

Wiesław Jagła, Janusz Dziulak

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki

#### ZAGADNIENIE WYKORZYSTANIA MAKSYMALNEJ SIŁY POCIĄGOWEJ W LOKOMOTYWACH ELEKTRYCZNYCH Z INDYWIDUALNYM NAPĘDEM OSI

**Streszczenie.** W artykule omówiono niektóre problemy związane z pracą lokomotyw elektrycznych przy maksymalnych siłach pociągowych. Przedstawiono stosowane metody wykrywania poślizgu oraz środki jego likwidacji. Podano opis cyfrowego urządzenia wykrywania i sterowania likwidacją poślizgu oraz jego zalety w porównaniu z urządzeniami stosowanymi.

Nowoczesną trakcję szynową charakteryzują dwie cechy: duże prędkości zarówno w ruchu pasażerskim jak i towarowym oraz duże ciężary pociągów towarowych.

W miarę zwiększania mocy lokomotyw elektrycznych i spalinowo-elektrycznych, na haku lokomotywy występują duże siły pociągowe. Możliwość wytwarzania dużych sił pociągowych przez pojazdy trakcyjne bez powstawania poślizgu związana jest z wielkością tarcia między kołem a szyną. Chwilowe przekroczenie maksymalnej siły pociągowej może doprowadzić do poślizgu, również przy zerwaniu przyczepności pojazdu szynowego w czasie hamowania mamy do czynienia ze zjawiskiem poślizgu.

Jednocześnie przy zmianach prędkości jazdy równomierny statyczny rozkład ciężaru lokomotywy na poszczególne osie ulega zakłóceniu. Wynikiem tego jest powstanie dogodnych warunków dla rozwinięcia się poślizgu, ponieważ przy niezmiennym momencie obrotowym odciążona oś łatwiej wpaśnie w poślizg niż pozostałe. Siła pociągowa wywierana przez oś, która weszła w poślizg, maleje, co powoduje przenoszenie się oporów ruchu na pozostałe osie, co z kolei stwarza warunki sprzyjające ich poślizgowi.

Ze zjawiskiem poślizgu spotykamy się w momencie, gdy wartość maksymalnej siły przyczepnej pojazdu trakcyjnego zostanie przekroczona przez wartość siły pociągowej. Poślizg ma charakter przerywany i zależnie od istniejących warunków może albo się rozwinąć albo samoistnie zaniknąć.

Z uwagi na to, iż jest to zjawisko niekorzystne i niepożądane w eksploatacji taboru kolejowego stosuje się szereg środków konstrukcyjnych zapobiegania poślizgom, a w przypadku ich małej skuteczności wyposaża się lokomotywy w urządzenia wykrywające poślizg i likwidujące go.

Aby zapewnić poruszanie się pojazdu powodowane toczeniem się koła po szynie, konieczne jest, aby w każdej chwili siła na obwodzie koła miała wartość mniejszą lub równą wartości siły tarcia. Wartość siły tarcia zależy od nacisku osi na szynę oraz od współczynnika przyczepności w punkcie styku koła z szyną.

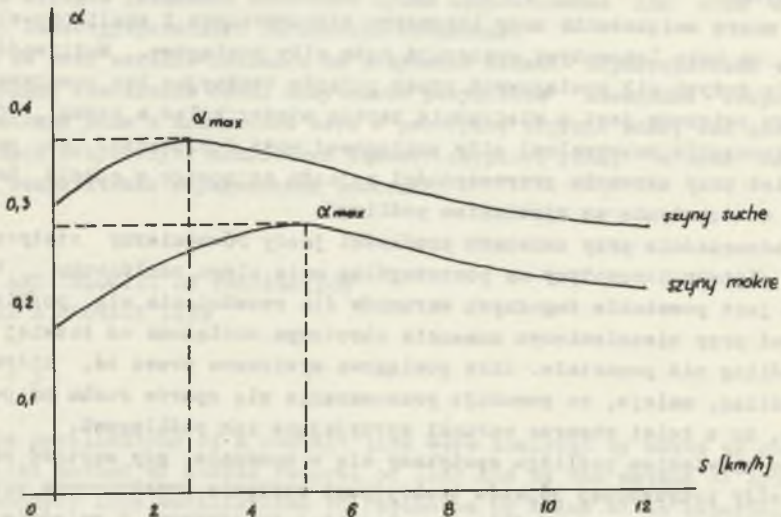
Na wartość współczynnika przyczepności wpływają takie czynniki jak: obce warstwy na szynach i kołach, temperatura otoczenia, naprężenia ścis-kające, własności materiałów użytych na koła i szyny.

