

PAWEŁ BARTKIEWICZ*, ANDRZEJ KOBIELSKI**, JANUSZ PRUSAK***

OCENA MAKSYMALNYCH WARTOŚCI PRĄDÓW OBCIĄŻEŃ TRAKCYJNYCH W ASPEKTCIE BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI WYŁĄCZNIKÓW SZYBKICH

RATE OF MAXIMAL VALUES TRACTION LOAD CURRENTS IN ASPECT TO SAFE EXPLOITATION OF HIGH SPEED CIRCUIT BREAKERS

Streszczenie

W artykule przedstawiono pokrótce sposób działania wyłączników szybkich na kolejowych podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych. Zaprezentowano przykłady obliczeniowe maksymalnych prądów obciążeń trakcyjnych oraz ich ocenę w aspekcie bezpiecznej eksploatacji wyłączników szybkich

Słowa kluczowe: wyłączniki szybkie

Abstract

The paper presents shortly how works high speed circuit breakers on railway traction substations and section cabins, it contains examples of counted maximal traction load currents and their rate in aspect to safe exploitation of high speed circuit breakers

Keywords: high-speed circuit breakers

* Mgr inż. Paweł Bartkiewicz, Zespół Diagnostyczny ds. Energetyki, PKP Polskie Linie Kolejowe SA – Zakład Linii Kolejowych w Krakowie.

** Dr inż. Andrzej Kobielski, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

*** Dr inż. Janusz Prusak, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

WS – wyłącznik szybki
 KS – kabina sekcyjna
 PT – podstacja trakcyjna

1. Wstęp

Bezpieczeństwo eksploatacyjne kolejowych sieci trakcyjnych prądu stałego w zauważalny sposób zależy od prawidłowego działania wszystkich elementów układu zasilania. Szczególną rolę na podstacjach trakcyjnych i w kabinach sekcyjnych odgrywiają wyłączniki prądu stałego – tzw. szybkie. Urządzenia te montowane są w obwodach bezpośrednio zasilających sieć jezdnią o potencjale 3 kV DC, a ich zadaniem jest wyłączanie prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych. Ich poprawne i skuteczne działanie jest bardzo ważne dla aparatury i może czasem decydować o życiu ludzkim.

W Polsce eksploatowanych jest łącznie ok. 4130 sztuk wyłączników szybkich (2573 szt. na podstacjach trakcyjnych oraz 1557 szt. w kabinach sekcyjnych) [8]. Zmienny charakter obciążenia trakcyjnego może powodować niepotrzebne zadziałania wyłączników szybkich, które przyczyniają się do skrócenia ich czasu pracy oraz wprowadzają zakłócenia w ruchu pojazdów. Koszty eksploatacyjne z tym związane mogą być znaczne. Jeżeli chociaż **raz w tygodniu każdy wyłącznik zadziałałby niepotrzebnie, to koszty wynosiłyby tygodniowo ok. 248 tys. zł, a rocznie ok. 12 885 mln:** 4130 łączy WS/tydzień – odpowiada zużyciu 4,13 WS/tydzień (trwałość łączeniowa 1 WS to ok. 1000 łączy) – $4,13 \times 60$ tys. zł (koszt wymiany 1 WS) – ok. 248 tys. zł tygodniowo – ok. 12 885 mln zł rocznie).

Ze względu na koszty istotnym problemem jest także nastawienie wyłącznika szybkiego, aby zminimalizować zbędne wyłączenia (wywołane maksymalnymi wartościami obciążenia trakcyjnych, a nie stanami awaryjnymi!), jednocześnie zapewniając bezpieczeństwo eksploatacyjne kolejowych sieci trakcyjnych.

