

Magazyn energii jako urządzenie wspierające pracę podstacji trakcyjnej

Artur ROJEK¹, Marek SKRZYNIARZ²

Streszczenie

Jako projekt własny, zaprojektowano i zbudowano magazyn energii, który został umieszczony w laboratorium zwarciovym Instytutu Kolejnictwa, w podstacji trakcyjnej w Mińsku Mazowieckim. W artykule opisano konstrukcję magazynu energii, zasadę jego działania oraz przeprowadzone badania. Magazyn energii badano w warunkach laboratoryjnych oraz jako urządzenie wspierające pracę podstacji trakcyjnej i kabiny sekcyjnej.

Słowa kluczowe: magazyn energii, system zasilania trakcji elektrycznej, rekuperacja energii

1. Wstęp

Hamujący pojazd trakcyjny jest w stanie przekształcić energię kinetyczną na elektryczną, która może być oddana do systemu zasilania trakcji. Ta energia może być wykorzystana przez inny pojazd, który porusza się w pobliżu. W sytuacji, gdy nie ma w pobliżu pojazdów, energia jest przekazywana na rezystory hamujące umieszczone w pojeździe [3].

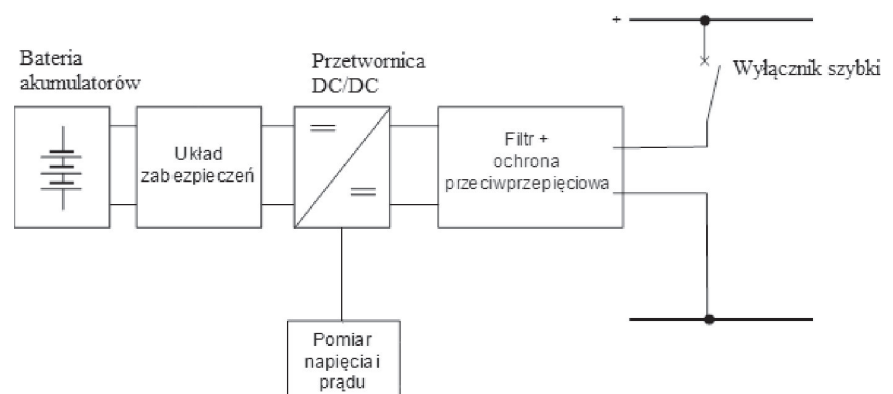
Obciążenie podstacji trakcyjnej zmienia się w sposób dynamiczny i zależy od ruchu pociągów. Wahania poboru mocy wynoszą od zera do kilku megawatów, co powoduje zmienne spadki napięcia w systemie zasilania trakcji oddziałujące na poziom napięcia na pantografie pojazdu [2].

Podstawową funkcją magazynu energii jest stabilizacja na zakładanym poziomie napięcia w sieci trakcyjnej. Magazyn energii jest zainstalowany w podstacji trakcyjnej i ogra-

nicza szczytowe wartości mocy pobieranej z systemu elektroenergetycznego [4]. Dodatkowo, magazyny gromadzą energię hamowania rekuperacyjnego, którą później oddają do sieci trakcyjnej w czasie zwiększonego obciążenia.

2. Budowa magazynu energii oraz parametry podzespołów

Magazyn energii składa się z baterii akumulatorów wraz z systemem zarządzania baterią akumulatorów (*Battery Management System* – BMS), układów balansowania i układów kontrolno-pomiarowych, przetwornicy DC/DC, zabezpieczenia zwarciovego i przepięciowego. Schemat blokowy magazynu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy magazynu energii elektrycznej [1]

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa; Kierownik Zakładu Elektroenergetyki; e-mail: arojek@ikolej.pl.

² Inż.; Instytut Kolejnictwa; Zakład Elektroenergetyki; e-mail: mskrzyniarz@ikolej.pl.

Magazyn energii jest zabezpieczony przed zwarciami za pomocą wyłącznika szybkiego prądu stałego. W przypadku, gdy zwarcie wystąpi na zaciskach wyjściowych magazynu energii, wyłącznik szybki zostanie wyzwolony samoczynnie i/lub przez zewnętrzny impuls z układów kontrolno-pomiarowych i systemów automatyki podstacji trakcyjnej. Zwarcia występujące w układzie baterii akumulatorów zostaną wyłączone przez zabezpieczenia zwarciovowe. Zwarcia lub prądy przeciążeniowe po stronie 3 kV wyłączane są przez wyłącznik BWSe-1000, a bateria akumulatorów jest zabezpieczona przez bezpieczniki. Akumulatory litowo-żelazowe charakteryzują się pojemnością równą 200 Ah, napięciem roboczym wynoszącym 2,8–4,0 V. Baterie akumulatorów są umieszczone na specjalnych stojakach spełniających wymagania dotyczące wytrzymałości izolacji (rys. 2), pozostałe parametry akumulatorów przedstawiono w tabelicy 1.



Rys. 2. Dwie z sześciu szaf baterii akumulatorów magazynu energii zainstalowanej w laboratorium zwarciovym Instytutu Kolejnictwa [1]

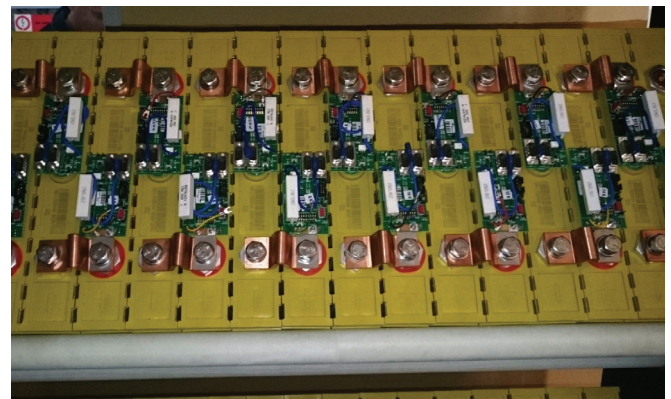
Parametry akumulatorów [1]

Znamionowy prąd rozładowania	200 A
Długostrwały prąd rozładowania	600 A
Impulsowy prąd rozładowania	2000 A
Znamionowy prąd ładowania	100 A
Maksymalny prąd ładowania	600 A
Żywotność baterii	≥ 5000 cykli
Temperatura pracy	-45 – +85°C
Masa	≤ 8,1 kg

Tabela 1

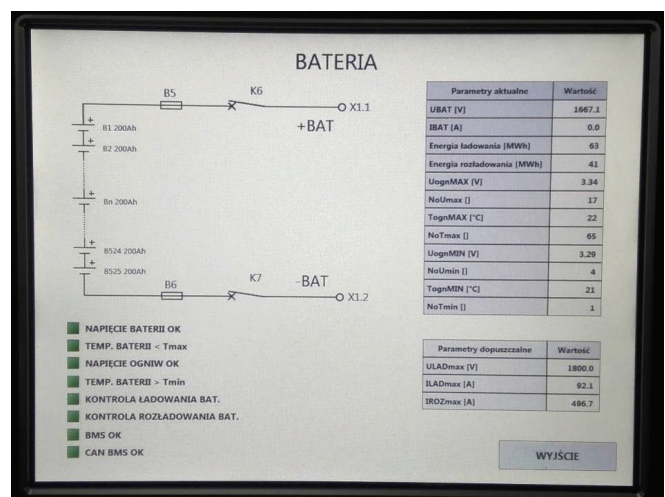
Cykl pracy baterii akumulatorów jest kontrolowany przez BMS, który kontroluje i mierzy następujące parametry:

- zabezpieczenie – określenie maksymalnego dopuszczalnego prądu ładowania i rozładowania,
- pomiar napięcia – wskazanie minimalnego i maksymalnego napięcia na ogniwach;
- pomiar temperatury każdego ogniwa,
- zabezpieczenie przed rozładowaniem i przeładowaniem,
- układ balansowania baterii akumulatorów (rys. 3),
- sterowanie.



