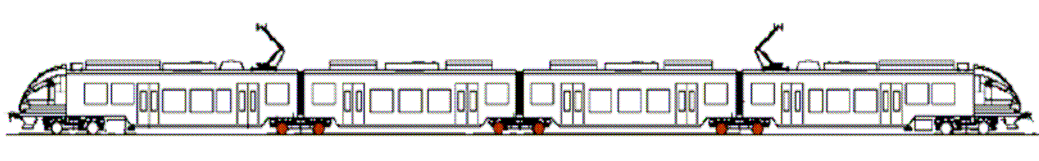


Lech Lipiński, Mirosław Miszewski  
Pojazdu Szynowe PESA Bydgoszcz SA Holding

## KSZTAŁTOWANIE CHARAKTERYSTYK TRAKCYJNYCH NAPĘDÓW DO ELEKTRYCZNYCH ZESPOŁÓW TRAKCYJNYCH W TRAKCJI WIELOKROTNEJ

### DETERMINING THE TRACTION CURVES OF EMU DRIVES FOR MULTIPLE RUNNING

**Abstract:** If electric multiple units (EMUs) are operated in multiple running, i.e. as trains formed from two or three EMUs coupled together, there is a necessity for limiting electric power drawn from the catenary by such a train. The value of limited power depends on parameters of substations supplying the rail lines on which such trains are operated. This paper deals with one of methods for determining the traction curves of EMU drives that allows for limiting the electric power drawn from the catenary. An example of determining the traction curves of EMU drives for double and triple running is given. The calculations for a hypothetical EMU are made. A given value of the maximum available power in the catenary is taken into consideration. The electric energy consumed by auxiliary converters for supplying EMU auxiliaries as well as the existence of the weakened power region (high-speed region) on the traction motor torque-speed characteristic curve are allowed for. As a result of calculations made, the traction curves of EMU drives are given. Such curves should be implemented in the EMU's drive control unit and used by the drive controller in the case of double or triple running of EMUs.



Rys. 1. Czterowagonowy elektryczny zespół trakcyjny (EZT), wykorzystujący wózki Jacobsa

#### 1. Wstęp

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. EZT-y umożliwiają szybszą wymianę pasażerów na poszczególnych przystankach.

EZT jest to zespół kilku wagonów, z których każdy pełni inną rolę. Z tego powodu zespół musi być eksploatowany jako jedna jednostka trakcyjna bez możliwości odłączania poszczególnych wagonów. Dzięki równomiernemu rozłożeniu masy na całą długość pociągu można uzyskać mniejsze naciski na poszczególne osie. Istnieje tu możliwość zastosowania napędu rozproszonego, co oznacza zwiększenie liczby napędzanych osi. Daje to zatem możliwość osiągnięcia dużej prędkości maksymalnej przy zmniejszonych naciskach na oś, a tym samym lepsze wykorzystanie przyczepności koła do

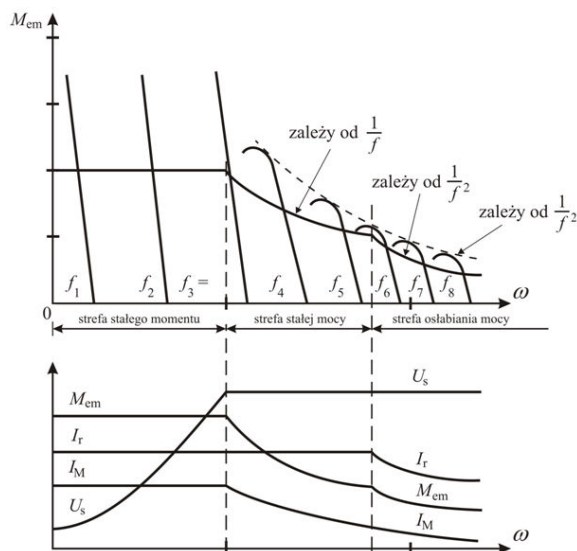
szyny. Ze względu na to, że w EZT nie ma wydzielonej lokomotywy, to przy tej samej liczbie pasażerów EZT ma mniejszą długość niż tradycyjny pociąg ciągnięty przez lokomotywę. W przypadku EZT-a łatwiejsze jest osiągnięcie mniejszej masy pociągu, szczególnie w przypadku stosowania wspólnych wózków dla wagonów środkowych, tak zwanych wózków Jacobsa (rys. 1) [4].