2. Wyłączniki szybkie – charakterystyka działania

2.1. Wprowadzenie

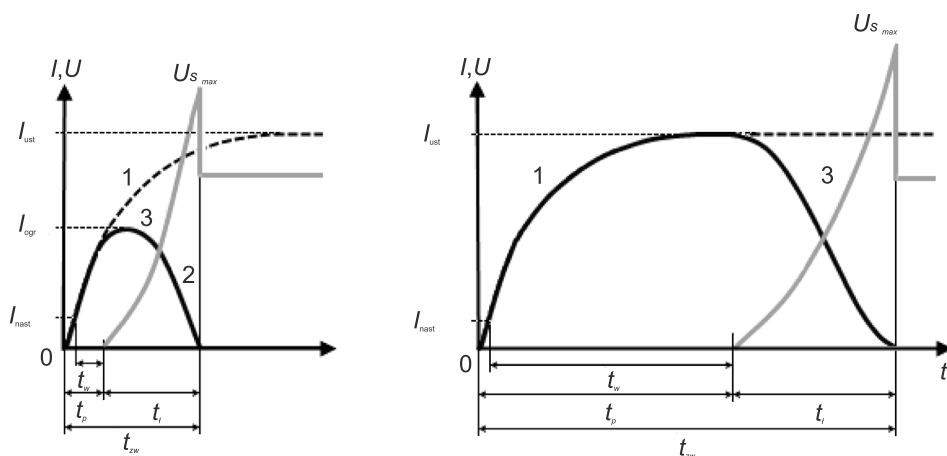
Wyłączanie zwarć w obwodach prądu stałego jest trudniejsze niż w obwodach prądu przemiennego. Wynika to z tego, że wartości chwilowe prądu zwarciovego w tych obwodach nie tylko nie przechodzą przez wartość zerową, ale cały czas rosną, zmierzając do ustalonej wartości, którą określa prawo Ohma. W obwodach prądu stałego bardzo duże znaczenie ma zatem szybkość działania wyłącznika, o której świadczy tzw. **czas własny** – czas liczony od momentu zrównania się wartości prądu zwarciovego z wartością nastawioną na wyłączniku do momentu, w którym wyłącznik rozpoczyna otwieranie swych styków. Rozdzielenie się styków objawia się powstaniem między nimi napięcia oraz łuku elektrycznego, który musi zostać zgaszony.

Zwykle wyłączniki prądu stałego charakteryzuje stosunkowo długi czas własny, dlatego są nie są szybkie. W praktyce objawia się to tym, że wyłączają zawsze już ustalone prądy zwarciove. Ze względu na wolne działanie (otwieranie styków z dużym opóźnieniem cza-

sowym) mogą być stosowane tylko w przypadkach, gdy ustalone prądy zwarciove nie są za wielkie, a wyłączane moce nie są zbyt duże [1, 3].

W obwodach prądu stałego dużej mocy, jakimi są np. sieci kolejowe, konieczne jest stosowanie tzw. wyłączników szybkich, zdolnych do otwarcia swych styków na tyle wcześnie, że prąd zwarciovy nie osiąga wartości ustalonej. Czas własny wyłączników szybkich wynosi 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 wyłączania zwarć przez wyłączniki szybkie (rys. 1a) oraz zwykłe wyłączniki nadmiarowe prądu stałego (rys. 1b). Porównując oba przebiegi, można zauważyć wyraźnie korzyści wynikające ze stosowania wyłączników szybkich. Po pierwsze wyłączany prąd jest znacznie mniejszy niż ustalony prąd zwarciovy, po drugie, czas trwania zwarcia jest dużo krótszy.



