

Lech Lipiński, Mirosław Miszewski

Parametry trakcyjne elektrycznych zespołów trakcyjnych w trakcji wielokrotnej przy ograniczeniu mocy pobieranej z sieci trakcyjnej

Do przewozu pasażerów w ruchu miejskim i podmiejskim przez szynowe pojazdy kolejowe chętnie wykorzystuje się elektryczne zespoły trakcyjne (EZT) zamiast tradycyjnych pociągów, złożonych z lokomotywy i wagonów pasażerskich. Zespoły trakcyjne umożliwiają szybszą wymianę pasażerów na poszczególnych przystankach.

Niewątpliwą wadą zespołów trakcyjnych jest to, że dopasowanie pojemności pociągów do wymagań przewozowych może odbywać się tylko dużymi skokami, przez zwielokrotnienie składu pociągu, czyli przy wykorzystaniu tak zwanej trakcji wielokrotnej. Należy zauważyć, że w przypadku pociągów wykorzystujących trakcję wielokrotną zespołów przyrost mocy pobieranej z sieci trakcyjnej przez taki pociąg również odbywa się dużymi skokami. Gdyby nie stosować żadnych środków, które ograniczą moc pobieraną przez pociąg, to byłaby ona wielokrotnością mocy pobieranej przez jeden EZT. Maksymalna moc dostępna w sieci trakcyjnej byłaby przekroczona już przy trakcji podwójnej EZT.

Na charakterystykach trakcyjnych napędów, oprócz strefy stałego momentu i strefy stałej mocy, występuje przy najwyższych prędkościach strefa osłabiania mocy. Jest to spowodowane dużym zakresem regulacji prędkości [2, 3, 5]. Występowanie tej strefy powoduje, że realizacja ograniczania mocy pobieranej przez pociąg złożony z zespołów w trakcji wielokrotnej przez maszynistę takiego pociągu na podstawie wskazań miernika, na przykład prądu trakcyjnego, jest w strefie osłabiania mocy niemożliwa.

W ogólnym przypadku ograniczanie mocy pobieranej z sieci trakcyjnej musi być realizowane automatycznie przez regulator napędu trakcyjnego. Osiąga się to przez odpowiednią modyfikację charakterystyk trakcyjnych poszczególnych napędów trakcyjnych w zależności od krotności trakcji.

Parametry trakcyjne elektrycznych zespołów trakcyjnych

Dane zespołu przyjętego do analizy zestawiono w tabeli 1. Charakterystyki trakcyjne pojedynczego silnika pokazano na rysunku 1. Aby wyznaczyć charakterystyki trakcyjne zespołu, przyjęto dodatkowe założenia upraszczające. Założono, że sprawność całego napędu trakcyjnego (przekształtnika, silnika i przekładni) jest stała i równa 92%. Założono też, że obciążone przetwornice statyczne pobierają z sieci trakcyjnej moc 250 kW. Jest to moc maksymalna pobierana przez te przetwornice z sieci trakcyjnej. Jednak nie jest znana zmienność tego obciążenia w czasie i dla-

tego konieczne jest przyjęcie do rozważań maksymalnej wartości tego obciążenia tak, aby w żadnej chwili moc pobierana z sieci trakcyjnej nie przekroczyła maksymalnej wartości mocy dostępnej.

Tabela 1

Parametry pojedynczego zespołu trakcyjnego przyjęte do obliczeń

Lp.	Wielkość	Wartość
1	Masa	[t] 194
2	Procent mas wirujących	[%] 10
3	Prędkość maksymalna	[km/h] 160
4	Prędkość eksploatacyjna	[km/h] 130
5	Maksymalne przyspieszenie do 50 km/h	[m/s ²] 1,0
6	Liczba silników trakcyjnych na jeden zespół	4
7	Liczba silników trakcyjnych na falownik	1

Ponadto, zgodnie z normą [6], należy uwzględnić fakt, że napędy trakcyjne powinny gwarantować rozwijanie znamionowej mocy trakcyjnej tylko przy napięciu w sieci trakcyjnej w granicach od 2700 V do 3600 V. Przy napięciach wykraczających poza ten zakres maksymalna moc rozwijana przez napędy trakcyjne powinna ulec ograniczeniu (rys. 2). Spowodowane to jest koniecznością zapewnienia warunków stabilnej pracy napędu.

