

Paweł Bartkiewicz, Ireneusz Chrabąszcz, Janusz Prusak

Maksymalne wartości prądów obciążeń trakcyjnych dla rzeczywistej trasy kolejowej w odniesieniu do bezpiecznej eksploatacji wyłączników szybkich

Bezpieczeństwo eksploatacyjne kolejowych sieci trakcyjnych prądu stałego zależy od prawidłowego działania wszystkich elementów układu zasilania. Szczególną rolę na podstacjach trakcyjnych i w kabinach sekcyjnych odgrywają wyłączniki szybkie (WS) prądu stałego. Urządzenia te montowane są w obwodach bezpośrednio zasilających sieć jezdnią o potencjale 3 kV DC, a ich zadaniem jest wyłączenie prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych. Poprawne i skuteczne działanie WS jest bardzo ważne dla aparatury trakcyjnej i może również decydować o zdrowiu a nawet życiu ludzkim.

W Polsce eksploatowanych jest łącznie ok. 4130 szt. wyłączników szybkich (2573 szt. na podstacjach trakcyjnych oraz 1557 szt. w kabinach sekcyjnych) [8]. Zmienny charakter obciążenia trakcyjnego [9], zwłaszcza maksymalne prądy obciążeń trakcyjnych mogą powodować zbędne zadziałania wyłączników szybkich, na skutek których dochodzi do skrócenia czasu ich eksploatacji oraz zakłóceń w zasilaniu pojazdów. Koszty eksploatacyjne z tym związane mogą być znaczne. Wynika to z liczby eksploatowanych na PKP wyłączników szybkich, kosztów ich remontów lub zakupu nowych egzemplarzy.

Z uwagi na pojawiające się dodatkowe koszty istotnym problemem staje się określenie właściwych nastaw wyzwalaczy wyłączników szybkich, które pozwoli ograniczyć ilość zbędnych wyłączeń (wywołanych maksymalnymi wartościami prądów obciążeń trakcyjnych, a nie stanami awaryjnymi!), przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa eksploatacji kolejowych sieci trakcyjnych.

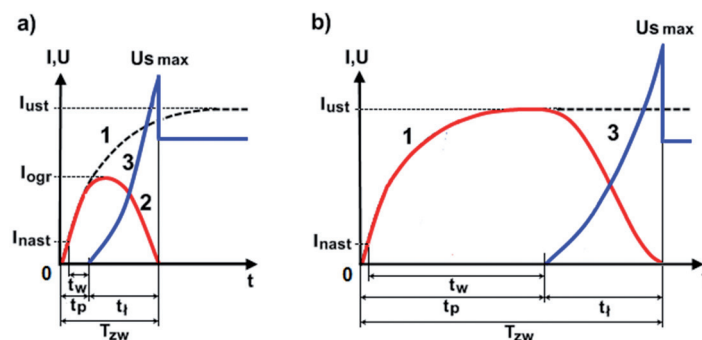
Wyłączniki szybkie

Krótki opis działania

Wyłączanie zwarć w obwodach prądu stałego (DC) ma trudniejsze warunki niż w obwodach prądu przemiennego (AC). Wartości chwilowe prądu zwarciovego obwodów DC nie tylko nie przechodzą przez wartość zerową, ale rosną od momentu zwarcia, zmierzając do ustalonej wartości, zależnej od parametrów obwodu. Wobec tego w obwodach DC bardzo duże znaczenie ma szybkość zadziałania wyłącznika, o której świadczy tzw. czas własny, tj. czas liczony od momentu zrównania się wartości prądu zwarciovego z wartością nastawy wyłącznika do momentu, w którym wyłącznik rozpoczyna otwieranie styków. Rozdzielenie się tych styków skutkuje powstaniem między nimi napięcia oraz łuku elektrycznego, który musi zostać zgaszony [2, 3, 5].