Oznaczenia: 1 – przebieg narastania prądu do wartości ustalonej; 2 – przebieg prądu zwarciowego 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 zwarciowego; I_{ust} – ustalona wartość prądu zwarciowego; t_w – czas własny; t_p – czas przedłukowy; t_f – czas palenia się łuku; T_{zw} – czas trwania zwarcia; $U_{s,max}$ – maksymalna wartość napięcia między stykami

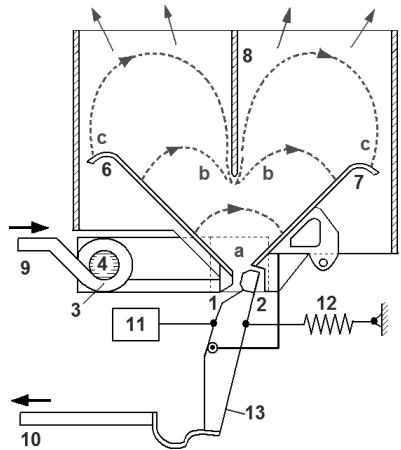
Rys. 1. Wyłączanie zwarć w obw. prądu stałego wyłącznikiem szybkim (a) i zwykłym (b) [2, 3]

Fig. 1. Switching off short-circuit in DC circuits with high speed (a) and normal (b) circuit breaker [2, 3]

2.2. Ogólna zasada działania wyłącznika szybkiego – gaszenie łuku

Szybkie otwarcie styków po przekroczeniu przez prąd zwarciovy wartości nastawionej zapewnia odpowiednia konstrukcja wyłącznika. Otwieraniu się styków towarzyszy zjawisko zapalenia się łuku elektrycznego między nimi. Prąd zwarciovy, przepływając również przez tzw. cewkę wydmuchową, powoduje powstanie pola magnetycznego, które oddziałując na łuk, szybko przesuwają go po rożkach opaleniovych w kominku (komorze łukowej). Przy przemieszczaniu łuk się wydłuża (rysunek 2), a ścianki komory go chłodzi. Wpływa to na

zwiększanie się oporności łuku i zmniejszanie natężenia prądu. Jednocześnie wzrasta napięcie między stykami (rysunek 1a), które w momencie gaśnięcia łuku jest większe od napięcia zasilającego, i mówi się wówczas o tzw. przepięciu łączeniowym. Pojawianie się przepięcia jest nieuniknione, a jego wielkość zależy od indukcyjności obwodu oraz tego, jak szybko maleje wyłączany prąd.



Oznaczenia: 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

Rys. 2. Idea gaszenia łuku elektrycznego w wyłącznikach szybkich [2]

Fig. 2. Idea of extinguishing electric arc in high speed circuit breakers [2]

3. Parametry istotne dla bezpiecznej i prawidłowej pracy wyłączników szybkich

Poprawne funkcjonowanie wyłącznika wiąże się przede wszystkim z odpowiednim doborem jego nastawy. Zalecane jest, aby prąd nastawienia spełniał nierówność [5]:

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

gdzie:

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

Analizując powyższy wzór, widać pewną sprzeczność – z jednej strony prąd nastawienia powinien być jak największy, aby uniknąć wyłączeń od maksymalnych wartości prądów obciążeń trakcyjnych (niebędących stanem awaryjnym), z drugiej strony zaś – jak najmniejszy, aby skutecznie wyłączać minimalne prądy zwarciego. Zdaniem autorów z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji korzystne jest, aby prąd nastawienia wyzwacza WS był jak najmniejszy – ponieważ im niższa nastawa, tym niższa ograniczona wartość prądu zwarciego (rys. 1), czyli skuteczniejsze i bezpieczniejsze wyłączenie. W praktyce łatwiejsza do określe-

nia jest prawa strona powyższej nierówności, czyli minimalna wartość prądu zwarciegowego. Natomiast dla ustalenia konkretnej wartości prądu z lewej strony nierówności koniecznością jest określenie maksymalnych wartości prądów obciążeń przepływających przez poszczególne wyłączniki szybkie. Można je wyznaczyć w drodze symulacji komputerowej, dla której niezbędna jest znajomość m.in. układu zasilania, planowanego ruchu pociągów elektrycznych (rozkłady jazdy), podstawowe parametry taboru (charakterystyki trakcyjne).