Na wartość współczynnika przyczepności wpływa również prędkość ślizgania.

Z przeprowadzonych badań na kolejach szwajcarskich [4] nad wpływem prędkości ślizgania na wartość współczynnika przyczepności wynikają dwa stwierdzenia:

- 1) przenoszenie maksymalnej siły pociągowej lub hamowania połączone jest z występowaniem ślizgania się koła z pewną prędkością,
- 2) w pewnym zakresie prędkości ślizgania siła, którą można rozwijać, a więc i współczynnik przyczepności rośnie wraz z prędkością ślizgania.

Na rysunku 1 przytoczono wyniki badań [4] w postaci krzywych obrazujących wartości średnie prędkości ślizgania w zależności od współczynnika



Rys. 1

przyczepności przy prędkościach jazdy do ok. 40 km/godz. Wyniki tych badań wykazały, że maksymalne wykorzystanie przyczepności jest możliwe dopiero przy jednoczesnym uzyskaniu pewnej prędkości ślizgania, której wartość wynosi kilka kilometrów na godzinę. Wzrost współczynnika przyczepno-

ści wraz ze wzrostem prędkości ślizgania można tłumaczyć tym, że w początkowej fazie rozwoju poślizgu powierzchnia styku z szyną zwiększa się w stopniu większym niż jednocześnie zmniejsza się wytrzymałość na ścinanie tego styku. Dopiero przy prędkościach ślizgania  $S > S_{max}$  przeważa wpływ obniżającej się wytrzymałości styku. Występujące prędkości ślizgania bez przekroczenia przyczepności są wykrywalne i znajomość tego zjawiska oraz znajomość krytycznych prędkości ślizgania  $S_{max}$  pozwalają na zaprojektowanie urządzeń przeciwpoślizgowych nowego typu niedopuszczających do większych prędkości ślizgania zestawów kołowych niż  $S_{max}$ , co jednocześnie umożliwia pracę lokomotywy z maksymalną siłą pociągową każdej osi z wykorzystaniem maksymalnego współczynnika przyczepności dla danych warunków.

Najskuteczniejszą metodą walki z poślizgiem jest niedopuszczenie do powstania poślizgu, a zatem stosowanie odpowiednich zabiegów już w pierwszej chwili występowania tendencji do poślizgu, czyli w zakresie występowania mikropoślizgów.

Metoda likwidacji poślizgu poprzez jego ujawnienie jest skuteczna, jeżeli wcześniej wykryje się poślizg i uruchomi układ jego likwidacji.

Stosowane metody wykrywania poślizgu można podzielić na cztery grupy:

- 1) Porównywanie wartości napięć lub prądów silników trakcyjnych.
- 2) Porównywanie prędkości obrotowych silników lub zestawów kołowych.
- 3) Pomiar przyspieszeń kątowych w ruchu obrotowym silników lub zestawów kołowych.
- 4) Porównanie prędkości obrotowych kół z prędkością postępową lokomotywy.

Pierwsza z tych metod polega na porównaniu wartości napięć silników trakcyjnych połączonych szeregowo. Sił. elektromotoryczna silnika wyraża się wzorem:

$$E = k \cdot \phi \cdot n$$

a napięcie na zaciskach silnika wynosi:

$$U = E + \Delta U$$

W przypadku poślizgu napięcie zmienia się ze zmianą prędkości obrotowej silnika według wzoru:

$$U = k \phi [n + \Delta n] + \Delta U$$

czyli:

$$U = E [1 + s] + \Delta U$$



gdzie:

$E$  - siła elektromotoryczna silnika,

$k$  - współczynnik proporcjonalności,

$\emptyset$  - strumień magnetyczny,

$n$  - prędkość obrotowa silnika,

$\Delta n$  - przyrost prędkości obrotowej silnika na skutek poślizgu,

$s$  - poślizg [stosunek  $\Delta n$  do  $n$ ],

$\Delta U$  - spadek napięcia na rezystancji twornika,

to z porównania napięć na dwóch silnikach trakcyjnych można wnioskować o różnicy prędkości obrotowych tych silników. Odnosi się to do pracy silników pracujących w połączeniu szeregowym. Analogicznie o różnicy prędkości obrotowych par silników pracujących w połączeniu równoległym można wnioskować na podstawie różnic w wartościach natężenia prądu obu silników. Wadą urządzeń przeciwpoślizgowych działających w oparciu o powyższą metodę jest zmienna względna czułość i to tym mniejsza, im mniejsze są prędkości pojazdu.