Rys. 3. Układy balansowania baterii akumulatorów magazynu energii [1]

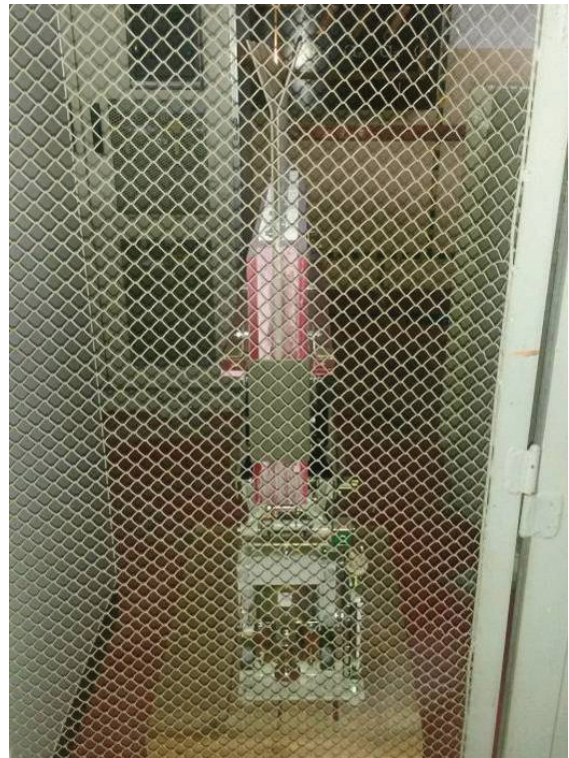
Dane pomiarowe zebrane przez system BMS są bezpośrednio przesyłane do przetwornicy DC/DC. Na ekranie przetwornicy DC/DC jest możliwe wyświetlenie wyszczególnionych informacji (rys. 4). Na rysunku 5 pokazano umiejscowienie przetwornicy DC/DC w laboratorium zwarciovym IK oraz jej panel kontrolny i sterowniczy (rys. 6). Na rysunkach 7 i 8 zaprezentowano wyłącznik szybki typu BWS-1000 oraz bezpieczniki i odłączniki na biegunach baterii kondensatorów. Parametry przetwornicy DC/DC przedstawiono w tabelicy 2.



Rys. 4. Widok panelu kontrolnego przetwornicy – przykładowe dane przesyłane przez BMS do przetwornicy [1]



Rys. 5. Przetwornica DC/DC-350 w laboratorium zwarciovym Instytutu Kolejnictwa [1]



Rys. 7. Wyłącznik szybki typu BWS-1000 [1]



Rys. 6. Panel kontrolny i sterowniczy przetwornicy DC/DC-350 [1]



Rys. 8. Bezpieczniki oraz odłączniki na biegunach baterii akumulatorów [1]

Tablica 2

Parametry przetwornicy DC/DC [1]

Napięcie wejściowe	3000 V DC
Prąd wejściowy	300 A
Zakres zmian napięcia wejściowego	2800 V – 4100 V DC
Zabezpieczenie wejścia	zabezpieczenie wewnętrzne – bezpieczniki topikowe i zabezpieczenie elektroniczne
Zabezpieczenie przed przepięciami	klasa OV3 zabezpieczenie przez warystor
Temperatura pracy	0°C do + 40°C
Moc wejściowa	1 MW/15 minut
Zakres zmian napięcia od strony baterii	1500 V – 2100 V DC
Prąd od strony baterii	do 600 A
Zabezpieczenie wyjścia od strony baterii: zabezpieczenie wewnętrzne	bezpieczniki topikowe w baterii i zabezpieczenie elektroniczne
Moc ciągła	około 350 kW
Moc wyjściowa od strony baterii	1 MW/15 minut

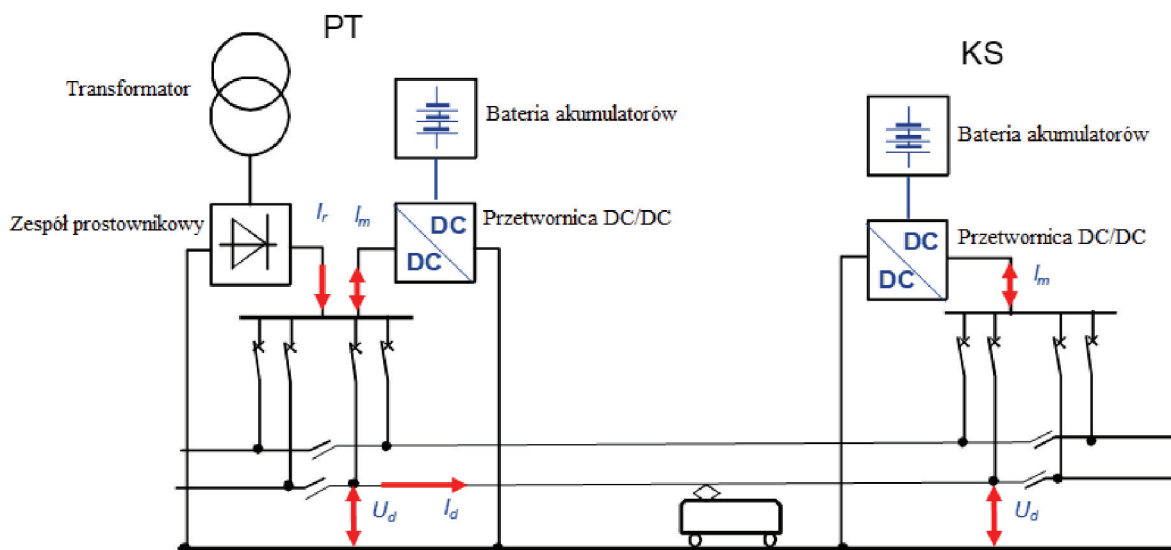
3. Sterowanie magazynem energii

Jak pokazano na rysunku 9, magazyn energii elektrycznej może być zainstalowany w podstacji trakcyjnej lub w kabinie sekcyjnej.