Uwzględnienie mocy pobieranej przez przetwornice statyczne pozwala na wyznaczenie wszystkich charakterystyk trakcyjnych pojedynczego EZT-a. Przedstawiono je na rysunku 3. Przyjęto, że napięcie w sieci trakcyjnej ma najniższą dopuszczalną wartość, przy której jeszcze nie występuje konieczność ograniczania mocy trakcyjnej pojazdu, to znaczy $U_{mean\ useful} = 2700\text{ V}$.

Trakcja wielokrotna

Można przyjąć, że przy trakcji wielokrotnej zespołów, takie parametry trakcyjne, jak moc pobierana z sieci, prąd trakcyjny, będą wielokrotnością tych parametrów określonych dla pojedynczego zespołu trakcyjnego. Oznacza to, że przy trakcji podwójnej maksymalna moc pobierana przez pociąg z sieci mogłaby osiągnąć 6 MW, a przy trakcji potrójnej nawet 9 MW. Charakterystyki takie przedstawiono w [2].

Tylko w przypadku, gdyby moc pobierana z sieci trakcyjnej nie podlegała żadnym ograniczeniom, parametry trakcyjne pociągów złożonych z dwóch lub trzech zespołów byłyby takie same jak pojedynczego zespołu. Jednak ze względu na konieczność ograniczenia mocy pobieranej z sieci przez takie pociągi trzeba się liczyć z koniecznością pogorszenia się parametrów trakcyjnych pociągów, które wykorzystują trakcję wielokrotną. Istniejąca

w Polsce sieć trakcyjna prądu stałego umożliwia wprowadzenie prowadzenia ruchu pojazdów o mocach od 6 MW do 8 MW [4, 7]. Dotyczy to jednak tylko nowo budowanych lub zmodernizowanych linii, na których podstacje zasilane są z sieci 110 kV. Na istniejących liniach, nawet tych przystosowanych do prowadzenia ruchu pojazdów z prędkością 160 km/h, możliwości poboru mocy z sieci trakcyjnej są bardziej ograniczone i nie przekraczają zwykle mocy 5 MW. Graniczną moc, którą można pobierać z sieci trakcyjnej, określa właściciel infrastruktury elektroenergetycznej, czyli w warunkach polskich PLK wspólnie z PKP Energetyką SA. Zgodnie z tymi ustaleniami maksymalna moc, którą może pobierać cały pociąg z sieci trakcyjnej, jest równa 4 MW. Sieć trakcyjna powinna zapewnić taki pobór mocy przy napięciu w sieci trakcyjnej wynoszącej od 2700 V do 3600 V. Trzeba tu dodać, że na niektórych odcinkach możliwy jest większy pobór mocy, dochodzący do 6 MW.

Zatem w każdej chwili powinna być spełniona zależność:

$$P_{cat} = P'_{tract} + P'_{aux} \leq 4 \text{ MW} \quad (1)$$

gdzie:

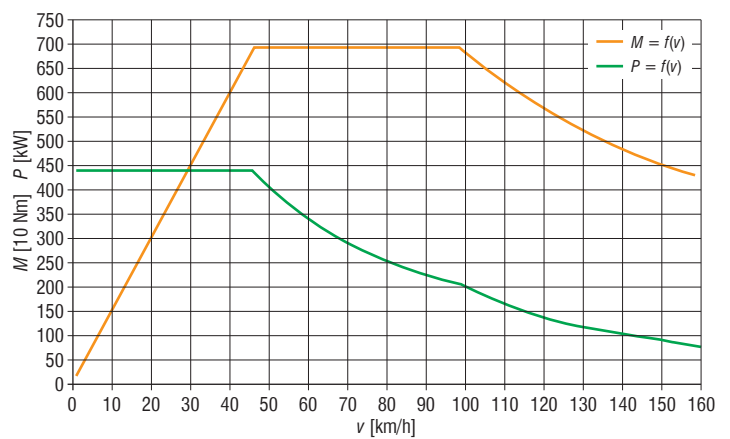
P_{cat} – moc pobierana z sieci trakcyjnej,

P'_{tract} – moc przeznaczona na cele trakcyjne,

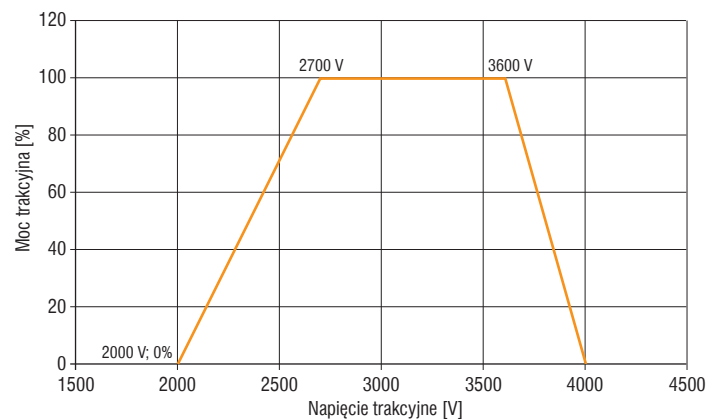
P'_{aux} – moc przeznaczona na zasilanie urządzeń pomocniczych zespołu.