Metoda porównania prędkości obrotowych silników polega na bezpośrednim pomiarze prędkości obrotowych dwóch zestawów kołowych, przy czym sposoby tych pomiarów mogą być różnorodne. Najczęściej stosowany sposób polega na porównywaniu wartości napięć jako funkcji częstotliwości przesuwania się zębów dużych kół przekładni pod czujnikami elektromagnetycznymi umieszczonymi na zestawach kołowych [2]. Częstotliwość generowanych sygnałów jest proporcjonalna do prędkości obrotowych silników.

Najbardziej dokładna jest metoda pomiaru przyspieszeń w ruchu obrotowym. Przy metodzie tej nie porównuje się parametrów zestawów kołowych między sobą, lecz mierzy wartość przyspieszeń kątowych każdego zestawu kołowego oddzielnie.

Przy rozruchu zestawu kołowego w czasie poślizgu przyspieszenia dochodzą do  $5 \text{ m/sek}^2$  w odniesieniu do obwodu koła, zaś w czasie normalnej jazdy przy rozruchu nie przekraczają  $0,5 \text{ m/sek}^2$ . Wadą urządzeń przeciwpoślizgowych działających w oparciu o tę metodę jest zbyt duża ich czułość powodująca działanie układu również przy zbyt szybkim rozruchu lub gdy występują chwilowe przyspieszenia zestawów kołowych spowodowane np. przejazdami przez rozjazdy, podbiciami kół na złączach szyn itp. Zjawiskom tym towarzyszy krótkotrwałe zmniejszenie się siły nacisku koła na szynę, a więc występują dogodne warunki do powstania poślizgu, jednak po powrocie pełnej wartości tej siły koło utrzymuje z szyną pełną przyczepność i poślizg samorzutnie zanika.

Wreszcie porównanie prędkości postępowej pojazdu z prędkościami obrotowymi zestawów jest metodą najnowszą i najdokładniejszą. Jej stosowanie wiąże się z poważnymi zmianami w układzie mechanicznym pojazdu szynowego, a mianowicie zastosowanie swobodnego odpowiednio dociskanego i odsprężynowanego koła toczącego się po szynie bez poślizgu.

Przy zastosowaniu odpowiednich czujników porównuje się w urządzeniu przeciwpoślizgowym prędkość obrotową swobodnego nie napędzanego koła z prędkościami obrotowymi silników trakcyjnych.

Rozwijający się poślizg można zlikwidować następującymi sposobami [2,3]

- 1) przez polepszenie przyczepności kół z szyną, np. przez piaskowanie, zwiększenie nacisku na tę oś lub zestaw kołowy,
- 2) przez przyhamowanie zestawu który wpadł w poślizg,
- 3) przez zmniejszenie siły pociągowej zestawu który wpadł w poślizg.

W układach z samoczynną likwidacją poślizgu korzysta się z trzech wymienionych wyżej sposobów. Urządzenie przeciwpoślizgowe stosuje odpowiednie zabiegi w określonych odstępach i kolejności, dozując w ten sposób natężenie środków likwidacji poślizgu. Jeśli chodzi o sposób pierwszy i drugi, to działanie układu hamulcowego i piasecznic jest stosunkowo powolne, tak że ich uruchomienie może trwać kilka sekund i nie może być mowy o likwidacji poślizgu we wczesnej jego fazie. Jednocześnie zabieg przy hamowania przy braku indywidualnych hamulców w zestawach kołowych wiąże się z koniecznością przyhamowania całej lokomotywy, a więc ze znacznym zmniejszeniem siły pociągowej. Zabiegiem najlepszym jest zmniejszenie siły pociągowej zestawu kołowego, który wpadł w poślizg. Ponieważ siła na obwodzie koła wyraża się wzorem  $F = k \cdot \phi \cdot I_{tw}$ , można ją zmniejszyć drogą zmniejszenia strumienia  $\phi$  lub prądu twornika  $I_{tw}$ .