W obwodach prądu stałego dużej mocy, jakimi są np. sieci trakcyjne kolejowe, konieczne jest stosowanie tzw. wyłączników szybkich, zdolnych do otwarcia swych styków na tyle wcześnie, aby prąd zwarciovym nie osiągnął wartości ustalonej. Czas własny wyłączników szybkich mieści się w granicach od 3 do 5 ms [4], a czas od momentu powstania zwarcia do momentu pojawienia się łuku elektrycznego (tzw. czas przedłukowy) zazwyczaj nie jest dłuższy niż 10 ms. W obwodach chronionych wyłącznikiem szybkim całkowity czas trwania zwarcia (od chwili powstania zwarcia do chwili zaniku prądu – zgaszenia łuku) z reguły nie przekracza 30–60 ms [2, 3].

Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi napięć i prądów w trakcie wyłączania zwarć przez wyłączniki szybkie (rys. 1a) oraz dla porównania – przez zwykłe wyłączniki nadmiarowe prądu stałego (rys.1b). Porównując oba przebiegi widać wyraźnie korzyści wynikające ze stosowania wyłączników szybkich. Po pierwsze wyłączany prąd (I_{ogr}) jest znacznie mniejszy niż ustalony prąd zwarciovym, po drugie czas trwania zwarcia (t_w) jest dużo krótszy.



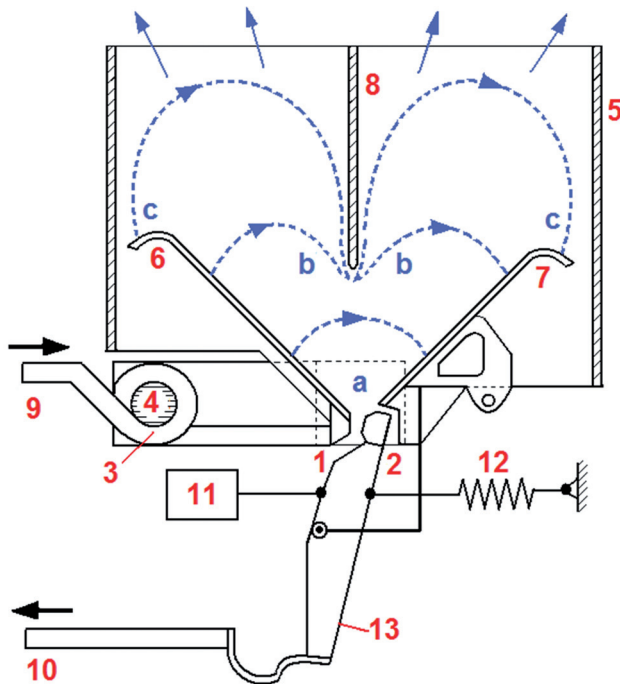
Rys. 1. Wyłączanie zwarć w obwodach prądu stałego wyłącznikiem szybkim (a) i zwykłym (b) [2, 3]

1 – przebieg narastania prądu do wartości ustalonej; 2 – przebieg prądu zwarciovego w obwodzie chronionym wyłącznikiem szybkim; 3 – przebieg napięcia między stykami wyłącznika podczas wyłączania zwarcia; I_{nast} – wartość prądu nastawienia wyłącznika; I_{ogr} – ograniczona wartość prądu zwarciovego; I_{ust} – ustalona wartość prądu zwarciovego; t_w – czas własny; t_p – czas przedłukowy; t_i – czas palenia się łuku; T_{zw} – czas trwania zwarcia; $U_{s max}$ – maksymalna wartość napięcia między stykami

Ogólna zasada działania wyłącznika szybkiego – gaszenie łuku

Szybkie otwarcie styków po przekroczeniu przez prąd zwarciovym wartości nastawionej zapewnia odpowiednia konstrukcja wyłącznika. Otwieraniu się styków towarzyszy zjawisko zapalenia się lu-

ku elektrycznego między nimi. Prąd zwarciovy przepływając również przez tzw. cewkę wydmuchową powoduje powstanie pola magnetycznego, które oddziałując na łuk szybko przesuwając go po rożkach opaleniowych w komorze łukowej. Przy przemieszczaniu łuk się wydłuża (rys. 2), a ścianki komory go chłodzą. Powoduje to zwiększanie się oporności łuku i zmniejszanie natężenia prądu. Jednocześnie wzrasta napięcie między stykami (rys. 1a), które w momencie gaśnięcia łuku jest większe od napięcia zasilającego i mówi się wówczas o tzw. „przebiegu łączeniowym”. Pojawianie się wymienionego przebiegu jest nieuniknione, a jego wielkość zależy od indukcyjności obwodu oraz tego jak szybko maleje wyłaczany prąd.