Uwzględniając zależność (1) wyznaczono wstępnie charakterystyki trakcyjne pojedynczego napędu trakcyjnego. Ze względu na to, że ograniczanie mocy powinno odbywać się przy uwzględnieniu bieżącej wartości momentu maksymalnego silnika trakcyjnego (tak, aby wartość momentu zadanego przez układ sterowania pojazdu nie przekroczyła w żadnej chwili wartości momentu maksymalnego napędu) uzyskane charakterystyki porównano z oryginalną charakterystyką trakcyjną, pokazaną na rysunku 1. Zmodyfikowane charakterystyki trakcyjne napędu przy trójfazowej i potrójnej muszą się bowiem znaleźć pod oryginalną charakterystyką pojedynczego napędu. Ostateczny przebieg charakterystyk trakcyjnych zespołów w trójfazowej i potrójnej pokazano na rysunku 4 [2]. Jak widać, dla trójfazowej konieczne byłoby osłabienie mocy przy prędkościach powyżej 150 km/h ze względu na występowanie strefy osłabiania mocy na oryginalnych charakterystykach trakcyjnych silnika. Oczywiście jest, że przy analizie problemu ograniczania mocy błędem byłoby opieranie się tylko na wartości mocy pobieranej z sieci trakcyjnej i pominięcie w rozważaniach oryginalnej charakterystyki trakcyjnej silnika. Jest to tym bardziej widoczne, im bardziej zmodyfikowane charakterystyki trakcyjne zbliżają się do charakterystyk oryginalnych.

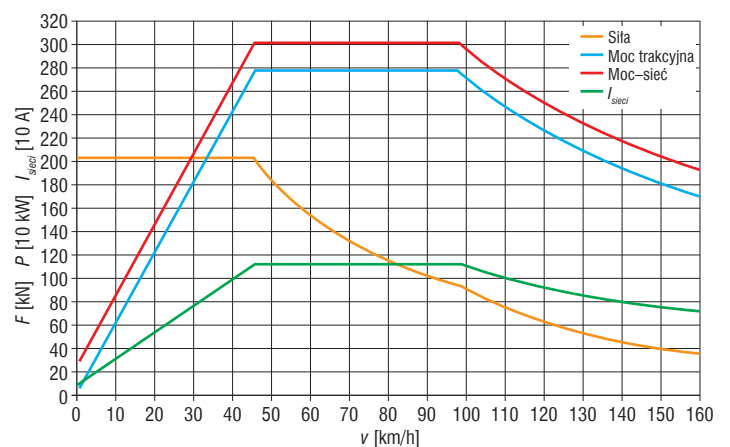
Z przedstawionych charakterystyk wynika również wniosek, że pozostawienie oryginalnych charakterystyk trakcyjnych napędów i próba realizacji ograniczania mocy pobieranej z sieci trakcyjnej przez samego maszynistę na podstawie, na przykład wartości prądu pobieranego z sieci trakcyjnej, jest niemożliwa w przypadku konieczności uwzględnienia na zmodyfikowanych charakterystykach trakcyjnych silnika strefy osłabiania mocy. W rozpatrywanym przypadku dodatkowe ograniczanie mocy ze względu na wystąpienie strefy osłabiania mocy nie wystąpiło tylko przy trójfazowej i tylko w tym przypadku byłoby możliwe ograniczanie mocy pobieranej z sieci przez samego maszynistę na podstawie wskazań mierników na pulpicie. Jednak w ogólnym



Rys. 1. Moment obrotowy i moc na wale silnika pojedynczego napędu trakcyjnego w funkcji prędkości pojazdu