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

$$I_{sk15max} \leq I_{Ne}$$

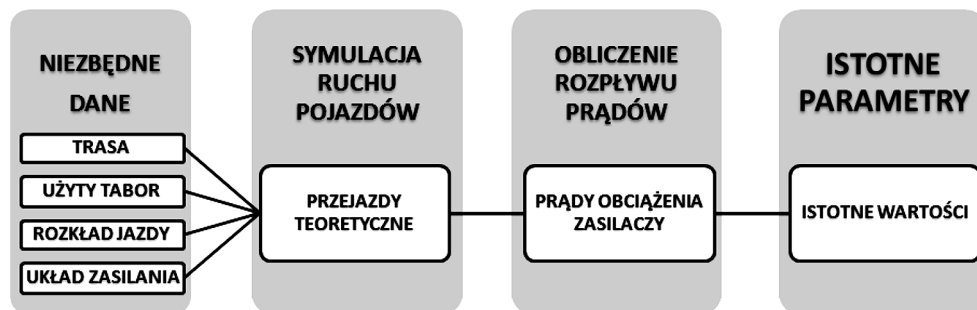
gdzie:

- $I_{sk15max}$ – maksymalna wartość prądu zastępczego 15-minutowego w czasie obciążenia [A],
- I_{Ne} – wartość prądu znamionowego wyłącznika szybkiego [A].

4. Przykłady obliczeniowe obciążeń maksymalnych

4.1. Algorytm obliczeń

Obliczenia obciążeń maksymalnych zostały wykonane wg algorytmu przedstawionego w uproszczony sposób na rys. 3.



Rys. 3. Algorytm wyznaczania prądów obciążeń trakcyjnych

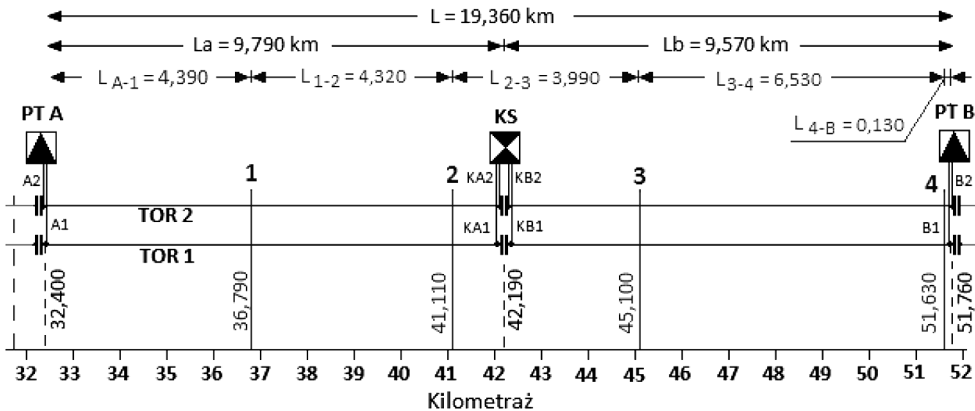
Fig. 3. Algorithm for traction load currents

Obliczenie obciążeń na odcinku zasilania sprowadza się przede wszystkim do wykonania tzw. przejazdów teoretycznych dla wszystkich poruszających się po nim pociągów zgodnie z rozkładami 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 rozpyw 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 wyłącznikach szybkich.

4.2. Podstawowe dane wyjściowe

4.2.1. Układ zasilania

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



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

Rys. 4. Analizowany układ zasilania

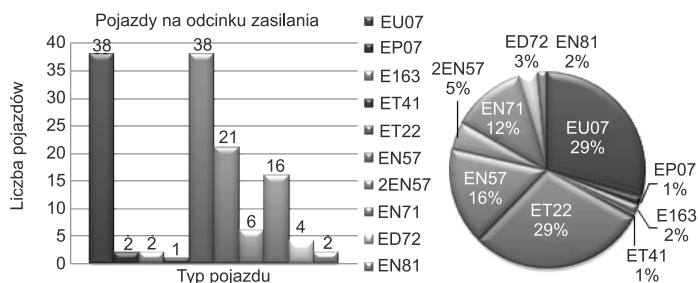
Fig. 4. Analyzed power supply system

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].