Sterowanie magazynem odbywa się przez wprowadzenie wartości napięć na panelu kontrolnym przetwornicy. O przejściu w tryb ładowania decydują wartości napięcia U_{c1} i U_{c2} (rys. 10). Tryb ładowania rozpoczyna się, gdy napięcie na wejściu magazynu od strony sieci trakcyjnej osiągnie wartość U_{c2} . Prąd ładowania jest tak dobierany przez układ sterujący magazynu, aby napięcie w sieci nie spadło poniżej

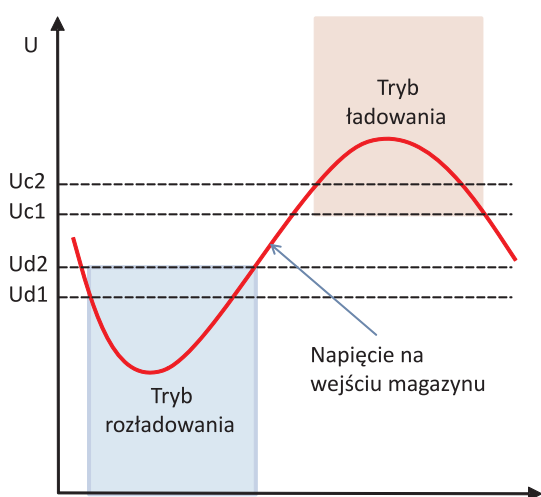
wartości U_{c2} . Maksymalna wartość prądu ładowania jest jednocześnie określana przez BMS baterii akumulatorów. Tryb ładowania trwa do chwili, w której napięcie w sieci trakcyjnej (na wejściu magazynu) nie spadnie poniżej poziomu określonego jako U_{c1} . Ponieważ U_{c1} jest niższe od U_{c2} , zapobiega to wyłączeniu funkcji ładowania w przypadku wahań napięcia w sieci trakcyjnej.

Tryb rozładowania magazynu energii rozpoczyna się, gdy napięcie na wejściu od strony sieci trakcyjnej spadnie poniżej wartości U_{d1} . Oznacza to również, że rozładowanie magazynu będzie realizowane przy braku napięcia w sieci trakcyjnej. Prąd magazynu jest dobierany automatycznie



Rys. 9. Miejsca włączenia magazynu energii w system zasilania trakcji elektrycznej: PT – podstacja trakcyjna, KS – kabina sekcyjna, I_d – sumaryczny prąd obciążenia zespołu prostownikowego i magazynu energii, I_m – prąd magazynu energii, U_d – napięcie na zaciskach od strony 3 kV magazynu energii – przetwornicy, I_r – prąd obciążenia zespołu prostownikowego [1]

tak, aby napięcie nie spadało poniżej U_{d1} . Stabilizacja napięcia U_{d1} jest możliwa dla zakresu prądu obciążenia nie przekraczającego maksymalnego prądu rozładowania określonego przez BMS. Magazyn pracuje w trybie rozładowania do czasu rozładowania baterii akumulatorów (spadku napięcia na ogniwach określanego jako minimalne) lub do momentu, w którym napięcie na wejściu magazynu wzrosło do wartości U_{d2} . Załączanie trybów pracy magazynu przedstawiono graficznie na rysunku 10.



Rys. 10. Tryby pracy magazynu energii (ładowanie/rozładowanie) w zależności od poziomu napięcia na zaciskach magazynu od strony sieci trakcyjnej [1]

4. Badania laboratoryjne magazynu energii

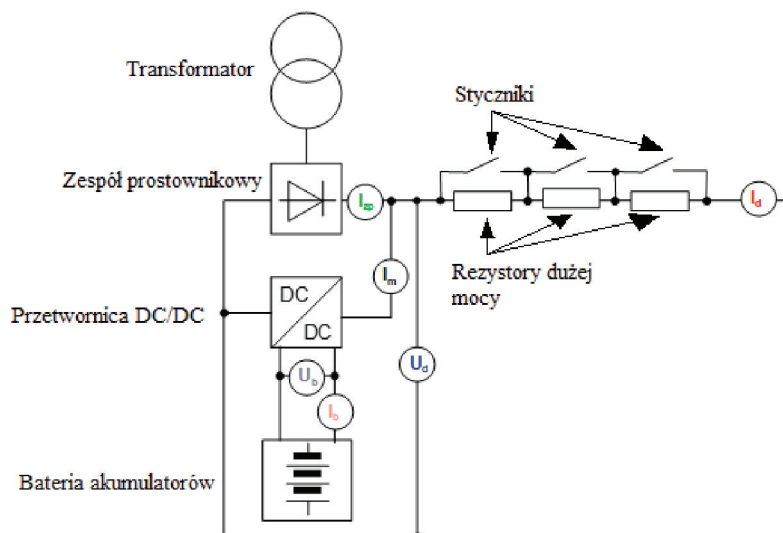
Badania laboratoryjne magazynu energii były wykonane przez pracowników Zakładu Elektroenergetyki w laboratorium zwarciowym Instytutu Kolejnictwa w Mińsku Mazowieckim. Na potrzeby badań stworzono układ pomiarowy (rys. 11), który składa się z zespołu prostownikowego, magazynu energii i rezystorów dużej mocy. Rezystory dużej mocy pełniły funkcję obciążenia. Zmiana parametrów obciążenia była możliwa dzięki stycznikom wpiętym w obwód, których załączenie powodowało zwieranie części rezystorów, dzięki czemu uzyskiwano zwiększone obciążenie magazynu.

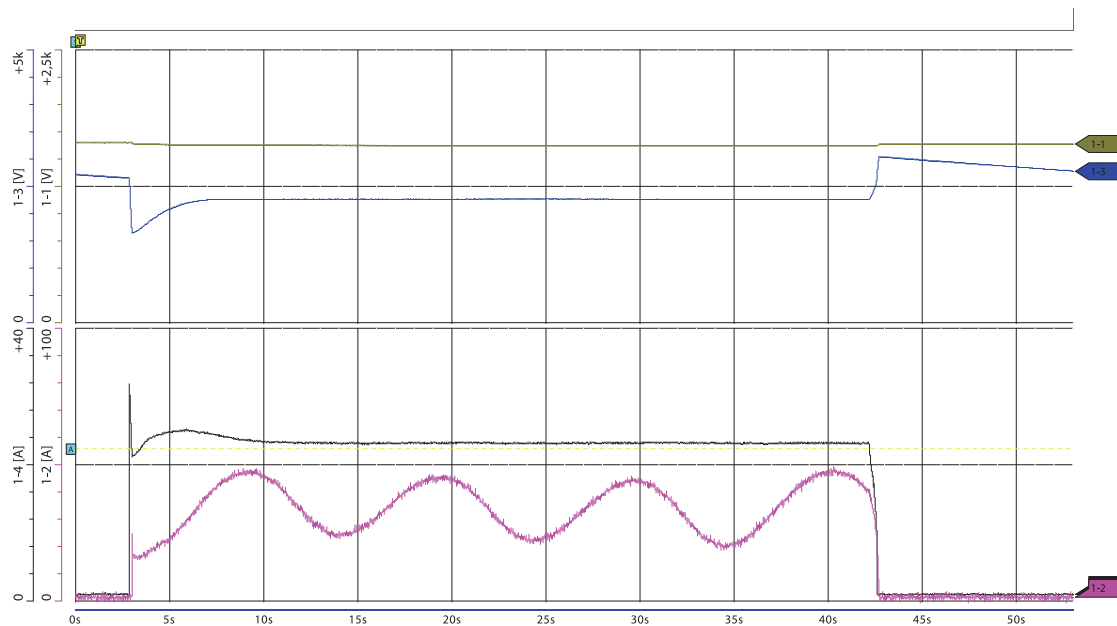
W pierwszym etapie badań zespół prostownikowy był odłączony od układu. Napięcie U_{d1} ustawiono na poziomie 2600 V, maksymalny prąd rozładowania baterii wynosił $I_b = 250$ A. Podczas załączania odpowiednich styczników w układzie, możliwa była zmiana prądu $I_d = I_m$. Skokowa zmiana prądu wynika z załączania lub wyłączania styczników bocznikujących rezystory obciążenia. Skokowa zmiana prądu płynącego w obwodzie wywołuje chwilowy spadek lub wzrost napięcia U_{d1} . Duże wartości indukcyjności oraz pojemności znajdujące się na wyjściu przetwornicy od strony 3 kV powodują, że prąd do wartości ustalonej dochodzi w sposób oscylacyjny.