Literatura nie określa wymaganego stopnia zmniejszenia siły na obwodzie kół w celu samoczynnej likwidacji poślizgu, bowiem w przypadku poślizgu wartość współczynnika przyczepności bywa bardzo różna i zależna od stopnia rozwinięcia się poślizgu. W pierwszej fazie poślizgu wymagane jest o wiele mniejsze obniżenie siły niż w okresie późniejszym, gdy poślizg w pełni się rozwinie. Wymagane obniżenie siły na obwodzie koła jest zależne od czasu własnego urządzenia wykrywającego poślizg. Im ten czas jest krótszy, tym mniejsze jest wymagane obniżenie siły. Spotykane w literaturze [1, 2, 3] dane mówią, że wymagane jest obniżenie siły na obwodzie koła od 1/3 do 2/3 siły początkowej.

Wartość siły  $F$  na wale silnika można obniżyć przez:

- bocznikowanie twornika [zmniejszenie  $I_{tw}$ ],
- osłabienie wzbudzenia [zmniejszenie  $\phi$ ],
- włączenie oporników w obwód silników trakcyjnych [zmniejszenie  $U$ ,  $I_{tw}$  oraz  $\phi$ ],
- zmniejszenie prądu wzbudzenia prądnicy zasilającej silniki trakcyjne [zmiana  $U$ ,  $\phi$  i  $I_{tw}$ ] w lokomotywach spalinowo-elektrycznych.

Celem uzyskania maksymalnych sił pociągowych lokomotyw trakcyjnych przy rozruchach z ciężkimi składami pociągowymi lub przy szybkich rozruchach konieczna jest współpraca układu elektrycznego zarówno lokomotywy elektrycznej jak i spalinowo-elektrycznej z odpowiednim urządzeniem przeciw-



poślizgowym. Urządzenia te działają w oparciu o opisane uprzednio metody przy wykorzystaniu wymienionych sposobów likwidacji poślizgu.

Najprostsze z urządzeń przeciwpoślizgowych działa na zasadzie porównywania napięć lub prądów silników trakcyjnych i wyposażone jest w układ pomiarowy napięć lub prądów, układ porównawczy i układ wykonawczy sterujący zabiegiem likwidacji poślizgu.

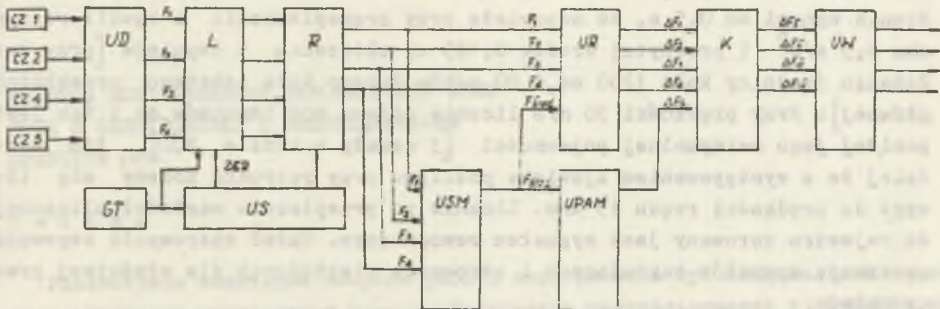
Wadą urządzenia jest możliwość jego stosowania tylko tam gdzie silniki pracują w połączeniu równoległym, albo szeregowym. Urządzenie jest wrażliwe na różnice charakterystyk magnesowania silników trakcyjnych a czułość urządzenia jest tym mniejsza, im mniejsze są prędkości pojazdu.

Istnieją liczne urządzenia do wykrywania zmian prędkości obrotowej zestawów kołowych, np. urządzenia tachometryczne. Wykorzystuje się jako mierniki prędkości prądniczki magnetoelektryczne, czujniki elektromagnetyczne umieszczone nad przekładnią zębatą, w których napięcie bądź częstotliwość są funkcją prędkości. Powstająca na skutek poślizgu jednego z zestawów różnica tych prędkości jest sygnałem wysyłanym z układu porównawczego do układów likwidujących poślizg. Najczęściej porównuje się prędkości obrotowe silników między sobą. Wadą urządzenia jest brak sygnału likwidującego poślizg w wypadku jednoczesnego poślizgu porównywanych zestawów kołowych. Powszechnie stosowane są urządzenia przeciwpoślizgowe pracujące w oparciu o metodę pomiaru różnicy prędkości obrotowych i przyspieszeń kątowych. W urządzeniach tych kontroluje się w sposób ciągły różnicę prędkości zestawu kół napędowych i przyspieszenia wirowania. Prędkości mierzone są przez czujniki magnetoelektryczne umieszczone przy zębach przekładni głównej silników napędowych. Napięcie z czujników po wyprostowaniu doprowadza się do układu różnicowego porównującego napięcia oraz do układów różniczkujących. Pierwszy z nich wysyła sygnał do układu wykonawczego po przekroczeniu nastawionej różnicy prędkości obrotowej porównywanych zestawów kół napędowych. Układy różniczkujące wysyłają sygnały po przekroczeniu nastawionego przyspieszenia. Układy wykonawcze działają na układy likwidacji poślizgu po otrzymaniu sygnału od jednego z tych układów lub wszystkich równocześnie.