Rys. 2. Idea gaszenia łuku elektrycznego w wyłącznikach szybkich [2]
 1 – styk nieruchomy; 2 – styk ruchomy; 3 – cewka wydmuchowa; 4 – rdzeń cewki wydmuchowej; 5 – komora łukowa; 6, 7 – rożki opaleniowe; 8 – przegroda komory łukowej; 9 – zacisk wejściowy; 10 – zacisk wyjściowy; 11 – mechanizm zamykający i utrzymujący wyłącznik w stanie zamknięcia; 12 – mechanizm wyzwalający; 13 – dźwignia styku ruchomego; a, b, c – pozycje łuku elektrycznego

Parametry istotne dla bezpiecznej i prawidłowej pracy wyłączników szybkich

Poprawne funkcjonowanie wyłącznika szybkiego (z eksploatacyjnego punktu widzenia) wiąże się przede wszystkim z właściwym doborem jego nastawy. Zalecane jest, aby prąd nastawienia spełniał nierówność [5]:

$$I_{obc\ max} + 200\ A \leq I_{nast} \leq I_{zw\ min} - 300\ A$$

gdzie:

- $I_{obc\ max}$ – maksymalna wartość prądu obciążenia [A],
- I_{nast} – wartość prądu nastawienia wyzwalacza wyłącznika szybkiego [A],
- $I_{zw\ min}$ – minimalna wartość prądu zwarciovy [A].

Z uwagi na warunki pracy układu zasilania trakcji (DC) konieczne jest aby wartości prądów maksymalnych zwarcia były jak

najmniejsze (wyłącznik szybki wyłacza wtedy mniejsze prądy co wydłuża okres jego eksploatacji), a minimalne prądy zwarcia jak największe [5]. Ostatnie wymaganie wynika z faktu, że przy dużej rezystancji pętli zwarciovy, prądy robocze $I_{obc\ max}$ (np. ciężki rozruch w pobliżu podstacji) mogą mieć wartości większe od prądów zwarciovy minimalnych.

W praktyce łatwiejsza do określenia jest prawa strona nierówności, czyli minimalna wartość prądu zwarciovy. Natomiast dla ustalenia konkretnej wartości prądu z lewej strony nierówności konieczne jest określenie maksymalnych wartości prądów obciążenia przepływających przez poszczególne zasilacze (wyłączniki szybkie). Można je wyznaczyć na drodze symulacji komputerowej, do przeprowadzenia której niezbędna jest znajomość między innymi: układu zasilania, planowanego ruchu pociągów elektrycznych (rozkłady jazdy), podstawowych parametrów taboru (charakterystyki trakcyjne).

Istotne jest również, aby przepływ prądu roboczo przez wyłącznik nie spowodował przegrzania żadnej części wyłącznika. Dopuszczalne przyrosty temperatur różnych części można znaleźć w odpowiedniej normie [7]. Prąd znamionowy wyłącznika powinien spełniać nierówność [6]:

$$I_{sk15\ max} \leq I_{Ne}$$

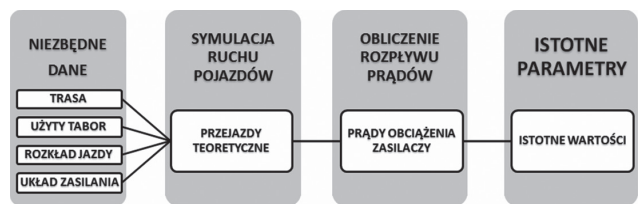
gdzie:

- $I_{sk15\ max}$ – maksymalna wartość prądu zastępczego 15-minutowego w czasie obciążenia [A],
- I_{Ne} – wartość prądu znamionowego wyłącznika szybkiego [A].