Przebiegi prądów i napięć przedstawiono na rysunkach 12–14. Podczas badań rejestrowano następujące przebiegi napięć i prądów:

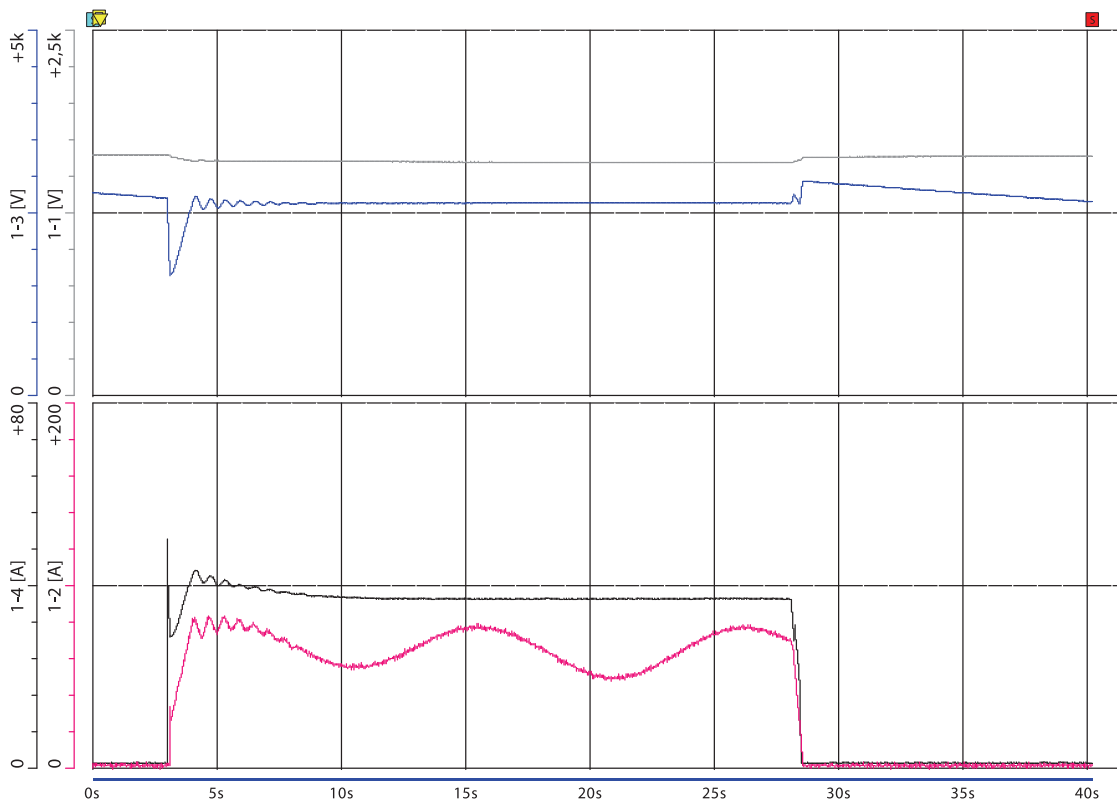
- I_d – sumaryczny prąd obciążenia zespołu prostownikowego i magazynu energii (kolor czerwony, kanał 2-3),
- I_{zp} – prąd obciążenia zespołu prostownikowego (kolor zielony, kanał 1-3 lub 1-4),
- I_m – prąd magazynu energii (kolor czarny, kanał 2-1), wartość dodatnia oznacza oddawanie energii z magazynu, wartość ujemna – ładowanie magazynu,
- I_b – prąd baterii akumulatorów (kolor różowy, kanał 1-2), wartość dodatnia oznacza oddawanie energii z baterii, wartość ujemna – ładowanie baterii,
- U_d – napięcie na zaciskach od strony 3 kV magazynu energii – przetwornicy (kolor niebieski, kanał 2-2),
- U_b – napięcie na zaciskach baterii akumulatorów – przyłączy przetwornicy od strony baterii (kolor szary, kanał 1-1).

Rys. 11. Schemat układu pomiarowego do badań laboratoryjnych magazynu energii: I_m – prąd magazynu energii, U_d – napięcie na zaciskach od strony 3 kV magazynu energii (przetwornicy), I_b – prąd baterii akumulatorów, U_b – napięcie na zaciskach baterii akumulatorów (przyłączy przetwornicy od strony baterii), I_{zp} – prąd obciążenia zespołu prostownikowego, I_d – sumaryczny prąd obciążenia zespołu prostownikowego i magazynu energii [1]