Wadą EZT-a jest to, że tylko przy małych pojemnościach pociągów EZT-y są tańsze od pociągów ciągniętych przez lokomotywę. Awaria jednego wagonu w składzie unieruchamia cały EZT. Ponadto w przypadku EZT-a całe wyposażenie elektryczne pojazdu musi być umieszczone pod podłogą, na dachu lub na pokładzie pojazdu. To ostatnie rozwiązanie zmniejsza pojemność pojazdu. Kolejną wadą EZT-a jest też to, że dopasowanie pojemności pociągów do wymagań przewozowych może odbywać się tylko dużymi skokami, przez zwielokrotnienie

składu pociągu. Tego typu eksploatacja EZT-ów w ramach jednego pociągu nazywa się trakcją wielokrotną. Należy tu dodać, że w przypadku pociągów wykorzystujących trakcję wielokrotną EZT-ów 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. Do dalszych rozważań przyjęto, że każdy EZT napędzany jest przez cztery trakcyjne silniki indukcyjne, napędzające cztery osie skrajnych wózków pojazdu (po dwie z każdej strony). Ponadto założono, że każdy silnik zasilany jest z oddzielnego falownika.

## 2. Charakterystyka asynchronicznego napędu trakcyjnego

Cechą charakterystyczną napędów trakcyjnych jest to, że regulacja prędkości silnika odbywa się w szerokich granicach. To sprawia, że oprócz doskonale znanych z teorii napędu dwóch stref regulacji prędkości: przy stałym momencie (stałym strumieniu) i przy stałej mocy (osłabieniu strumienia) – powyżej strefy stałej mocy, przy najwyższych prędkościach pojawia się dodatkowa trzecia strefa – strefa osłabiania mocy (rys. 1) [2].



Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego z trzema strefami regulacji prędkości [2]:  $f$  – częstotliwość napięcia stojana,  $\omega$  – prędkość kątowa silnika,  $M_{em}$  – moment elektromagnetyczny silnika,  $I_r$  – prąd wirnika silnika,  $I_M$  – prąd magnesujący silnika,  $U_s$  – napięcie stojana silnika

Jak wiadomo moment maksymalny silnika indukcyjnego sterowanego częstotliwościowo określony jest (przy pominięciu rezystancji stojana) przybliżonym wzorem [1]:

$$M_k = M_{kN} (\alpha_U / \alpha_f)^2, \quad (1)$$

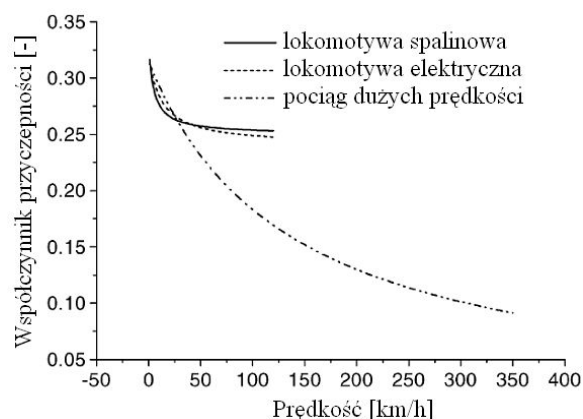
w którym:

$M_k$  – bieżąca wartość momentu maksymalnego,  $M_{kN}$  – znamionowa wartość momentu maksymalnego,

$\alpha_U$  – względna wartość napięcia:  $U/U_N$ ,

$\alpha_f$  – względna wartość częstotliwości:  $f/f_N$ .