4.2.2. Tabor i planowany ruch

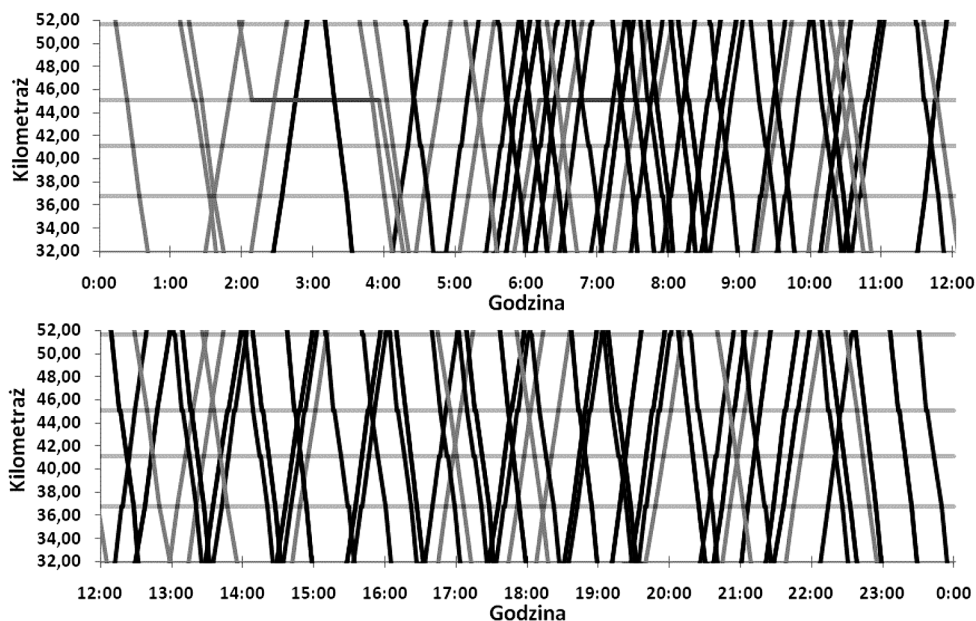
Informacja o tym, jakie elektryczne pojazdy trakcyjne kursują na rozpatrywanym odcinku zasilania, jest bardzo istotna przy dokonywaniu analizy prądów obciążenia. Różne typy pojazdów różnią się między sobą liczbą silników trakcyjnych, ich mocą oraz układem sterowania (sterowanie rezystorowe lub przekształtnikowe).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