Rys. 2. Maksymalna moc trakcyjna w zależności od napięcia w sieci trakcyjnej

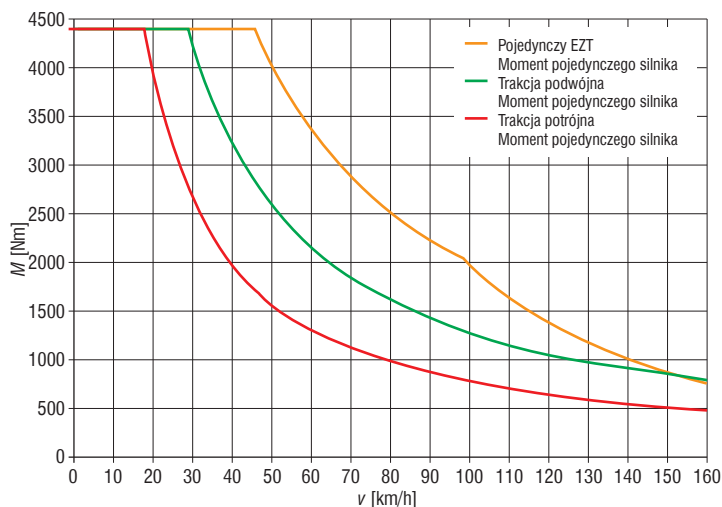


Rys. 3. Charakterystyki trakcyjne pojedynczego EZT-a; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V

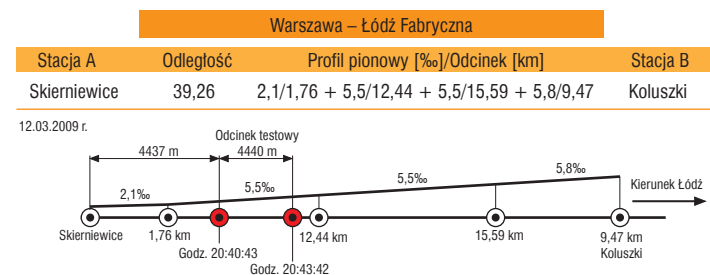
przypadku ograniczanie mocy powinno być realizowane przez regulator napędu trakcyjnego na podstawie zmodyfikowanej charakterystyki trakcyjnej napędu, uwzględniającej występowanie strefy osłabiania mocy. Takie zmodyfikowane charakterystyki trakcyjne powinny być zatem wpisane do software'u regulatora napędu i realizowane przez ten regulator, natomiast przełączanie między poszczególnymi charakterystykami powinno odbywać się automatycznie, za pomocą rozkazu z układu sterowania pojazdem. Dlatego układ sterowania pojazdem powinien w każdej chwili dysponować informacją, ile zespołów wchodzi w skład pociągu.

W trakcji potrójnej można wykorzystać dwie metody ograniczenia mocy:

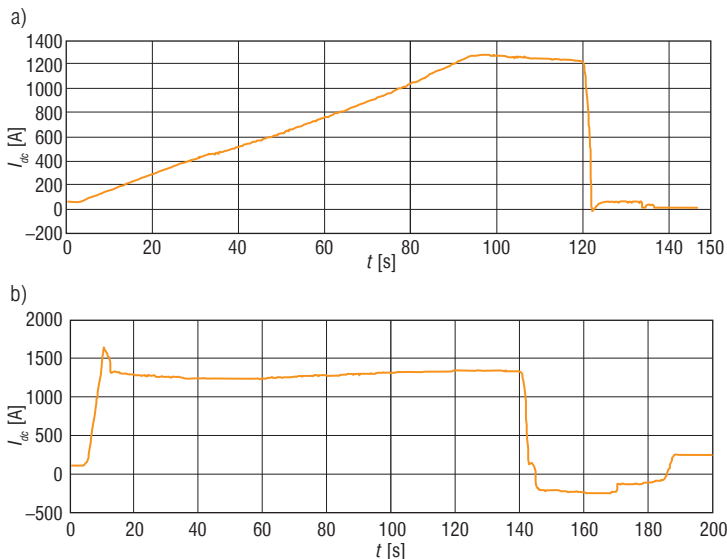
- równomierne ograniczenie mocy wszystkich napędów trakcyjnych zgodnie z charakterystyką trakcyjną dla trakcji potrójnej (rys. 4),
- ograniczenie mocy w dwóch zespołach zgodnie z charakterystyką trakcyjną jak dla trakcji podwójnej i wyłączenie napędów trakcyjnych w trzecim EZT, połączone z całkowitym odłącze-



Rys. 4. Charakterystyki trakcyjne pojedynczego napędu trakcyjnego dla różnych krotności trakcji w przypadku realizacji ograniczenia mocy pobieranej z sieci do 4 MW przez regulator napędu [2]



Rys. 5. Profil pionowy odcinka testowego



Rys. 6. Wyniki pomiarów prądu rozruchowego na podstacji: a – trakcja podwójna, b – trakcja potrójna

niem przekształtników od sieci trakcyjnej; ten sposób daje nieco gorsze parametry trakcyjne ze względu na mniejszą wartość przyspieszenia początkowego pociągu, ale może okazać się lepszy ze względu na kompatybilność elektromagnetyczną.