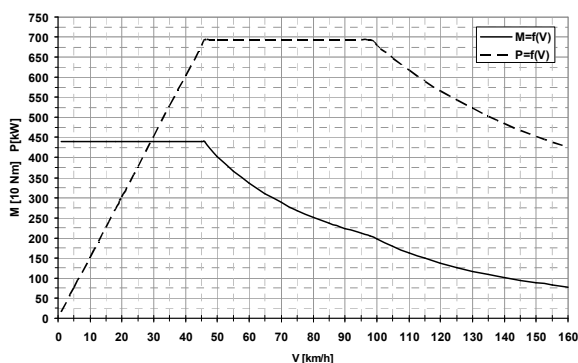
Powstanie tej strefy spowodowane zostało tym, że przy stałym napięciu stojana i przy wzroście prędkości, a zatem i częstotliwości napięcia stojana, moment utyku silnika maleje szybciej (jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu częstotliwości) niż maksymalny moment silnika, który może być rozwijany przez silnik w strefie stałej mocy (jego wartość wynika z maksymalnej wartości prądu stojana) i który wynika z warunku na stałą moc (jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości). Jeżeli bieżąca wartość przeciążalności silnika zmniejszy się poniżej 1,2 – konieczne staje się osłabianie maksymalnego momentu, który może rozwinać napęd, tak by przy każdej prędkości moment napędowy lub hamujący silnika był mniejszy od bieżącej wartości momentu utyku. Niezbędne jest więc wprowadzenie trzeciej strefy regulacji prędkości – strefy osłabiania mocy.



Rys. 3. Zależność współczynnika przyczepności koło-szyna od prędkości pojazdu (dla szybkich kolei chińskich) [7]

Tak więc w strefie regulacji przy stałej mocy dysponowany moment maksymalny napędu jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do prędkości, a w strefie osłabiania mocy odwrotnie proporcjonalny do kwadratu prędkości. Taka charakterystyka jest z pewnych powodów

korzystna dla napędu, ponieważ w miarę wzrostu prędkości pojazdu maleje współczynnik przyczepności koło-szyna (rys. 3) [7]. Gdyby w strefie większych prędkości nie nastąpiło zmniejszenie wartości maksymalnego momentu silnika, który może rozwijać napęd, mogłoby dojść do poślizgu między kołem a szyną. Do dalszych rozważań przyjęto napęd o charakterystyce trakcyjnej pokazanej na rysunku 4. Charakterystykę taką dostarcza producent silnika trakcyjnego, na podstawie znajomości przekładni, średnicy kół pojazdu, przebiegu trasy, na której ma być eksploatowany pojazd, oraz wymaganych parametrów trakcyjnych pojazdu (wartość początkowego przyspieszenia, prędkość maksymalna itp.). W przypadku każdego pojedynczego napędu trakcyjnego w dowolnym stanie pracy siła zadana przez układ sterowania pojazdem nie może być większa od siły trakcyjnej wynikającej z rysunku 4. Nieprzebranie tego warunku grozi w zakresie mniejszych prędkości (strefa stałego momentu i dolna część strefy stałej mocy) przegrzaniem silnika (oczywiście przy jeździe po określonej trasie), a w górnym zakresie prędkości (górną część strefy stałej mocy i strefa osłabiania mocy) – utykami, czyli zatrzymaniem napędu. Taki parametr silnika, jak moc przy pracy ciągłej  $S_1$ , ma drugorzędne znaczenie, gdyż, w przypadku silników trakcyjnych o wymuszonym chłodzeniu, moc ta zależy od przyjętego wydatku powietrza chłodzącego i dla danego silnika może się zmieniać.



Rys. 4. Moment obrotowy i moc na wale silnika pojedynczego napędu trakcyjnego w funkcji prędkości pojazdu

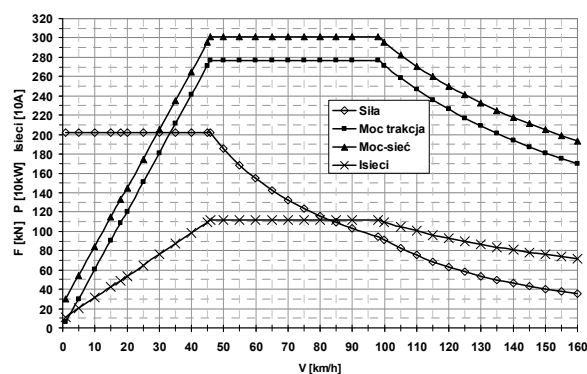
Ponadto zgodnie z normą [5] należy uwzględnić fakt, że napędy trakcyjne powinny gwarantować rozwijanie znamionowej mocy trakcyjnej przy napięciach w sieci trakcyjnej w granicach od 2700 V do 3600 V. Przy napięciach w sieci trakcyjnej wykraczającej poza ten zakres mak-

symalna moc rozwijana przez napędy trakcyjne powinna ulec ograniczeniu.