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



Rys. 5. Zestawienie pojazdów elektrycznych

Fig. 5. Summary of electric vehicles

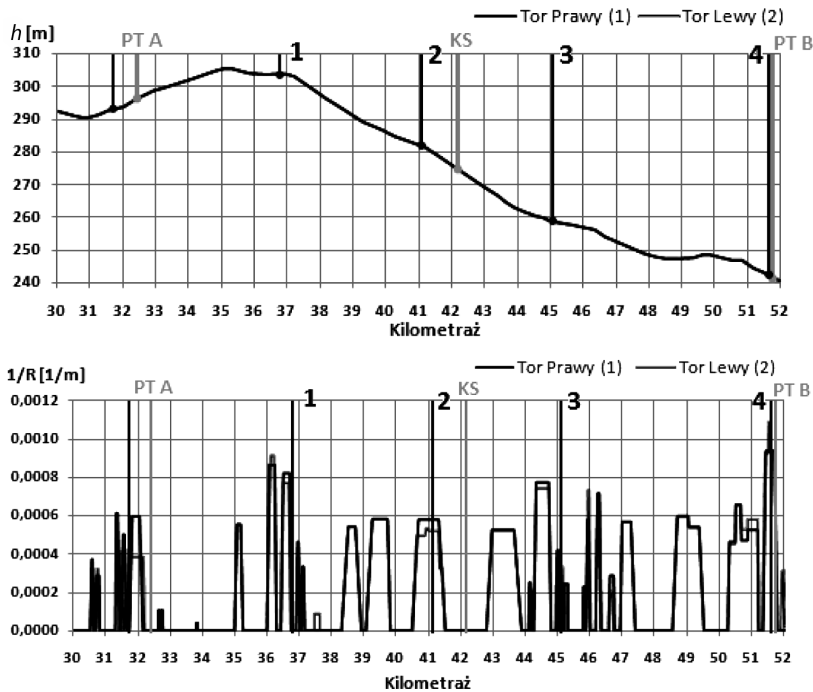


Rys. 6. Graficzny rozkład jazdy

Fig. 6. Graphical timetable

4.2.3. Charakterystyka trasy

Profil trasy, łuki oraz lokalizacja przystanków i stacji mają bardzo duże znaczenie dla ruchu pojazdów, a tym samym dla wartości obciążeń WS. Ukształtowanie terenu (profil i łuki) pokazano na rys. 7. Widać, że na rozpatrywanym odcinku zasilania dominują znaczne spadki w kierunku rosnącego kilometrażu oraz duża liczba łuków.



Oznaczenia: PT A – podstacja trakcyjna A; PT B – podstacja trakcyjna B; KS – kabina sekcyjna; 1, 2, 3, 4 – przystanki/stacje na analizowanym odcinku zasilania, h – wysokość terenu [m n.p.m.]; $1/R$ – krzywizna (odwrotność promienia łuku R)

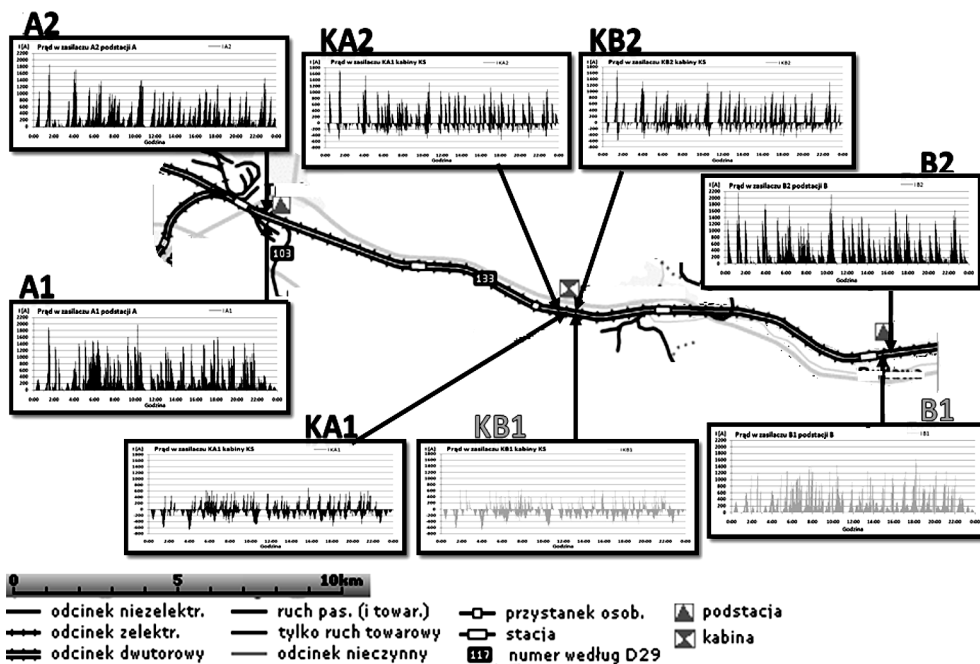
Rys. 7. Profil trasy i łuki na odcinku zasilania

Fig. 7. Route profile and arcs on power supply section

4.3. Wyniki symulacji

Wykonanie symulacji umożliwiło wyznaczenie przebiegów czasowych prądów obciążeń wyłączników szybkich zabezpieczających rozpatrywany odcinek zasilania. Obliczone obciążenia poszczególnych wyłączników szybkich w ciągu całego dnia przedstawiono poglądowo na rys. 8. Widać wyraźnie, jak dużą zmiennością charakteryzują się otrzymane przebiegi.