W pracy wykorzystano tylko pierwszą metodę ograniczania mocy.

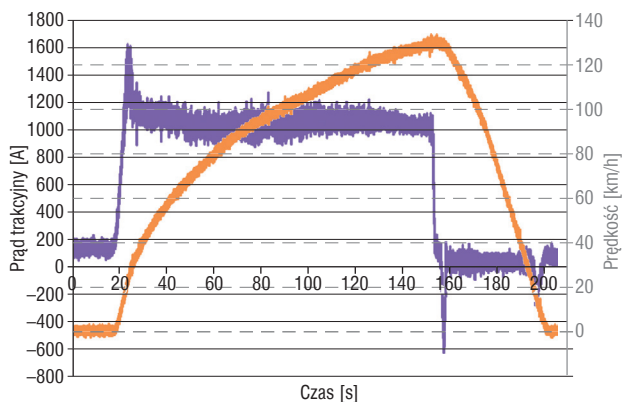
Wyniki badań

Pomiary parametrów trakcyjnych zespołów serii ED74 produkcji bydgoskiej PESY w trakcji wielokrotnej wykonano na wybranym odcinku trasy Skierniewice – Kuluszki. Profil pionowy tego odcinka pokazano na rysunku 5. Dla tego samego odcinka wykonano również obliczenia przejazdów teoretycznych i porównano je z wynikami otrzymanymi w czasie testów. Do rejestracji przebiegów wykorzystano zarówno rejestrator zdarzeń pojazdu, jak i niezależny rejestrator, mierzący przebiegi analogowe, pochodzące ze złącza diagnostycznego regulatora napędu trakcyjnego.

Na wstępie zbadano skuteczność działania algorytmu ograniczającego moc pobieraną przez EZT z sieci trakcyjnej. Na rysunkach 6 i 7 pokazano przebiegi prądów pobieranych w trakcji podwójnej i potrójnej. Największe zarejestrowane podczas tych badań wartości prądu trakcyjnego nie przekraczały 1600 A. Przykładowe przebiegi prądu trakcyjnego wyznaczone na podstacjach pokazano na rysunku 6. Podobny przebieg ma prąd zarejestrowany za pomocą rejestratora (rys. 7). Widoczne na tym rysunku nieznaczne przekroczenie wartości 1600 A może być spowodowane metodą obliczania wypadkowego prądu pociągu jako sześciokrotnej wartości prądu pobieranego przez jeden przekształtnik, do którego przyłączony był rejestrator.

Widoczne jest pewne przeregulowanie prądu trakcyjnego przy trakcji potrójnej. Spowodowane to zostało sposobem działania algorytmu ograniczania mocy, który ze swej natury musi charakteryzować się pewnym opóźnieniem działania, a trakcja potrójna charakteryzuje się bardzo szybkim narastaniem wartości prądu trakcyjnego podczas rozpędzania pociągu (rys. 6b). Widać, że przy wolniejszym narastaniu prądu, co ma miejsce przy trakcji podwójnej (rys. 6a), przeregulowanie jest znacznie mniejsze.