Przykładowe obliczenia obciążeń maksymalnych dla układu zasilania (DC) rzeczywistego odcinka zelektryfikowanej linii kolejowej

Algorytm obliczeń

Obliczenia obciążeń maksymalnych zostały wykonane według algorytmu przedstawionego w uproszczony sposób na rysunku 3.



Rys. 3. Algorytm wyznaczania prądów obciążeń trakcyjnych

Obliczenie obciążeń na odcinku zasilania sprowadza się przede wszystkim do wykonania tzw. przejazdów teoretycznych dla wszystkich poruszających się po nim pociągów zgodnie z rozkładem jazdy. Z obliczeń jednego przejazdu teoretycznego otrzymuje się m.in. wartości prądu pobieranego przez pociąg, co pozwala przy znajomości jego położenia na trasie, oraz znajomości układu zasilania, wyznaczyć rozptył prądów obciążenia w poszczególnych zasilaczach (wyłącznikach szybkich). Znając przebiegi czasowe prądów obciążenia możemy wyznaczyć bądź obliczyć szukane parametry (np. wartości maksymalne) w interesujących nas przedziałach czasowych. Pozwala to na zbadanie jaki wpływ mają panujące lub planowane warunki ruchu (na rzeczywistym odcinku) na wartości prądów obciążenia w zasilaczach (wyłącznikach szybkich).

Podstawowe dane wyjściowe do badań symulacyjnych

■ Układ zasilania

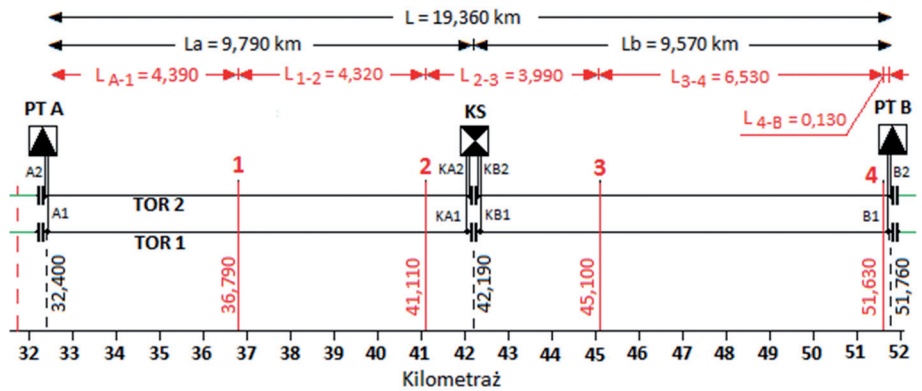
Zastosowany układ zasilania ma bardzo istotny wpływ na przebiegi wartości prądów w wyłącznikach szybkich. Jest rzeczą oczywistą, że inaczej kształtują się obciążenia zasilaczy (prądy robocze WS) w układzie jednostronnym, dwustronnym i dwustronnym z kabiną sekcijną. Nie bez znaczenia są także odległości między poszczególnymi elementami układu zasilania.

Na rysunku 4 przedstawiono w uproszczony sposób schemat analizowanego odcinka zasilania. Jest to linia dwutorowa, zasilana dwustronnie z podstacji trakcyjnych oznaczonych jako A i B. Prawie dokładnie w środku odcinka zasilania zlokalizowana jest kabina sekcyjna oznaczona jako KS. Całkowita długość odcinka zasilania wynosi 19,360 km. Układ ten zalicza się do typowych rozwiązań stosowanych w praktyce [5].