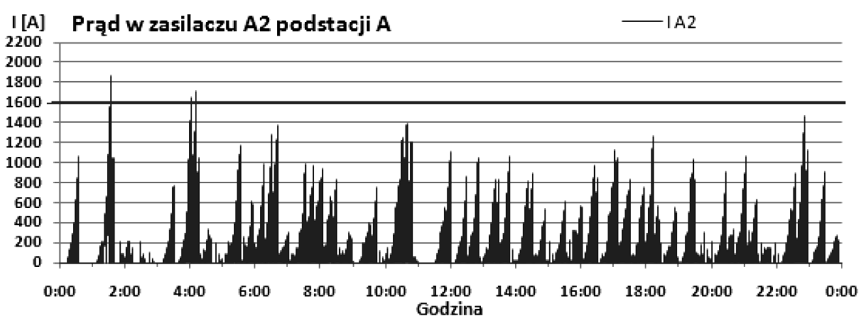
Ze względu na ograniczoną ilość miejsca zaprezentowane zostaną jedynie wybrane przebiegi. Rysunek 9 przedstawia przebieg prądu w zasilaczu A2 podstacji trakcyjnej A.



Oznaczenia: A1, A2 – zasilacze PT A; B1, B2 – zasilacze PT B; KA1, KA2, KB1, KB2 – zasilacze KS

Rys. 8. Wyniki symulacji

Fig. 8. Results of simulation



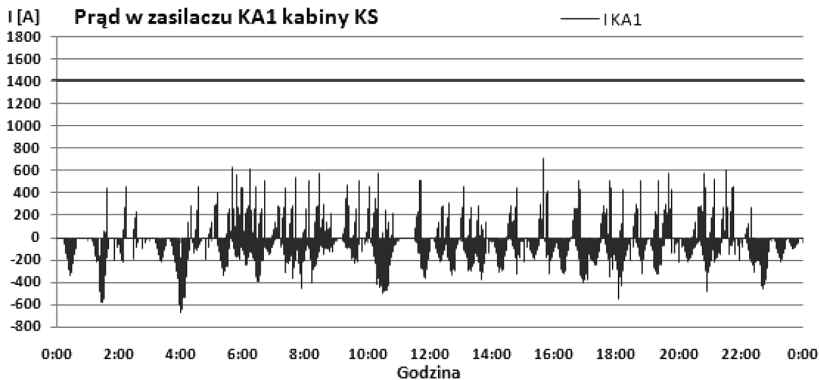
Oznaczenia: linia pozioma – nastawa WS w zasilaczu A2 (1600A)

Rys. 9. Obciążenie WS w zasilaczu A2

Fig. 9. Load of HSCB in line A2

Jak widać, prąd przez większość czasu nie przekracza nastawy WS, jednak występują sytuacje, gdzie może nastąpić zbędne zadziałanie WS. Nastawa tego wyłącznika powinna być wyższa.

Zupełnie inaczej kształtuje się obciążenie w zasilaczu KA1 kabiny sekcyjnej (rys. 10). Zauważmy, że w tym zasilaczu prąd ma przeważnie wartości ujemne, co oznacza przepływ w kierunku od sieci trakcyjnej do szyn zbiorczych kabiny, czyli w kierunku niepowodującym zadziałanie WS. Maksymalne wartości prądu w kierunku powodującym zadziałanie są zdecydowanie niższe niż nastawa WS. Zasadne byłoby zatem obniżenie progu zadziałania WS.