Producent przekształtnika trakcyjnego musi uwzględnić charakterystykę pokazaną na rysunku 3, układając program sterujący przekształtnika. Sterowanie mikroprocesorowe napędami trakcyjnymi umożliwia w praktyce kształtowanie charakterystyki napędów w dowolny sposób. Do dalszej analizy przyjęto EZT o danych przedstawionych w tabelicy 1.

Tablica 1. Parametry pojedynczego EZT-a przyjęte do obliczeń

Lp.	Wielkość	Wartość
1	Masa EZT-a	194 t
2	Procent mas wirujących	10%
3	Prędkość maksymalna	160 km/h
4	Maks. przyspieszenie do 50 km/h	1,0 m/s <sup>2</sup>
5	Liczba silników trakcyjnych na Ezecie	4
6	Całkowita sprawność napędu	92%
7	Moc z sieci trakcyjnej przeznaczona na zasilanie urządzeń pomocniczych	250 kW



Rys. 5. Pobór mocy z sieci trakcyjnej przez pojedynczy EZT; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V

Przy obliczeniach energetycznych należy dodatkowo uwzględnić, że EZT oprócz energii na potrzeby trakcyjne, pobiera też energię do zasilania urządzeń pomocniczych pojazdu, realizujących takie funkcje jak: ogrzewanie, wentylację, klimatyzację, przewietrzanie silników trakcyjnych, ładowanie baterii akumulatorów itp. Energia ta w przypadku nowoczesnych EZT-ów stanowi znaczącą część ogółu energii pobieranej przez pojazd i w rozważaniach nie może być pominięta. Zatem:

$$P_{\text{cat}} = P'_{\text{tract}} + P'_{\text{aux}}, \quad (2)$$

w którym:

$P_{\text{cat}}$  – moc pobierana z sieci trakcyjnej,

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

$P'_{\text{aux}}$  – moc przeznaczona na zasilanie urządzeń pomocniczych EZT-a.

Zarówno  $P'_{\text{tract}}$ , jak i  $P'_{\text{aux}}$  uwzględniają straty mocy przy przetwarzaniu energii pobranej z sieci trakcyjnej na odpowiednio: moc trakcyjną na obręczy kół i moc urządzeń pomocniczych. Dla uproszczenia obliczeń założono, że całkowita sprawność jest stała i równa 92%. Dodatkowo przyjęto jako stałą maksymalną moc pobieraną z sieci trakcyjnej przez urządzenia pomocnicze pojazdu.

Uwzględnienie mocy urządzeń pomocniczych pozwala na wyznaczenie wszystkich charakterystyk pojedynczego EZT-a. Przedstawiono je na rysunku 5. Ponadto w celu wyznaczenia przedstawionych charakterystyk przyjęto, że napięcie w sieci trakcyjnej ma najniższą dopuszczalną wartość, która jeszcze nie wymaga ograniczania mocy trakcyjnej pojazdu, to znaczy  $U_{\text{mean useful}} = 2700 \text{ V}$  [5].

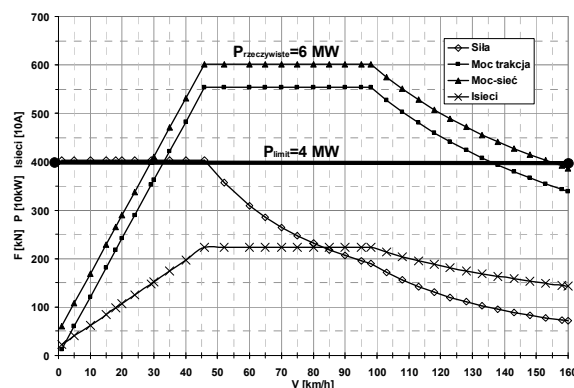
### 3. Trakcja wielokrotna EZT-ów

Przy trakcji wielokrotnej EZT-ów można przyjąć, że takie parametry trakcyjne, jak moc pobierana z sieci, prąd trakcyjny, będą wielokrotnością tych parametrów określonych dla pojedynczego EZT-a. Charakterystyki trakcyjne EZT-ów w trakcji podwójnej i potrójnej przy napięciu w sieci trakcyjnej równym 2700 V pokazano na rysunkach 5 i 6. Są one podstawą do dalszych rozważań i obliczeń. Gdyby moc pobierana z sieci trakcyjnej nie podlegała żadnym ograniczeniom, parametry trakcyjne pociągów złożonych z dwóch lub trzech EZT-ów byłaby taka sama jak pojedynczego EZT-a.