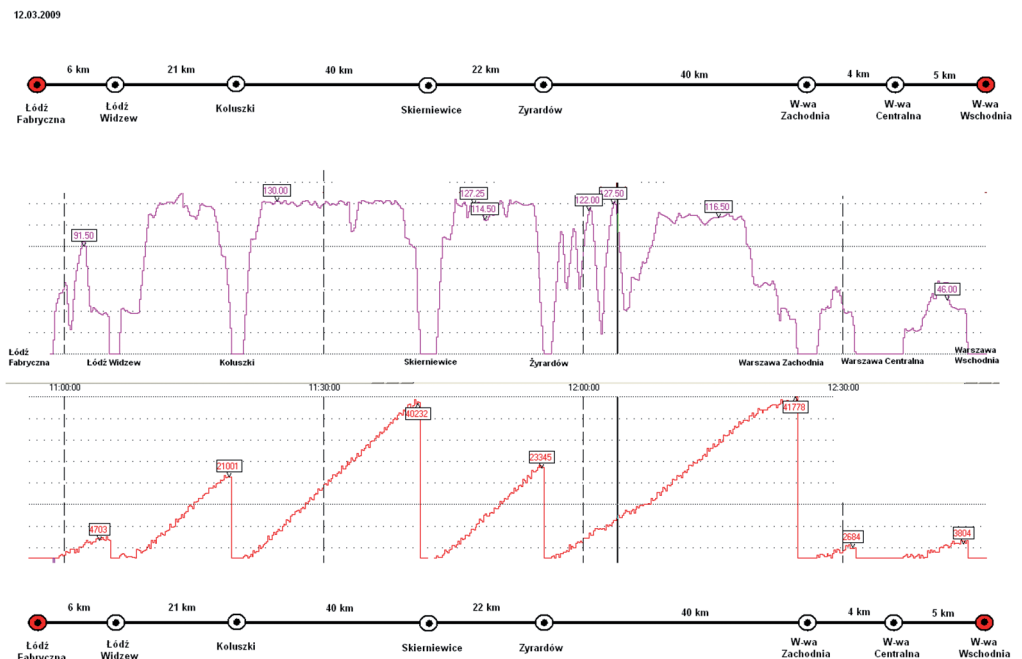
Następnie wyznaczono parametry trakcyjne zespołów w trakcji potrójnej, wykorzystując dodatkowo zapisy rejestratora zdarzeń pojazdu (rys. 8). Równoległe z badaniami parametrów trakcyjnych badano kompatybilność elektromagnetyczną pociągu w zakresie zakłóceń przewodzonych.



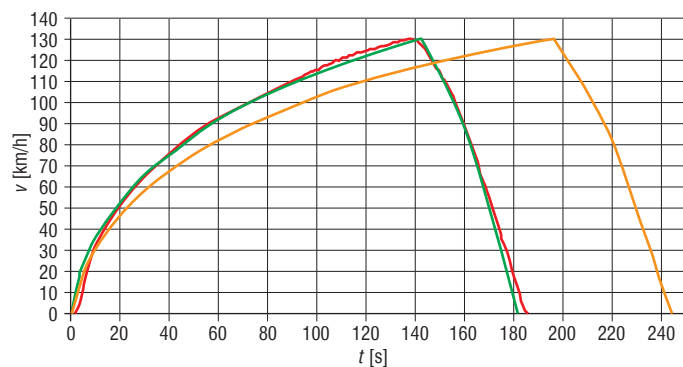
Rys. 7. Przebieg prądu trakcyjnego i prędkości EZT-ów w trakcji potrójnej kolor fioletowy – prąd trakcyjny, kolor pomarańczowy – prędkość

Na podstawie wielkości zarejestrowanych przez rejestrator zdarzeń wyznaczono parametry przejazdu przez odcinek testowy praktycznie pustym pociągiem złożonym z trzech EZT. Można przyjąć, że masa takiego pociągu była równa masie służbowej. Następnie zasymulowano ten przejazd, uzyskując dużą zgodność między uzyskanymi przebiegami (rys. 9). Chodziło w tym przypadku również o sprawdzenie poprawności wzoru na opory trawcji EZT, uzyskanego za pomocą regresji. Następnie zasymulowano przejazd na odcinku testowym pociągu wypełnionego pasażerami (masa maksymalna), co oznacza przejazd przy maksymalnej masie pociągu. Wyniki uzyskane za pomocą pomiarów i symulacji pokazano na rys. 9. Na rysunku 10 przedstawiono ten sam przebieg zapisany za pomocą rejestratora. Niezależnie od metody rejestracji uzyskano takie same wyniki.