■ Tabor i planowany rozkład jazdy

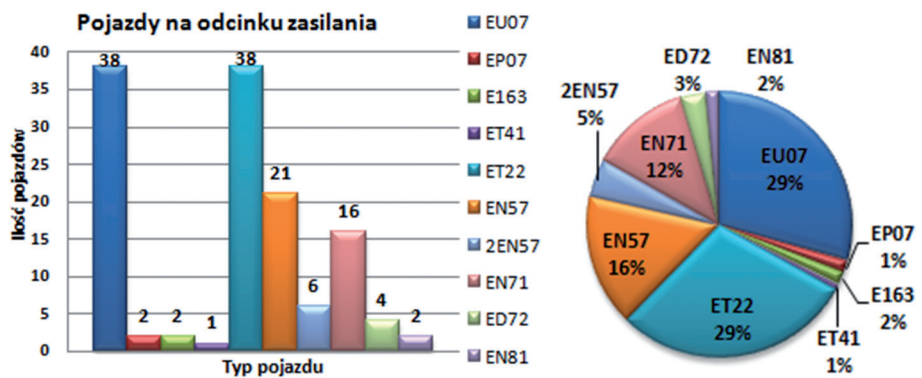
Informacja o tym jakie elektryczne pojazdy trakcyjne kursują na rozpatrywanym odcinku zasilania jest bardzo istotna przy dokonywaniu analizy prądów obciążenia. Poszczególne typy pojazdów różnią się między sobą liczbą silników trakcyjnych, ich mocą oraz układem sterowania (sterowanie rezystorowe lub przekształtnikowe). Wszystkie te czynniki wpływają na pobór prądu przez pojazd, co przekłada się na prądy robocze WS. Decydujące znaczenie ma również liczba pojazdów zasilana w danej chwili oraz ich położenie na trasie.

Na rysunku 5 przedstawiono liczbę i typy wszystkich pojazdów poruszających się na odcinku zasilania, a na rysunku 6 zaprezentowano graficznie rozpatrywaną sytuację ruchową.

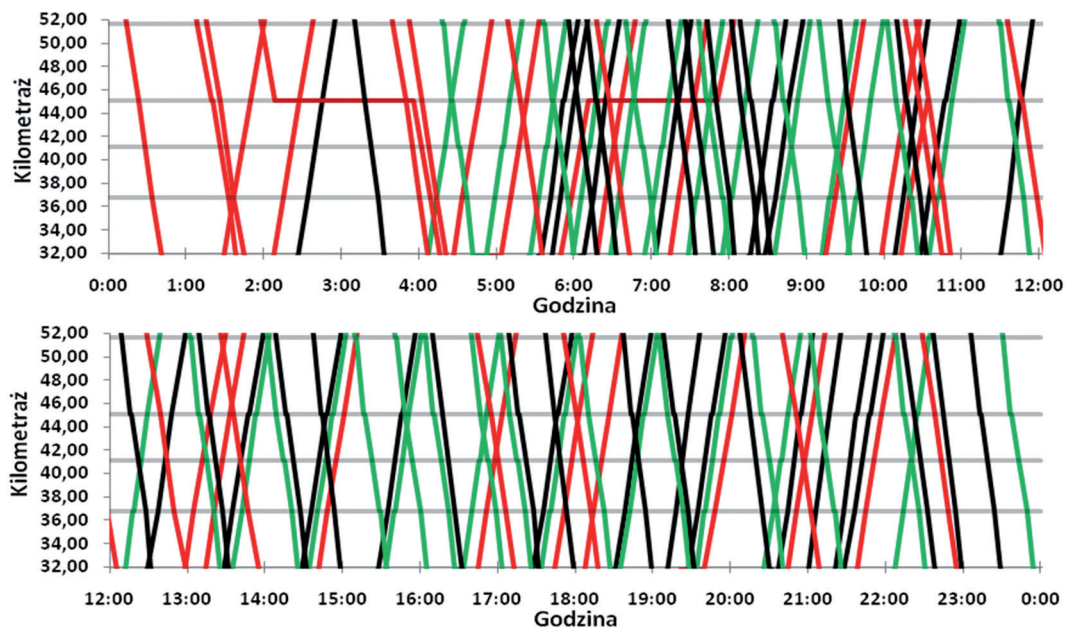


Rys. 4. Analizowany układ zasilania

PT A, PT B – podstacje trakcyjne A i B; KS – kabina sekcyjna; 1, 2, 3, 4 – przystanki/stacje