W dążeniu do wykorzystania maksymalnej siły pociągowej w nowoczesnym taborze stosowane są powszechnie urządzenia elektryczne zabezpieczające od poślizgu przez zmniejszenie momentu obrotowego silnika osi, która zaczęła się ślizgać bądź też wszystkich silników lokomotywy.

Jak już wspomniano, w pierwszej fazie poślizgu wymagane jest znacznie mniejsze obniżenie siły niż w okresie późniejszym. Czas wykrycia poślizgu i reakcji urządzenia przeciwpoślizgowego zależy od czasu własnego urządzenia. Znajomość mechanizmu powstawania poślizgu i zależności siły pociągowej od poślizgu toczącego się koła inspiruje nowe koncepcje urządzeń przeciwpoślizgowych o dużej dokładności i szybkości, działania opartych o technikę cyfrową.

Poniżej przedstawiono projekt własnego cyfrowego urządzenia dla wykrywania poślizgu w lokomotywie elektrycznej z indywidualnym napędem osi. Urządzenie nadaje się do pracy w lokomotywach 4 i 6-osiowych, o czym decyduje jego budowa wewnętrzna przy niezmienionej zasadzie działania.



Rys. 2. Schemat blokowy cyfrowego urządzenia wykrywania i sterowania likwidacją poślizgu

Schemat blokowy urządzenia dla lokomotywy czteroosiowej pokazano na rys. 2. Składa się ono z układu dopasowującego UD, licznika L, rejestru R, układu sumująco-mnożącego USM, układu różnicowego UR, układu pamięci UPAM, komparatora K, generatora taktu GT, układu sterującego US i układu wykonawczego UW. Działanie urządzenia polega na kontroli w sposób dyskretny różnicy prędkości pomiędzy prędkościami poszczególnych osi a ich prędkością średnią [6]. Urządzenie wyposażone jest w cztery czujniki magnetoelektryczne  $CZ_{1-4}$ , umieszczone nad dużymi kołami zębatymi przekładni głównej każdego silnika napędowego. Wielkość prędkości przetwarzana jest przez czujniki na napięcie przemiennie, a to z kolei przetwarzane jest w układzie dopasowującym na podwojony ciąg impulsów  $F_{1-4}$  na poziomie napięć odpowiadających napięciom elementów cyfrowych, których częstotliwość jest proporcjonalna do mierzonej prędkości. Impulsy te co 0,5 s zaliczane są w liczniku i przekazywane do rejestru. Zawartość rejestru podawana jest na układ sumująco-mnożący, na wyjściu którego otrzymujemy średnią arytmetyczną ilości impulsów pochodzących od czujników każdej osi  $F_{\text{śred}}$  za okres pół sekundy oraz układ różnicowy, na wyjściu którego otrzymujemy różnicę  $\Delta F_{1+4}$  pomiędzy ilością impulsów  $F_{1+4}$  każdej osi a wartością średnią  $F_{\text{śred}}$  ilości impulsów. Wartość średnia ilości impulsów jest proporcjonalna do średniej prędkości lokomotywy. Układ pamięci otrzymuje od układu sumująco-mnożącego informacje o średniej prędkości lokomotywy i generuje na wyjściu liczbę  $\Delta F_G$  odpowiadającą maksymalnej dopuszczalnej prędkości ślizgania kół dla odpowiedniej prędkości lokomotywy przy założeniu średniego współczynnika przyczepności. Liczba ta porównywana jest w komparatorze z liczbami impulsów  $\Delta F_{1+4}$  na wyjściu układu różnicowego.



Przy przekroczeniu  $\Delta F_G$  generowanej z układu pamięci przez którąkolwiek liczbę impulsów  $\Delta F_1 \div \Delta F_4$  komparator wysyła impulsy uruchamiające układ wykonawczy kierujący zabiegiem likwidacji poślizgu, przy czym zasada działania układu wykonawczego jest z punktu widzenia przedstawionej metody obojętna i nie jest w artykule rozważana. Czas zliczania impulsów w liczniku taktowany jest przez generator czasu i dla proponowanego urządzenia wynosi on 0,5 s, co odpowiada przy przyspieszeniu w chwili rozruchu  $0,5 \text{ m/s}^2$  i przebytej drodze 0,125 m, zliczeniu 5 impulsów [przy założeniu średnicy koła 1200 mm i 80 zębów dużego koła zębatego przekładni głównej]. Przy prędkości 30 m/s licznik zlicza 800 impulsów, co i tak jest poniżej jego maksymalnej pojemności [3 dekady w kodzie BCD], tym bardziej że z występowaniem zjawiska poślizgu przy rozruchu możemy się liczyć do prędkości rzędu 15 m/s. Licznik po przepisaniu wartości zliczonej do rejestru zerowany jest sygnałem zewnętrznym. Układ sterowania zapewnia generację sygnałów taktujących i zerowania niezbędnych dla właściwej pracy układu.

Podsumowując można stwierdzić, że proponowane urządzenie przeciwpoślizgowe odznacza się wysoką dokładnością pomiaru prędkości poszczególnych zestawów kołowych. Dokładność urządzenia zmniejsza się w przypadku poślizgu dwóch osi równocześnie, ponieważ pomiar prędkości lokomotywy według opisanego sposobu dokonywany jest z pewnym błędem. Jednak prawdopodobieństwo wystąpienia w jednej chwili poślizgu obu osi równocześnie szacuje się na znikome, a przy szybko działającym urządzeniu przeciwpoślizgowym rozwijający się poślizg jednej z osi zostanie zlikwidowany szybciej, niż zdąży się rozwinąć poślizg drugiej. Przyjęty sposób wykrywania poślizgu jest niezawodny w całym zakresie pomiarowym i pozwala na pracę kół z pewną prędkością ślizgania, co gwarantuje możliwość osiągnięcia w czasie rozruchu maksymalnych sił pociągowych lokomotywy.

Proponowane urządzenie przeciwpoślizgowe jest pewnym krokiem naprzód w pracach nad zastosowaniem nowoczesnych urządzeń automatycznych służących do wykrywania i likwidacji poślizgów.

#### LITERATURA

- [1] Podoski J.: Zasady trakcji elektrycznej. WKiŁ, Warszawa 1967.
- [2] Kwapisz T., Raczyński Z.: Układ wykrywania i samoczynnej likwidacji poślizgu na prototypowej lokomotywie elektrycznej 201 E. Przegląd Kolejowy Elektrotechniczny 9/1971.
- [3] Plewako St.: Rola przyczepności jako czynnika modernizacji trakcji szynowej. Prace Instytutu Transportu, Warszawa 1972.
- [4] Cianciara K.: Środki umożliwiające zwiększenie wykorzystania przyczepności lokomotywy elektrycznych. Kolejowy Przegląd Elektrotechniczny 1969, nr 4, 5.



- [5] Raczkowski W., Noworolski J.: Elupp - elektroniczne urządzenie przeciwpoślizgowe. Energoelektronika w trakcji elektrycznej. Symposium z okazji Roku Nauki Polskiej. Instytut Elektrotechniki Warszawa 1973.
- [6] Zgłoszenie patentowe. nr P-175717.

Przyjęto do druku w czerwcu 1974 r.

ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ СИЛЫ  
ТЯГИ В ЭЛЕКТРОВОЗАХ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМ  
ПРИВОДОМ ОСИ

Р е з ю м е

Рассмотрены некоторые вопросы работы электровозов при максимальной силе тяги. Изложены применяемые методы обнаружения проскальзывания и способы их устранения. Описано цифровое устройство для обнаружения и управления процессом устранения проскальзывания. Изложены преимущества этого устройства по сравнению с устройствами, применяемыми ранее.

PROBLEM OF UTILIZATION MAXIMUM TRACTIVE FORCE  
IN ELECTRIC LOCOMOTIVES WITH INDIVIDUAL AXIAL  
DRIVE

S u m m a r y

In the paper, some problems of the work of electric locomotives using maximum tractive force are given. Used methods of slipping detection and means of its liquidation are described.

Digital unit for detection and controlling liquidation of slipping and its advantages in comparison with the used devices are described.