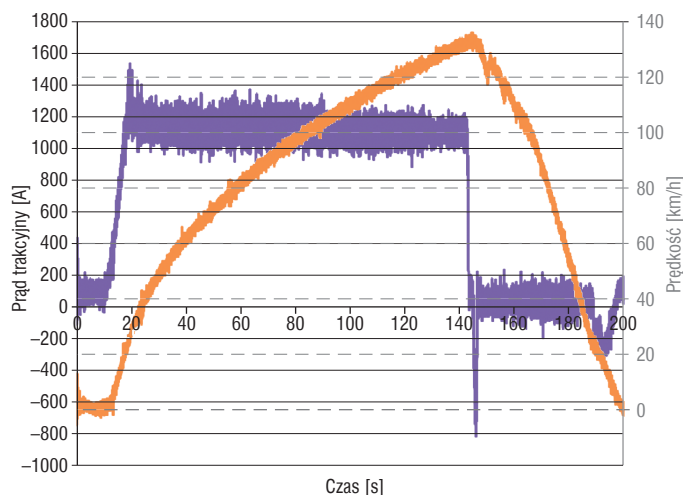
Wykorzystując zapisy rejestratora zdarzeń dokonane w czasie rejsowych przejazdów na linii Warszawa Zachodnia – Łódź Fabryczna przez aktualnie eksploatowane pociągi, wykorzystujące dwa zespoły bez ograniczania mocy (rys. 8; w rzeczywistości w niektórych miejscach linii Warszawa Zachodnia – Łódź Fabryczna moc pobierana z sieci trakcyjnej jest ograniczana przez samych maszynistów, którzy z doświadczenia wiedzą, że zadanie 100% siły trakcyjnej grozi przy dużych prędkościach wyłączeniem podstacji przez wyłącznik szybki – nastawy wyłączników szybkich na podstacjach zasilających tę linię wynoszą od 1600 A do 2400 A), wyznaczono czas, o który wydłuży się przejazd pociągu złożonego z trzech zespołów z ograniczaniem mocy. W tym celu rzeczywisty przejazd porównano z przejazdem symulowanym na rysunku 11 i w tabeli 2. Wynika z niego, że przejechanie odcinka między dwoma przystankami, na którym dozwolona jest prędkość 130 km/h wydłuży się o około 80 s. Średnie przyspieszenie do prędkości 50 km/h zmniejszyło się ze znamionowej wartości 1 m/s² do 0,6 m/s². Jeżeli dopuszczalna prędkość na danym odcinku jest mniejsza, wtedy wydłużenie czasu przejazdu jest mniejsze, chociaż sam czas przejechania danego odcinka się wydłuży. Wartości opóźnienia przy przejechaniu danego odcinka w zależności od prędkości maksymalnej podano w tabeli 2. Warto zauważyć, że na wydłużenie czasu przejazdu danego odcinka wpływ ma tylko wydłużenie czasu osiągnięcia prędkości maksymalnej przez pojazd, natomiast opóźnienie (czyli ujemne przyspieszenie) hamowania nie zależy ani od konfiguracji pociągu, ani od tego, czy zastosowano ograniczanie mocy pobieranej z sieci trakcyjnej i będzie zawsze równe opóźnieniu znamionowemu.



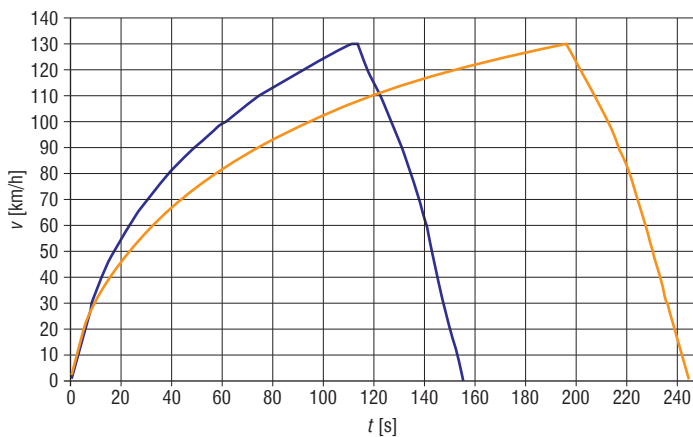
Rys. 8. Przykładowy zapis rejestratora zdarzeń obrazujący przejazdy EZT-ów w trawcji podwójnej bez ograniczania mocy: kolor fioletowy – prędkość, kolor czerwony – odległość między stacjami



Rys. 9. Wyniki pomiarów i obliczeń przejazdu odcinka testowego: kolor czerwony – przejazd rzeczywisty przy masie służbowej (rejestrator zdarzeń), kolor zielony – symulacja przejazdu przy masie służbowej, kolor pomarańczowy – symulacja przejazdu przy masie maksymalnej



Rys. 10. Wyniki pomiarów przejazdu odcinka testowego, zarejestrowane za pomocą rejestratora; oznaczenia jak na rys. 7