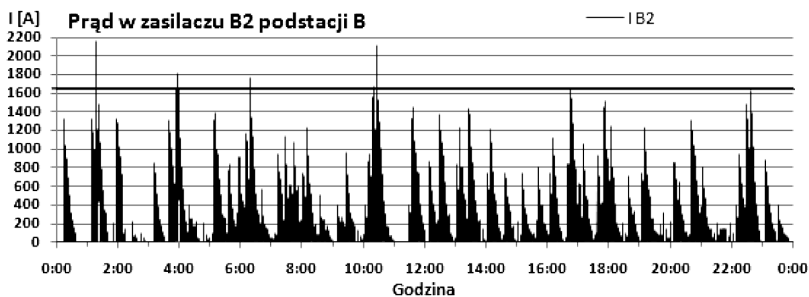


Oznaczenia: linia pozioma – nastawa WS w zasilaczu KA1 (1600A)

Rys. 10. Obciążenie WS w zasilaczu KA2

Fig. 10. Load of HSCB in line KA2

Symulacja wykazała, że najtrudniejsze warunki pracy ma wyłącznik w zasilaczu B2 (rys. 11).



Oznaczenia: linia pozioma – nastawa WS w zasilaczu B2 (1650A)

Rys. 11. Obciążenie WS w zasilaczu B2

Fig. 11. Load of HSCB in line B2

Obciążanie zasilacza B2 jest największe i prąd najczęściej przekracza tu nastawę wyzwalacza WS. Najwyższe wartości pojawiają się ok. godz. 1:30, 4:00 i 10:30, co – jak widać po rozkładzie jazdy (rys. 6) – ma związek z przejazdem pociągów towarowych w niewielkich odstępach czasu, prowadzonych przez sześciosilnikowe lokomotywy ET22. Zauważmy, że o godz. 1:30 oraz 4:00 natężenie ruchu jest stosunkowo niewielkie.

5. Wnioski

W celu właściwego i optymalnego nastawienia wyłącznika szybkiego konieczna jest znajomość zarówno minimalnego prądu zwarcia (I_{zwmin}), jaki może popłynąć, jak i maksymalnej wartości prądu obciążenia (I_{obcmax}). Wyznaczenie I_{zwmin} jest rzeczą stosunkową prostą i wymaga znajomości podstawowych parametrów układu zasilania, natomiast wyznaczenie I_{obcmax} jest bardzo trudne ze względu na mnogość czynników, które należy wziąć pod uwagę przy obliczeniach. Mimo tego wyznaczenie maksymalnej wartości prądu obciążenia daje znaczne korzyści, gdyż prowadzi do zmniejszenia kosztów eksploatacji wyłączników szybkich przez zminimalizowanie liczby zbędnych wyłączeń. Jak oszacowano we wstępie, koszty eksploatacji związane z niewłaściwym doбором nastaw mogą być liczone rocznie nawet w milionach złotych. Zdaniem autorów, bardziej dopasowana do obciążeń trakcyjnych nastawa wyłączników szybkich przyczynia się także do poprawy bezpieczeństwa, gdyż będzie powodowała działanie wyłącznika szybkiego tylko w stanach (albo prawie tylko) wymagających wyłączenia.

Symulacja obciążeń trakcyjnych umożliwiła określenie jeszcze przed wprowadzeniem zmian (np. zmiany rozkładu jazdy) lub na etapie projektowania, jakie skutki dla układu zasilania planowane zmiany mogą wywołać m.in. w aspekcie doboru nastawy WS.

Literatura

- [1] Nas i ł o w s k i J., *Wyłączniki i styczniki prądu stałego*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1960.
- [2] Ł u c z y w e k Z., S ł a b y L., *Elektromonter podstacji trakcyjnych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972.
- [3] W d o w i a k J., H a n a s z M., N a s i ł o w s k i J., *Podstacje trakcyjne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1958.
- [4] F r o n t c z a k F., *Podstacje trakcyjne i ich zasilanie*, Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.
- [5] M i e r z e j e w s k i L., S z e ł ą g A., G a ł u s z e w s k i M., *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
- [6] W d o w i a k J., M i e r z e j e w s k i L., S z e ł ą g A., *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego*, Wydawnictwo 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>.