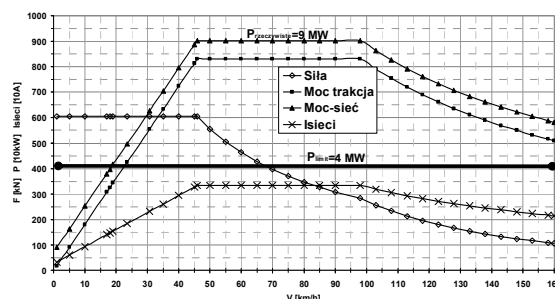
Istniejąca w Polsce sieć trakcyjna prądu stałego umożliwia wprawdzie prowadzenie ruchu pojazdów o mocach od 6 MW do 8 MW [5, 6]. Dotyczy to jednak tylko nowo budowanych lub zmodernizowanych linii, na których podstacje zasilane są z sieci 110 kV. Na istniejących liniach, nawet tych przystosowanych do prowadzenia ruchu pojazdów z prędkością 160 km/h, możliwości poboru mocy z sieci trakcyjnej są bardziej ograniczone i nie przekraczają zwykle mocy 5 MW. Graniczna moc, którą można pobierać z sieci trakcyjnej określa właściciel infrastruktury, czyli w warunkach polskich PLK. Może tę moc określić dwiema metodami: albo

podając maksymalny prąd, który można pobierać z sieci (na podstawie nastaw wyłączników szybkich na podstacjach), albo podając bezpośrednio wartość mocy dla określonego przedziału wartości napięcia sieci trakcyjnej.

Do dalszych rozważań przyjęto, że maksymalna moc, którą może pobierać cały pojazd 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. Przy wyznaczaniu charakterystyk pojazdu przyjęto, że napięcie sieci trakcyjnej wynosi  $U_{\text{mean useful}} = 2700 \text{ V}$  [5].



Rys. 6. Pobór mocy z sieci trakcyjnej przez EZT-y w trakcji podwójnej; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V



Rys. 7. Pobór mocy z sieci trakcyjnej przez EZT-y w trakcji potrójnej; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V

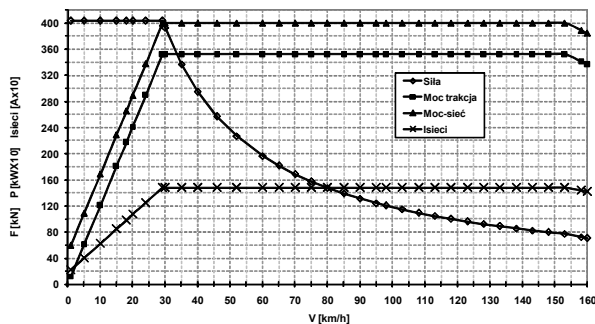
Z rysunków 5 – 7 wynika, że tylko pojedynczy EZT nie wymaga ograniczania mocy pobieranej z sieci trakcyjnej. Natomiast z rysunku 6 wynika, że przy trakcji podwójnej maksymalna moc pobierana z sieci przekroczy 4 MW przy rozpędzaniu już od prędkości równej około 30 km/h, jeżeli rozpędzanie pociągu odbywałoby się przy maksymalnym przyspieszeniu. Przekroczenie dopuszczalnej wartości mocy może wynosić nawet 50%. Przy trakcji potrójnej przekroczenie mocy może nastąpić już od prędkości 18 km/h (rys. 6). Możliwe jest tu po-

nad sto procentowe przekroczenie maksymalnej mocy dostępnej w sieci trakcyjnej.

Z powyższych rozważań wynika, że eksploatacja EZT-ów w trakcji wielokrotnej, począwszy już od trakcji podwójnej, wymaga zastosowania ograniczenia mocy, pobieranej z sieci przez pojedynczy EZT. Ograniczanie mocy powinno odbywać się przy uwzględnieniu bieżącej wartości momentu maksymalnego silnika trakcyjnego, tak aby wartość momentu zadanego przez układ sterowania pojazdu nie przekroczył w żadnej chwili momentu maksymalnego silnika.

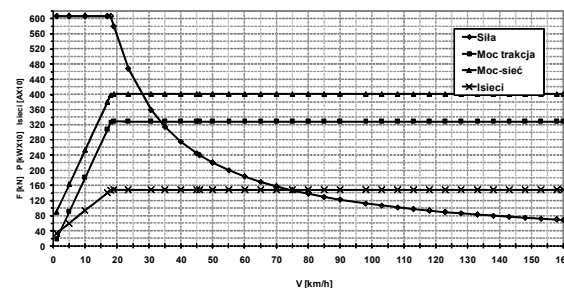
#### 4. Ograniczenie poboru mocy przy trakcji wielokrotnej EZT-ów

W celu wyznaczenia charakterystyk trakcyjnych napędów, niepowodujących przekroczenia maksymalnej mocy dostępnej w sieci trakcyjnej przez pociąg przeprowadzono ponowne obliczenia dopuszczalnych charakterystyk trakcyjnych silników dla EZT-ów w trakcji podwójnej i potrójnej, uwzględniając przy tym charakterystykę silnika trakcyjnego, podaną przez producenta (rys. 4). Przy wyznaczaniu tych charakterystyk przyjęto pobór mocy przez urządzenia pomocnicze pojazdu taki sam, jak podany w rozdziale 2 (Tablica 1). W rezultacie uzyskano charakterystyki pokazane na rysunkach: 8 – dla trakcji podwójnej, oraz 9 – dla trakcji potrójnej.

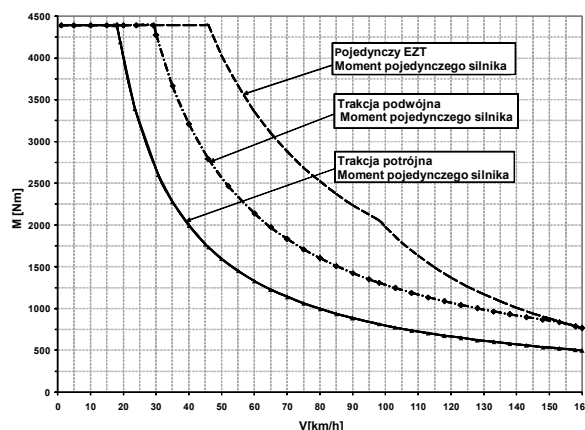


Rys. 8. Charakterystyki trakcyjne EZT-ów w trakcji podwójnej przy ograniczeniu mocy pobieranej z sieci do 4 MW; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V

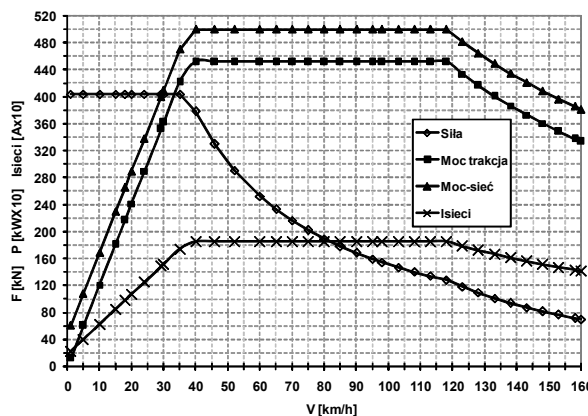
Jak widać, w przypadku trakcji podwójnej konieczne było dodatkowe ograniczenie mocy napędu (przy prędkości około 150 km/h) ze względu na występowanie strefy osłabiania mocy na charakterystykach trakcyjnych silnika.



