wspomaganie z zasobnika kondensatorowego.

Oznaczenia:

- U_z – napięcie sieci trakcyjnej
- R_z – rezystancja sieci (przyjęto do obliczeń 0,1?)
- WS – wyłącznik szybki
- P_o – przekształtnik hamowania rekuperacji
- P_c – przekształtnik zasobnika kondensatorowego
- R_c – rezystancja zasobnika kondensatorowego (przyjęto do obliczeń 0,15?)
- $PT1$ – przekształtnik DC/DC – dla pierwszej grupy silników prądu stałego
- $PT2$ – przekształtnik DC/DC – dla drugiej grupy silników prądu stałego
- R_H – opornica hamowania
- I_z – prąd sieci trakcyjnej
- I_n – prąd przekształtnika napędu
- I_c^* – prąd zasobnika kondensatorowego odbierany lub przekazywany do napędu

Rys.4 Schemat układu napędowego tramwaju 116N

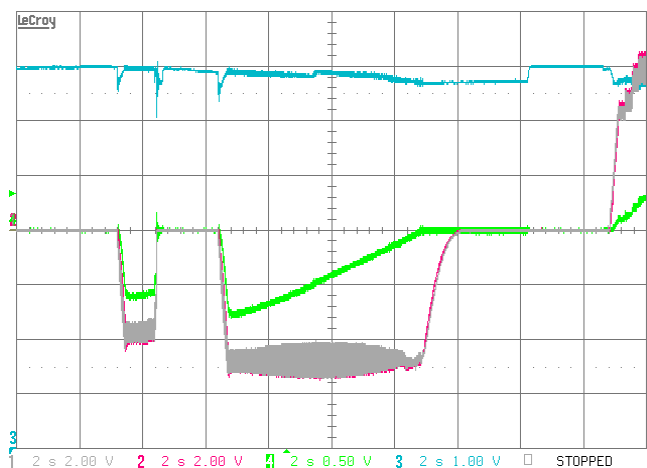




Oznaczenia:

I_S – prąd grupy silników 100A/dz.
 I_Z – prąd sieci trakcyjnej 200A/dz.
 U_Z – napięcie sieci trakcyjnej 100V/dz.
 V – prędkość tramwaju 8km/h/dz.
Skala czasu 2s/dz.

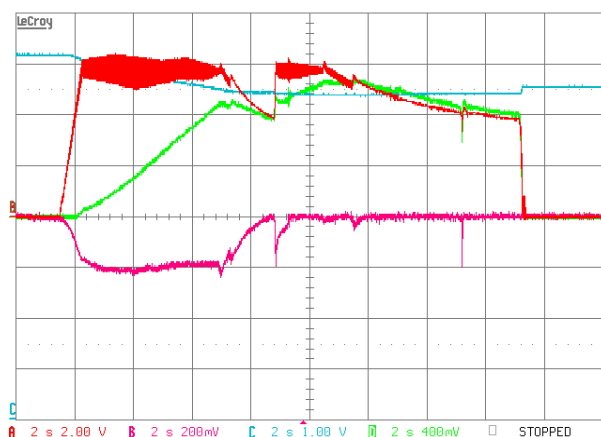
Rys.5 Rozruch do ok. 44km/h, $U_Z = 710V$, $I_S = 2x 290A$



Oznaczenia:

I_{S1} – prąd I grupy silników 100A/dz.
 I_{S2} – prąd II grupy silników 100A/dz.
 I_Z – prąd sieci trakcyjnej 250A/dz.
 U_Z – napięcie sieci trakcyjnej 100V/dz.
Skala czasu 2s/dz.

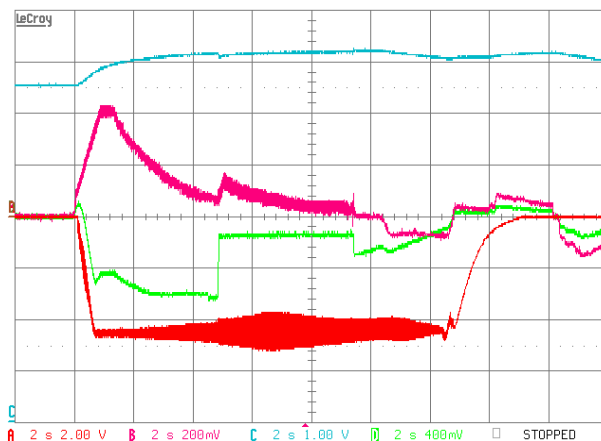
Rys.6 Hamowanie z $V = 35km/h$, $U_Z = 700V$, $I_S = 2x 230A$



Oznaczenia:

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

Rys.7 Rozruch tramwaju



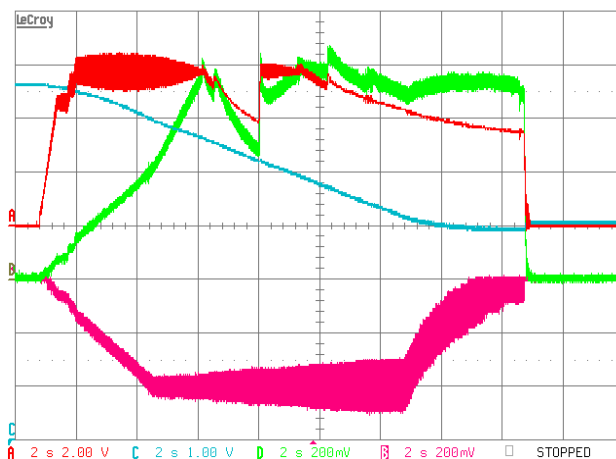
Oznaczenia:

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

Rys.8 Hamowanie tramwaju

Rysunek 7 i 8 przedstawia podobne przebiegi przy bezpośrednim włączeniu zasobnika kondensatorowego

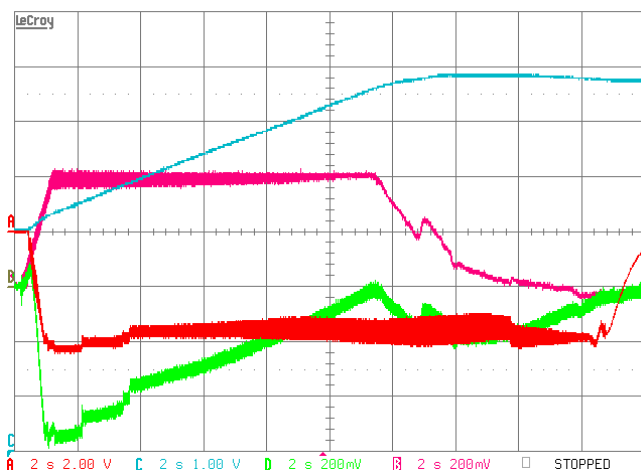
Rysunek 9 i 10 przedstawia przebiegi przy regulacji pracy zasobnika wg patentu IEL.



Oznaczenia:

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

Rys.9 Rozruch tramwaju $I_S = 290A$, $U_Z = 650V$, $U_{C0} = 670V$



Oznaczenia:

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

Rys.10 Hamowanie tramwaju $I_s = 200A$, $U_Z = 650V$, $U_{Co} = 400V$

Wnioski z badań

1. Bezpośrednie włączenie zasobników kondensatorowych w układ napędowy tramwajów nieznacznie tylko obniża maksymalną wartość prądu sieci i przyjmuje tylko ok. 10% energii zwracanej przez tramwaj.
2. Zastosowany w pojazdach układ regulacyjny (wg patentu IEL) umożliwia:
 - ograniczenie do ok. 60% maksymalną wartość prądu pobranego z sieci trakcyjnej w stosunku do maksymalnej wartości prądu pobieranego przez napęd podczas rozruchu
 - zasobnik dostarcza ok. 30% energii pobranej przez napęd, podczas hamowania z prędkości ok. 50km/h zasobnik przejmuje ok 50% energii zwracanej przez silnik.

Wnioski:

1. Wykonane badania symulacyjne i eksploatacyjne pojazdów z zasobnikowymi układami wspomagającymi rozruch i akumulującym energię hamowania wykazały w pełni zasadność techniczną stosowania takich układów w pojazdach komunikacji miejskiej.
2. Opracowane układy z systemem regulacji wg patentu IEL skutecznie obniżają maksymalną wartość prądu sieci podczas rozruchu zmniejszając o 50% straty w sieci zasilającej i umożliwiając akumulację całej energii zwracanej przez silnik podczas hamowania pojazdu.
3. W tramwaju 116N uzyskano zmniejszenie zużycia energii ok 0,9kWh/km co przy rocznym przebiegu tramwaju 50tyś km daje oszczędność ok 45 MWh (ok 15 tys zł) nie licząc zmniejszenia kosztów pobieranych przez energetykę
4. Koszt układu zasobnikowego 10F – 760V wraz z przekształtnikowym układem regulacyjnym można oszacować na 120÷140 tys zł w tym koszt kondensatora wynosi ok 80÷90tyś zł. Zwrot nakładów nastąpi po ok 7÷8 latach.

Deklarowana żywotność kondensatorów wynosi ponad milion cykli w zakresie $U_n - 0,5U_n$ czyli przy dwóch rozruchach na 1km trwałość wyniesie ponad 10 lat.