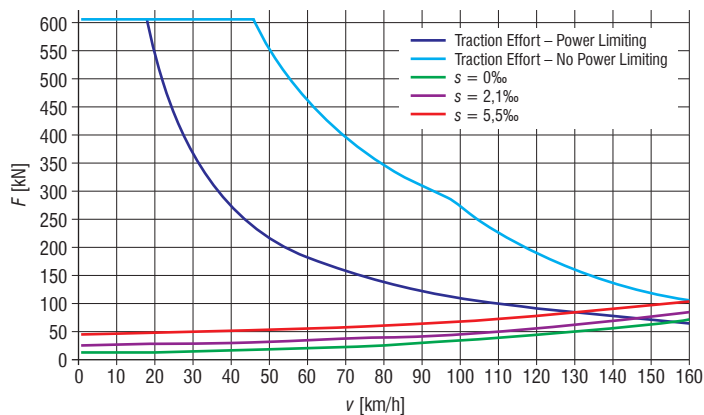


Rys. 11. Porównanie czasów przejazdu odcinka testowego
kolor granatowy – przejazd rzeczywisty dwóch zespołów bez ograniczania mocy (składy eksploatowane obecnie), kolor pomarańczowy – trzy EZT z ograniczeniem mocy, symulacja

Tabela 2

Wydłużenie czasu przejazdu w zależności od dopuszczalnej prędkości maksymalnej na danym odcinku trasy

Lp.	Prędkość maksymalna pociągu [km/h]	Rzeczywisty czas przejazdu w trakcji podwójnej bez ograniczania mocy	Czas przejazdu w trakcji potrójnej z ograniczeniem mocy (symulacja) [s]	Wydłużenie czasu osiągnięcia danej prędkości maksymalnej
1	20	5,52	5,4	0,12
2	40	14,70	15,3	0,60
3	60	26,30	32,0	5,70
4	80	38,60	57,2	18,60
5	100	60,70	94,2	33,50
6	120	91,20	152,0	61,00
7	130	111,00	195,0	84,00



Rys. 12. Wyznaczenie maksymalnej prędkości zespołu w trakcji potrójnej; masa pociągu maksymalna

Jeżeli uwzględni się liczbę przystanków na całej trasie i ewentualnie pewne zmniejszenie prędkości na wzniesieniach trasy i łukach, to można oszacować, że całkowite wydłużenie czasu przejazdu trasy Warszawa Zachodnia – Łódź Fabryczna wyniesie od 5 do 10 min. Nie jest to dużo, ale to jest tylko jeden z aspektów wykorzystywania trakcji potrójnej zespołów na tej trasie.

Ze względu na to, że maksymalna prędkość dopuszczalna na odcinku testowym wynosiła 140 km/h, ocenę możliwości jazdy przez zespoły z prędkością maksymalną w trakcji potrójnej przy masie maksymalnej przeprowadzono za pomocą obliczeń dla różnych profili trasy, wykorzystując wyznaczoną w czasie testów charakterystykę oporów trakcji. Wyniki przedstawiono na rysunku 12. Wynika z niego, że przy trakcji potrójnej z ograniczeniem mocy pociąg nie jest w stanie osiągnąć swojej znamionowej prędkości maksymalnej nawet na płaskiej trasie. Wynosi ona 157 km/h. Natomiast przy pochyleniu równym 5,5‰ wyniesie ona tylko 130 km/h.

Ponadto pociągi zestawione z trzech zespołów generują zakłócenia prądów harmonicznych, których wartości w niektórych pasmach przekraczają wartości dopuszczalne. Gdyby mimo to zdecydowano się na ich eksploatację pociągów złożonych z trzech zespołów, to w celu zmniejszenia wartości prądów interferencyjnych można w przyszłości wypróbować inny sposób ograniczania mocy pobieranej z sieci przez taki pociąg. Polegałby on na całkowitym wyłączeniu części przekształtników trakcyjnych i pomocniczych na jednym z zespołów. Byłaby to trakcja podwójna z trzema zespołami. Parametry trakcyjne takiego pociągu będą nieco gorsze niż przebadanego pociągu z trzema zespołami ze względu na mniejszą wartość przyspieszenia początkowego. Stwarza to jednak dodatkowe problemy związane z zasilaniem sieci napięcia pomocniczego.

Podsumowanie

Pociągi zestawione z trzech zespołów w trakcji potrójnej mogą być w warunkach polskich eksploatowane wyłącznie po zaimplementowaniu do układu sterowania napędem algorytmu ograniczania mocy ze względu na zbyt małą maksymalną wartość mocy dostępnej w sieci trakcyjnej. Maksymalna wartość tej mocy na danej linii zależy od stanu infrastruktury. Obecnie wynosi ona w warunkach polskich 4 MW. W przyszłości wartość maksymalnej mocy dostępnej na liniach konwencjonalnych w warunkach polskich może dojść do 6 MW. Jeżeli maksymalna wartość mocy dostępnej w sieci trakcyjnej na danej linii wzrośnie, możliwe będzie zaimplementowanie zmodyfikowanego algorytmu ograniczania mocy, ze zmienioną wartością tej mocy.