Rys. 5. Zestawienie pojazdów elektrycznych



Rys. 6. Graficzny rozkład jazdy

Czerwony – poc. towarowe; czarny – poc. pasażerskie (z lokomotywą); zielony – poc. pasażerskie (zespoły trakcyjne)

■ Charakterystyka trasy

Profil trasy, łuki oraz lokalizacja przystanków i stacji ma bardzo duże znaczenie dla ruchu pojazdów, a tym samym dla wartości obciążeń układu zasilania, jak również prądów roboczych WS. Ukształtowanie terenu (profil i łuki) pokazano na rysunku 7. Wiadąc, że na rozpatrywanym odcinku zasilania występują znaczne spadki w kierunku rosnącego kilometrażu oraz duża liczba łuków.

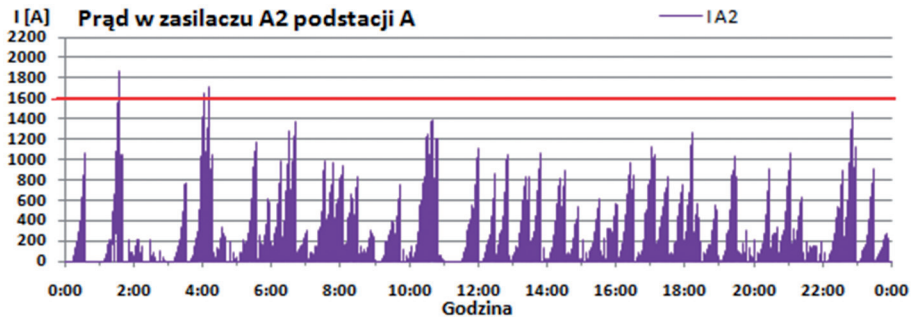
Wyniki symulacji

Przeprowadzona symulacja pozwoliła na wyznaczenie przebiegów czasowych prądów roboczych wyłączników szybkich zabezpieczających rozpatrywany odcinek zasilania. Obliczone prądy obciążenia przepływające przez poszczególne wyłączniki szybkie w ciągu całej doby (o maks. obciążeniu w tygodniu) przedstawiono poglą-

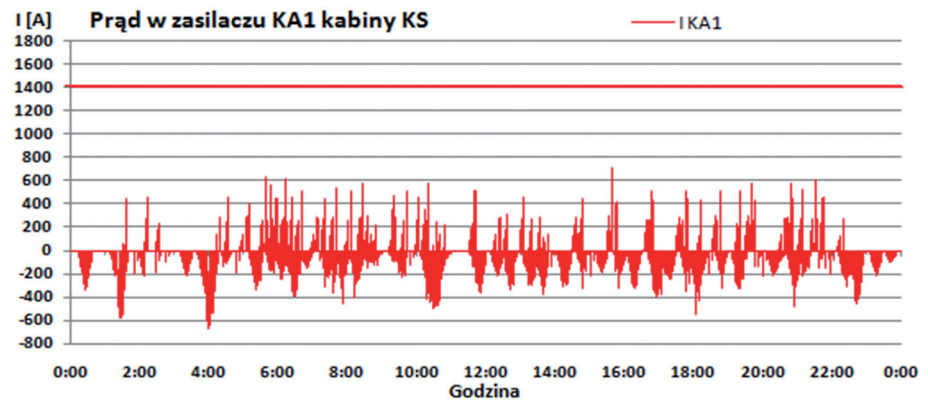
Wyznaczenie $I_{zw\min}$ jest rzeczą stosunkową prostą i wymaga znajomości podstawowych parametrów układu zasilania, natomiast wyznaczenie $I_{obc\max}$ jest rzeczą trudną ze względu na mnogość czynników, które należy wziąć pod uwagę przy obliczeniach. Jednakże wyznaczenie maksymalnej wartości prądu obciążenia może dać wymierne finansowe korzyści, gdyż będzie to prowadziło do zmniejszenia kosztów eksploatacji wyłączników szybkich poprzez zminimalizowanie liczby zbędnych wyłączeń.