Rys. 9. Charakterystyki trakcyjne EZT-ów w trakcji potrójnej przy ograniczeniu mocy pobieranej z sieci do 4 MW; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V



Rys. 10. Charakterystyki trakcyjne pojedynczego napędu trakcyjnego dla różnych krotności trakcji w przypadku realizacji ograniczenia mocy pobieranej z sieci do 4 MW przez regulator napędu; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V



Rys. 11. Charakterystyki trakcyjne EZT-ów w trakcji podwójnej przy ograniczeniu mocy pobieranej z sieci do 5 MW; napięcie w sieci trakcyjnej 2700 V

Konieczność tego dodatkowego ograniczenia widać też wyraźnie na rysunku 10. Zmodyfikowana charakterystyka trakcyjna napędu przy trakcji podwójnej nie może się znaleźć nad oryginalną charakterystyką pojedynczego napędu. Widać, że przy analizie problemu błędem byłoby opieranie się tylko na wartości mocy po-

bieranej z sieci trakcyjnej i pominięcie w rozważaniach charakterystyki trakcyjnej silnika (rys. 3). Jest to tym bardziej widoczne, im bardziej zmodyfikowane charakterystyki trakcyjne zbliżają się do charakterystyk oryginalnych, jak to ma miejsce na przykład przy mniejszym ograniczeniu mocy do wartości 5 MW (rys.11). 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 naszym przypadku dodatkowe ograniczanie mocy ze względu na wystąpienie strefy osłabiania mocy nie wystąpiło tylko przy trakcji potrójnej i tam tylko możliwe byłoby ograniczanie mocy pobieranej z sieci przez maszynistę. Jednak w ogólnym przypadku ograniczanie mocy powinno być realizowane przez regulator napędu trakcyjnego na podstawie odpowiednio zmodyfikowanej charakterystyki trakcyjnej napędu, uwzględniającej występowanie strefy osłabiania mocy.

## 5. Wnioski

Na charakterystykach trakcyjnych silnika, oprócz strefy stałego momentu i strefy stałej mocy, pojawia się przy najwyższych prędkościach strefa osłabiania mocy. Jest to spowodowane dużym zakresem regulacji prędkości. Eksploatacja elektrycznych zespołów trakcyjnych w trakcji wielokrotnej przy zasilaniu takiego pociągu z sieci trakcyjnej o ograniczonej wartości maksymalnej mocy dostępnej w sieci, wymaga ograniczania mocy pobieranej przez pociąg. Występowanie strefy osłabiania mocy powoduje, że realizacja ograniczania mocy pobieranej przez pociąg złożony z EZT-ów 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 powinno być realizowane automatycznie przez regulator napędu trakcyjnego. Osiąga się to przez odpowiednią modyfikację charakterystyk trakcyjnych poszczególnych napędów trakcyjnych w zależności od krotności trakcji. Przy obliczaniu zmodyfikowanych charakterystyk trakcyjnych należy

uwzględnić występowanie strefy osłabiania mocy na charakterystykach trakcyjnych silnika.

## 6. Literatura

- [1]. Leonhard W.: *Control of Electrical Drives*. 3<sup>rd</sup> Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2001
- [2]. Lipiński L., Miszewski M., Żarnowski R.: *Nowoczesne asynchroniczne napędy przekształtnikowe dla pasażerskich pojazdów trakcyjnych na napięcie 3 kV prądu stałego*. Wiadomości Elektrotechniczne 2007, nr 6
- [3]. Steimel A.: *Electric Railway Traction in Europe. A Survey of the State-of-the-Art*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1996, Volume 1, pp. 40 – 48
- [4]. Steimel A.: *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply. Basics and Practical Experience*. Oldenbourg Industrieverlag München 2008
- [5]. Polska Norma PN-EN 50388:2006. *Zastosowania kolejowe – Zasilanie energią a tabor – Kryteria techniczne dotyczące koordynacji zasilania energią (podstacja) z taborom w celu uzyskania interoperacyjności*
- [6]. Szelaż A., Mierzejewski L.: *Problemy zasilania linii dużych prędkości jazdy*. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK 2006
- [7]. Zhang W., Chen J., Wu X., Jin X.: *Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig*. Wear 253 (2002) 82–88

## Autorzy

mgr inż. Lech Lipiński  
e-mail: lech.lipinski@pesa.pl

dr inż. Mirosław Miszewski  
e-mail: miroslaw.miszewski@pesa.pl

Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz SA Holding, ul. Zygmunta Augusta 11, 85-082 Bydgoszcz; tel. (0)52 339 13 77