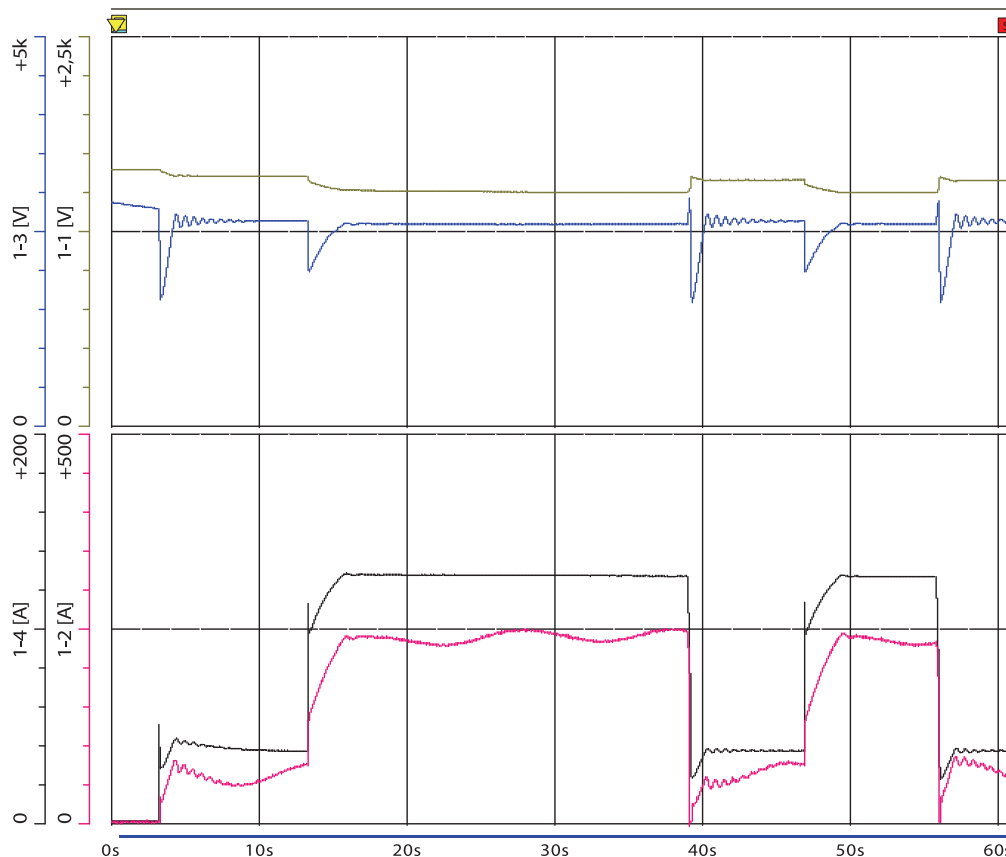




Rys. 12. Przebiegi napięć i prądów przy prądzie obciążenia magazynu 23 A [1]



Rys. 13. Przebiegi napięć i prądów przy prądzie obciążenia magazynu 36 A [1]

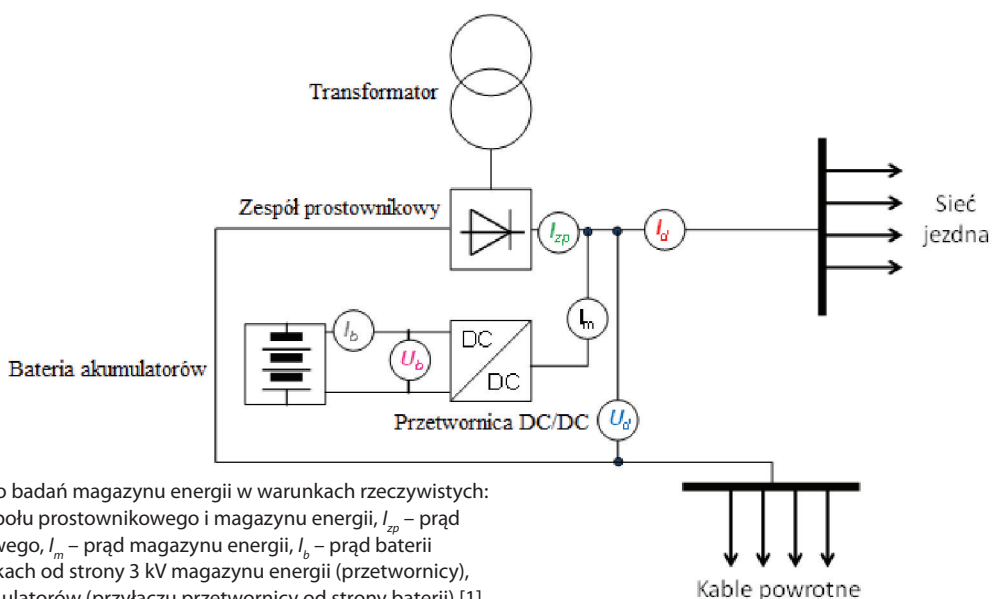


Rys. 14. Przebiegi napięć i prądów przy zmianach prądu obciążenia magazynu 0, 36, 128 A [1]

5. Praca magazynu w podstacji trakcyjnej

Badania wykonano w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, łącząc szynę główną laboratorium z szyną zbiorczą rozdzielnic 3 kV DC podstacji trakcyjnej Mińsk Mazowiecki.

Podczas wykonywania pomiarów, sieć trakcyjna na linii Warszawa – Siedlce była zasilana z zespołu prostownikowego z laboratorium zwarcowego IK. Zespoły należące do PKP Energetyka były wyłączone. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 15.

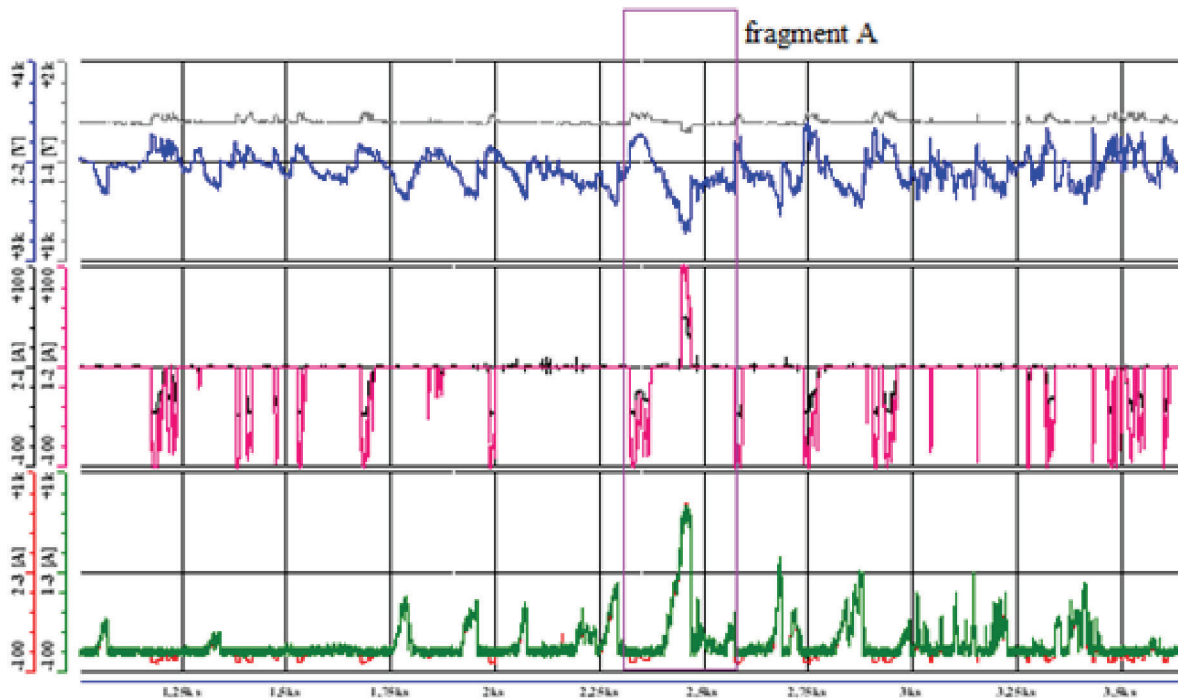


Rys. 15. Uproszczony schemat układu do badań magazynu energii w warunkach rzeczywistych:

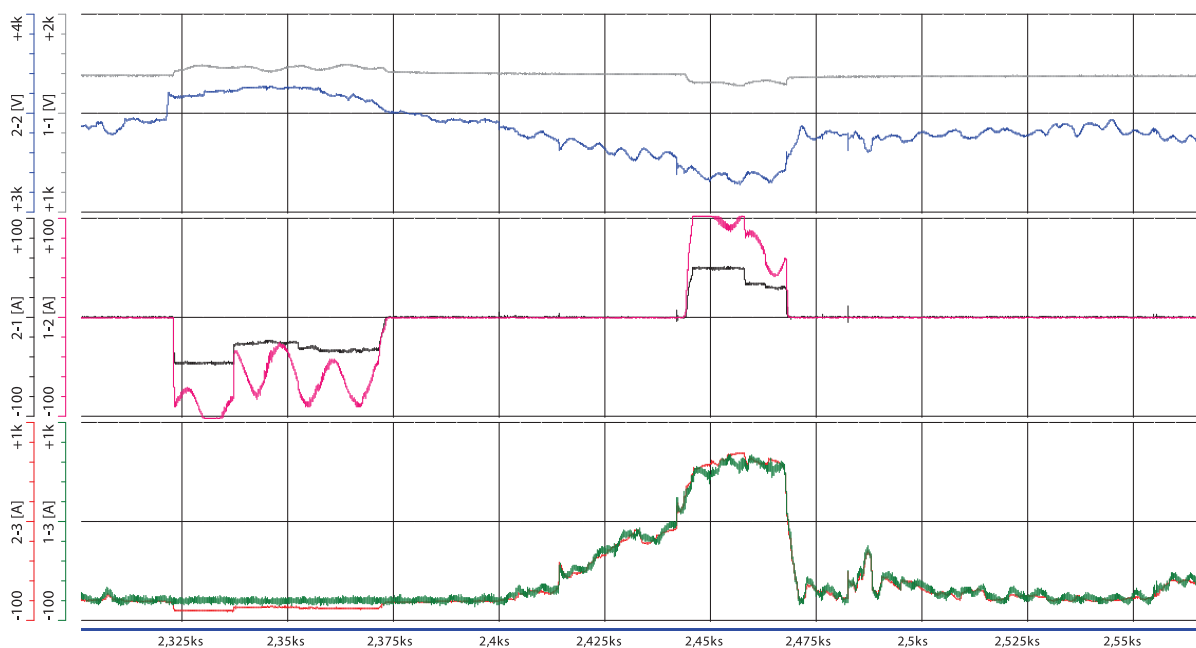
I_d – sumaryczny prąd obciążenia zespołu prostownikowego i magazynu energii, I_{zp} – prąd obciążenia zespołu prostownikowego, I_m – prąd magazynu energii, I_b – prąd baterii akumulatorów, U_d – napięcie na zaciskach od strony 3 kV magazynu energii (przetwornicy), U_b – napięcie na zaciskach baterii akumulatorów (przyłączu przetwornicy od strony baterii) [1]

Rysunek 16 przedstawia przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii i podstacji trakcyjnej. Na rysunku 17, który jest powiększeniem fragmentu rysunku 16, przedstawiono pracę magazynu w trybie ładowania, a następnie rozładowania.

Podczas ładowania magazynu prąd obciążenia zespołu prostownikowego jest $I_{zp} \approx 0$, co świadczy że magazyn ładował się z sieci trakcyjnej, prawdopodobnie energią z hamowania rekuperacyjnego, co potwierdza wysoka wartość napięcia U_{d1} .



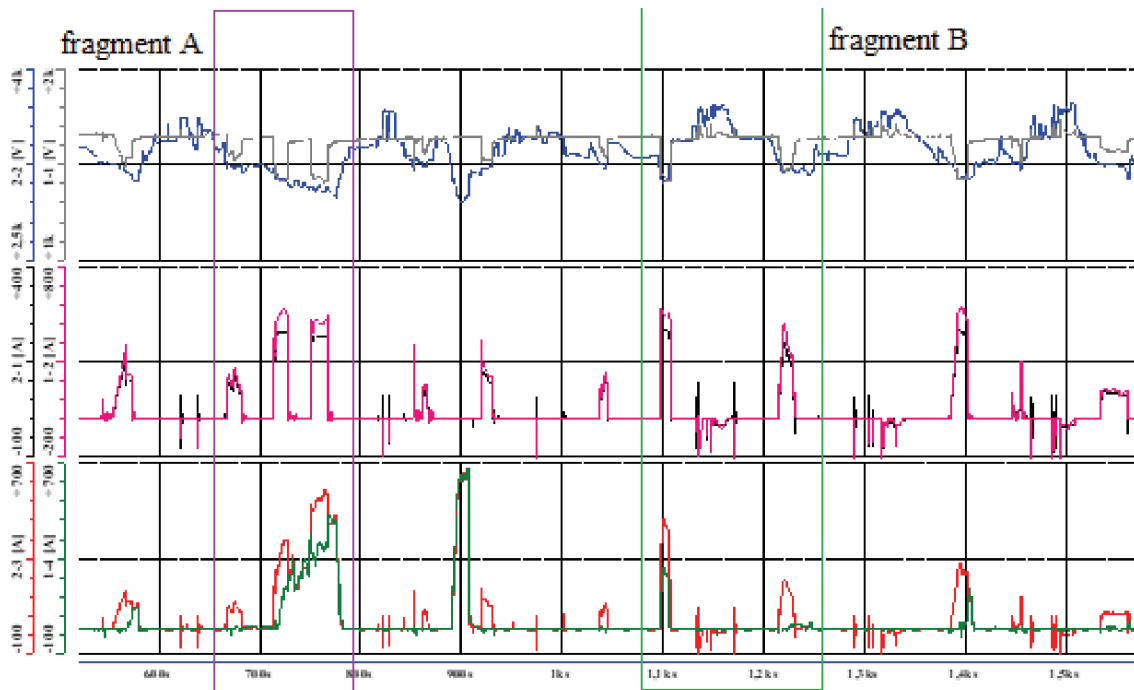
Rys. 16. Przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii i podstacji trakcyjnej przy $U_{d1} = 3200$ V, $U_{d2} = 3300$ V, $U_{c1} = 3450$ V i $U_{c2} = 3500$ V [1]



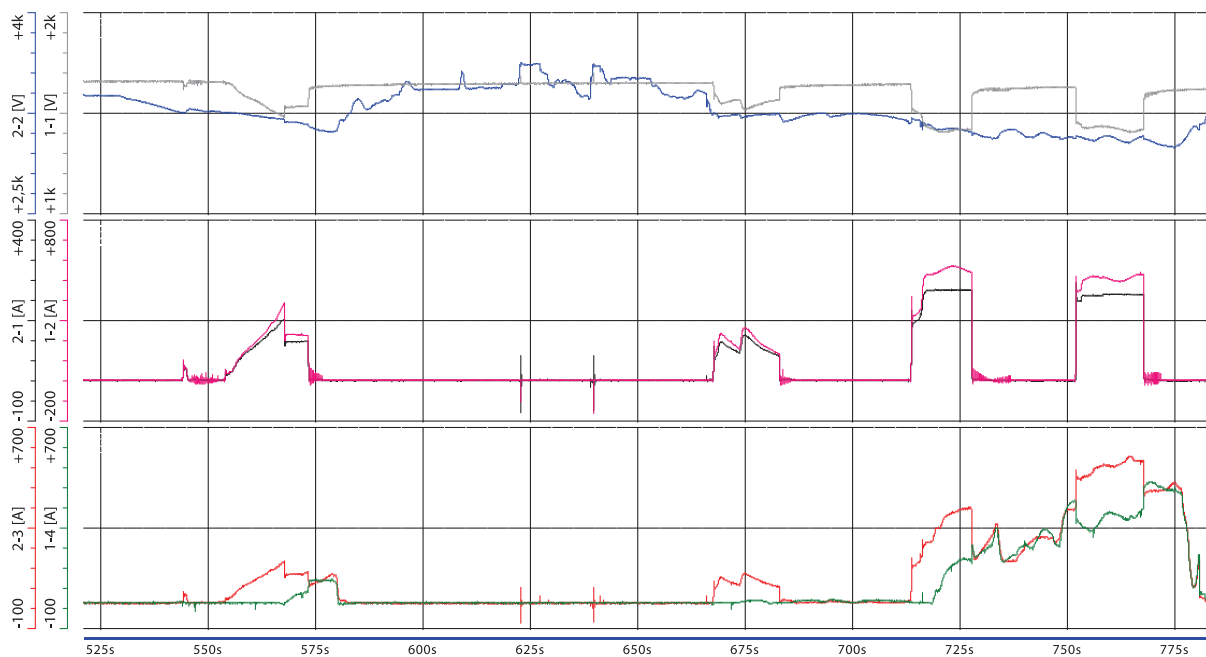
Rys. 17. Przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii i podstacji trakcyjnej przy $U_{d1} = 3200$ V, $U_{d2} = 3300$ V, $U_{c1} = 3450$ V i $U_{c2} = 3500$ V – powiększony fragment A rysunku 16 [1]

W trybie rozładowania magazyn energii podejmuje próby ustabilizowania napięcia U_d na poziomie napięcia U_{d1} . Jest to widoczne przez wzrost prądu magazynu I_m przy zwiększaniu się prądu obciążenia I_d i jednoczesnym spadku napięcia U_d . Ze względu na ograniczoną wydajność

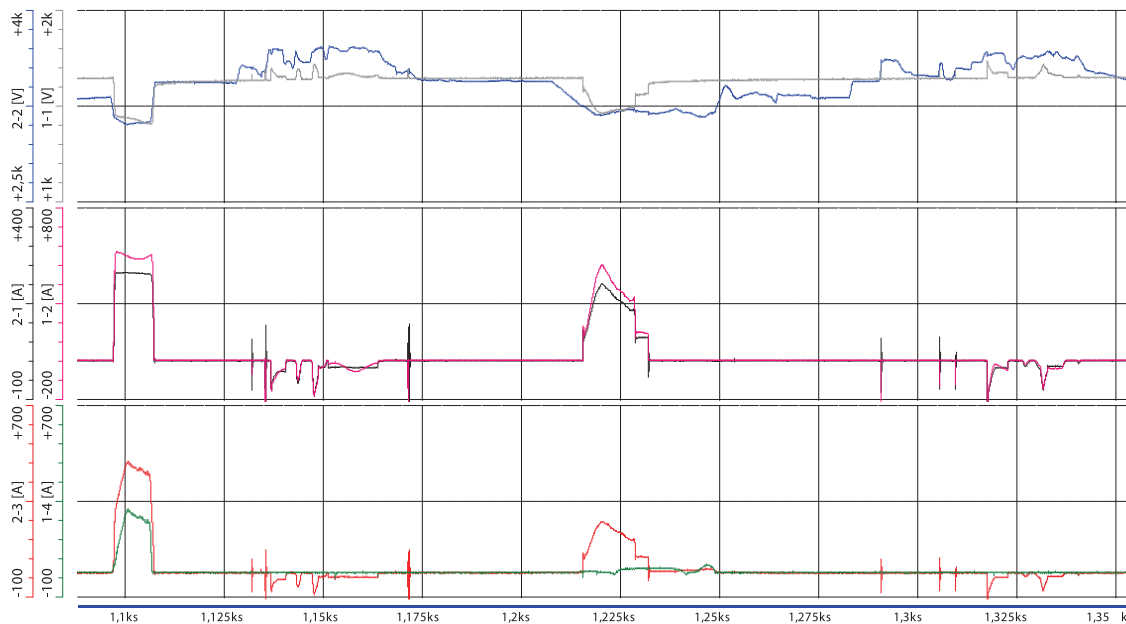
prądową magazynu ($I_{mmax} \approx 300$ A), dodatkowo zależną od stopnia naładowania baterii akumulatorów, w wielu przypadkach nie udaje się ustabilizować napięcia U_d na poziomie U_{d1} . Przebiegi napięć i prądów, ilustrujące opisaną sytuację przedstawiono na rysunkach 18–20.



Rys. 18. Przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii i podstacji trakcyjnej przy $U_{d1} = 3300$ V, $U_{d2} = 3400$ V, $U_{c1} = 3500$ V i $U_{c2} = 3600$ V [1]



Rys. 19. Przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii i podstacji trakcyjnej przy $U_{d1} = 3300$ V, $U_{d2} = 3400$ V, $U_{c1} = 3500$ V i $U_{c2} = 3600$ V – powiększony fragment A rysunku 18 [1]



Rys. 20. Przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii i podstacji trakcyjnej przy $U_{d1} = 3300\text{ V}$, $U_{d2} = 3400\text{ V}$, $U_{c1} = 3500\text{ V}$ i $U_{c2} = 3600\text{ V}$ – powiększony fragment B rysunku 18 [1]

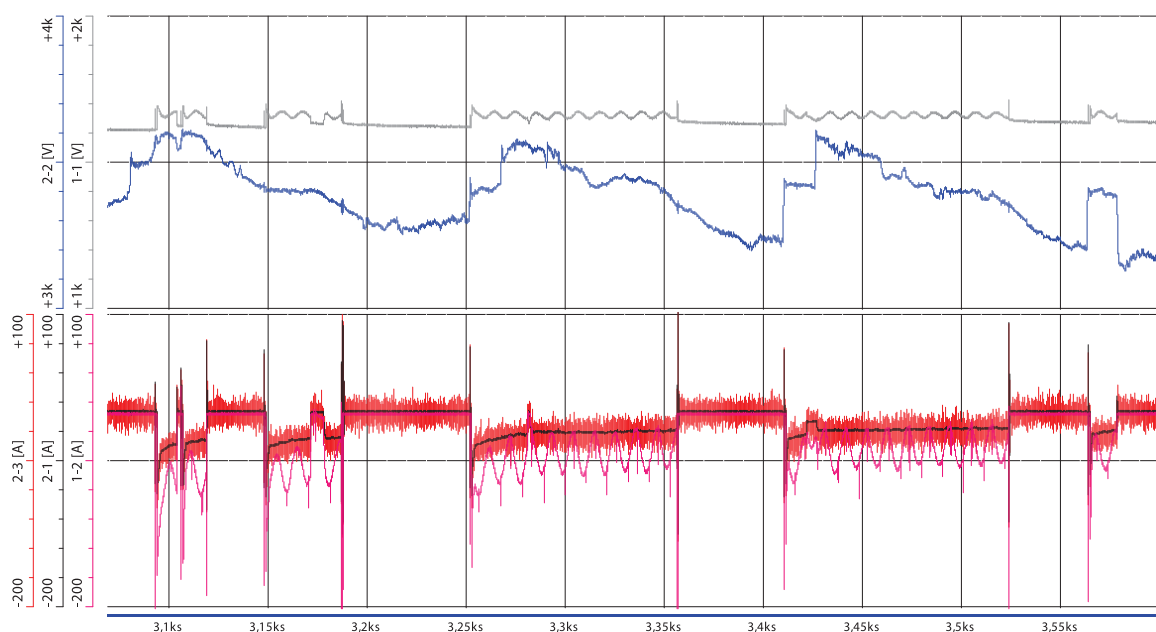
6. Praca magazynu w kabinie sekcyjnej

W celu zbadania magazynu energii jako urządzenia wspomagającego pracę kabiny sekcyjnej, konieczne było wyłączenie wszystkich zespołów prostownikowych przy zamkniętych wyłącznikach szybkich wszystkich zasilaczy.

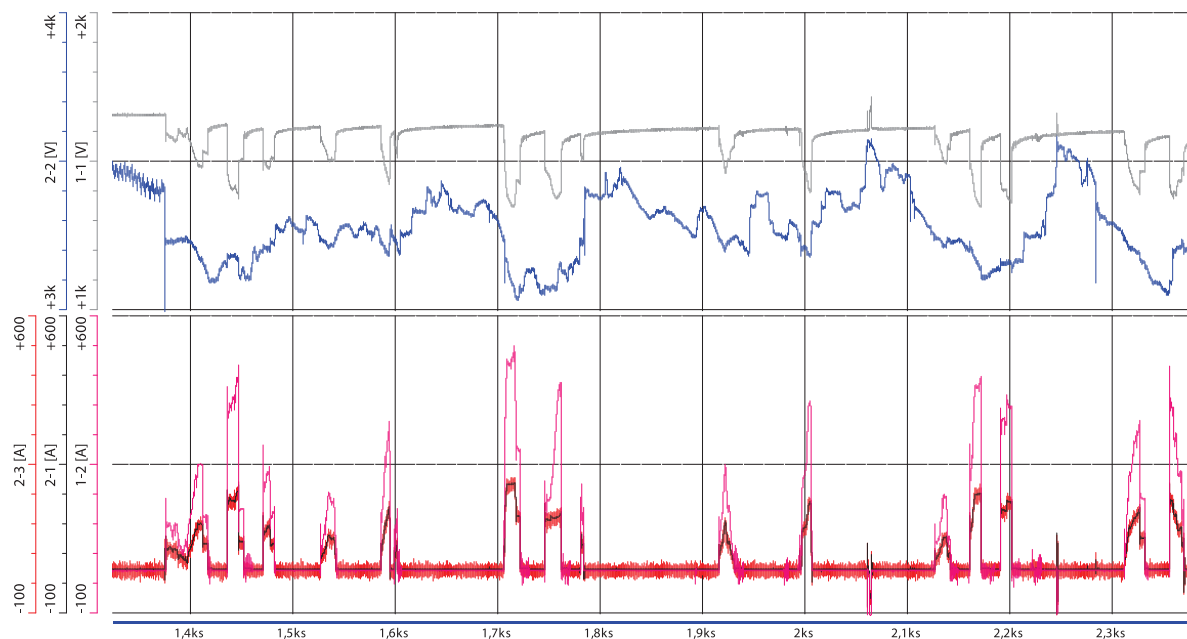
Na rysunku 21 przedstawiono tryb ładowania magazynu energii. Ze względu na wyłączone zespoły prostowni-

kowe, nie wiadomo, czy magazyn ładował się z sąsiednich podstacji trakcyjnych, czy zmagazynował energię hamowania rekuperacyjnego.

Na rysunku 22 widoczne są rozładowania magazynu energii pod wpływem spadku napięcia U_d poniżej wartości U_{d1} . Widoczne są również przerwy w pracy podczas rozładowywania spowodowane znaczną wartością prądu I_b dochodzącą do 500 A.



Rys. 21. Przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii w czasie jego ładowania podczas pracy podstacji trakcyjnej w trybie kabinowym przy $U_{d1} = 3200\text{ V}$, $U_{d2} = 3300\text{ V}$, $U_{c1} = 3400\text{ V}$ i $U_{c2} = 3500\text{ V}$ [1]



Rys. 22. Przebiegi napięć i prądów w układzie magazynu energii w czasie jego rozładowywania w czasie pracy podstacji trakcyjnej w trybie kabinowym przy $U_{d1} = 3200\text{ V}$, $U_{d2} = 3300\text{ V}$, $U_{c1} = 3400\text{ V}$ i $U_{c2} = 3500\text{ V}$ [1]

7. Wnioski

Przedstawione badania laboratoryjne, przeprowadzone w warunkach zbliżonych do rzeczywistych pokazały, że magazyn energii może wspomagać pracę podstacji trakcyjnych oraz kabin sekcyjnych. Zgodnie z założeniami, magazyn energii wpływa na stabilizację poziomu napięcia w sieci trakcyjnej.

Udowodniono również, że magazyn energii gromadzi energię powstałą w wyniku hamowania rekuperacyjnego pojazdu trakcyjnego. Świadczy o tym przepływ prądu do baterii akumulatorów przy prądzie obciążenia zespołu prostownikowego zbliżonego do zera.

Oprócz wymienionych korzyści, instalacja magazynu energii daje potencjalne szanse na stabilizację obciążenia zespołów prostownikowych i związane z tym ograniczenie mocy szczytowej pobieranej przez podstację trakcyjną z systemu elektroenergetycznego.

Bibliografia

1. Rojek A.: *Opracowanie i badania systemów magazynowania energii elektrycznej w układzie zasilania trakcji elektrycznej. Sprawozdanie końcowe*. Warszawa, 2018.
2. Rojek A.: *Electric energy storage in DC traction power supply systems*. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, Wiedeń, 2018.
3. Rufer A.: *Energy Storage for Railway Systems, Energy Recovery and Vehicle Autonomy in Europe*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2010.
4. Shevlyugin M.V.: *Power-Saving Circuits of Railway Traction Power Supply Based on Superconducting Inductive Energy Storage*. Russian Electrical Engineering, 2008, Vol. 79, No. 7, pp. 377–381.