Przeprowadzona symulacja obciążeń trakcyjnych wymaga jednak sprawdzenia w zakresie poprawności wyników w odniesieniu do wartości uzyskanych na drodze pomiarowej przeprowadzonych np. w analizowanym rzeczywistym układzie zasilania. Pozwoliłoby to na udoskonalenie metody badawczej oraz dokładniejsze określenie prądów roboczych dla dowolnego odcinka zelektryfikowanej linii kolejowej.

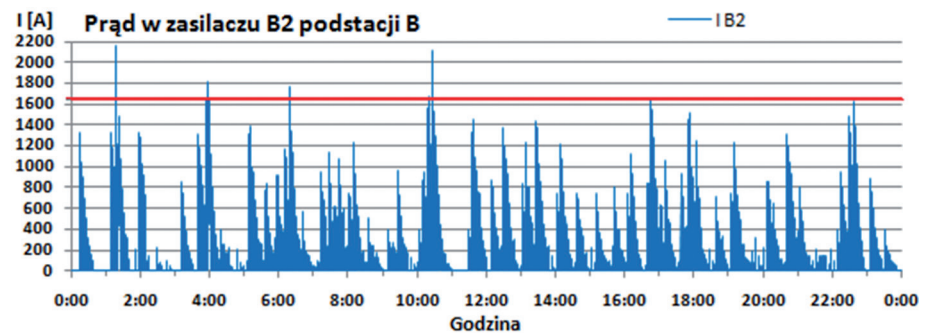
Liczba zbędnych zadziałań WS, w zakresie analizowanego odcinka, nie wydaje się niepokojąca, inaczej przedstawia się ten problem w skali całego kraju, na co zwrócono uwagę we wstępie do artykułu. Koszty ewentualnych badań, mających na celu ograniczenie zbędnych wyłączeń WS, zapewne będą mniejsze niż straty wynikłe z braku bardziej dokładnego określenia wartości prądów obciążeń maksymalnych w nastawach tych wyłączników.



Rys. 9. Obciążenie WS w zasilaczu A2
Linia pozioma – nastawa WS w zasilaczu A2 (1600 A)



Rys. 10. Obciążenie WS w zasilaczu KA2
Linia pozioma – nastawa WS w zasilaczu KA1 (1600 A)



Rys. 11. Obciążenie WS w zasilaczu B2
Linia pozioma – nastawa WS w zasilaczu B2 (1650 A)

Literatura

[1] Nasiłowski J.: *Wyłączniki i styczniki prądu stałego*. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1960.
 [2] Łuczywek Z., Słaby L.: *Elektromonter podstacji trakcyjnych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972.
 [3] Wdowiak J., Hanasz M., Nasiłowski J.: *Podstacje trakcyjne*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1958.
 [4] Frontczak F.: *Podstacje trakcyjne i ich zasilanie*. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.
 [5] Mierzejewski L., Szelań A., Gąluszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
 [6] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szelań A.: *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej Warszawa 1993.

[7] Polska Norma PN-EN 50123-1. *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Aparatura łączeniowa prądu stałego. Wymagania ogólne*.
 [8] <http://pkpenergetyka.pl/pl/strona/125-majatek-zakladowy-spolki>
 [9] Chrabąszcz I., Prusak J., Drapik S.: *Trakcja elektryczna prądu stałego. Układy zasilania*. Podręcznik INPE dla elektryków, zeszyt nr 27, Belchatów 2009.

mgr inż. Paweł Bartkiewicz – Grupa ZUE S.A., Kraków
 dr inż. Ireneusz Chrabąszcz
 dr inż. Janusz Prusak
 Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem
 Wydział Inżynierii Elektrycznej Komputerowej
 Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki