

Roman KONIECZNY

Instytut Transportu Kolejowego
Politechniki Śląskiej

KRYTERIA OCENY JAKOŚCI WSPÓŁPRACY ODBIERAKA PRĄDU Z SIECIĄ TRAKCYJNĄ

Streszczenie: W artykule zestawiono stosowane kryteria oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną. Przeprowadzono analizę zaprezentowanych kryteriów oraz zaproponowano nowe zbiorcze kryterium oceny jakości współpracy tych układów.

Jednym z ważniejszych zagadnień technicznych w trakcji elektrycznej jest zapewnienie wysokiej jakości odbioru prądu przez pojazd trakcyjny. Jakość odbioru prądu uzależniona jest od jakości współpracy dynamicznej odbieraka prądu z siecią trakcyjną, tj. od warunków pracy zestyku ślizgowego, jaki tworzą wkładki ślizgacze odbieraka prądu z drutem jezdny sieci trakcyjnej. Warunki pracy zestyku odbierak - sieć uzależnione są od wartości odbieranego prądu, prędkości jazdy oraz szeregu innych czynników.

Ocena jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną może być przeprowadzona przy użyciu kilku metod badawczych, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- empiryczną (bazującą na pomiarach poligonowych),
- teoretyczną (bazującą na obliczeniach).

Empiryczne metody oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną bazują głównie na wynikach uzyskanych przy użyciu wagonu pomiarowego na liniach rzeczywistych, względnie na odcinkach doświadczalnych. Badane są między innymi następujące wielkości:

- czas przerw w styku pomiędzy wkładkami ślizgacza a drutem jezdny,
- przemieszczenie pionowe punktu styku ślizgacza z drutem jezdny,
- przemieszczenie pionowe ram odbieraka,
- siła stykowa między ślizgaczem a drutem jezdny.

Wielkości powyższe mogą być również wyznaczone drogą obliczeń teoretycznych, np. na modelach matematycznych, odwzorowujących sieć trakcyjną

i odbierak prądu jako układy drgające, opisane układem równań różniczkowych zwyczajnych.

Zarówno w metodach teoretycznych, jak i empirycznych stosowane są następujące kryteria oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną:

1. Wskaźnik ekonomiczny

Wskaźnikiem optymalnej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną może być minimum kosztów związanych ze współpracą obu układów. Koszty te mogą być wyrażone następującym wzorem [4]:

$$E^* = K_e(K_B + K_O) + (E_B + E_O), \quad (1)$$

gdzie:

- E^* - całkowite koszty poniesione na sieć trakcyjną i odbieraki prądu [jednostka pieniężna/rok];
- K_B, K_O - nakłady inwestycyjne na sieć trakcyjną i odbieraki prądu [jednostka pieniężna];
- K_e - współczynnik efektywności nakładów inwestycyjnych [1/rok];
- E_B, E_O - roczne wydatki eksploatacyjne na sieć trakcyjną i odbieraki prądu (wliczając odpisy amortyzacyjne) [jednostka pieniężna/rok].

Na E_B i E_O składają się między innymi koszty związane z wymianą zużytych materiałów stykowych. Zużycie materiałów stykowych przy przejściu odbieraka prądu odcinka 1 przęsła zawieszenia może być wyrażone wzorem [2]:

$$Z_m = \frac{L}{C} \sum j_i C_i, \quad (2)$$

gdzie:

- Z_m - sumaryczne zużycie materiałów stykowych [kg],
- j_i - poziom zużycia materiału [kg/m],
- C_i - liczba przypadków o zużyciu j_i ,
- C - całkowita liczba analizowanych przypadków,
- L - długość przęsła zawieszenia [m].

Innym wskaźnikiem ekonomicznym może być zużycie drutu jezdnego na odcinku 1 km, po przejściu 10 000 odbieraków prądu.

2. Współczynnik zmienności siły stykowej

Według pracy [4] współczynnik ten określony jest następującymi wzorami:

$$n_1 = \frac{F_{kmax}}{F_{st}} - 1 \quad \text{oraz} \quad n_2 = \frac{F_{kmin}}{F_{st}} - 1, \quad (3)$$

gdzie:

F_{kmax} i F_{kmin} - wartości ekstremalne siły stykowej w rozpatrywanym
przędzie zawieszenia,

F_{st} - siła statyczna odbieraka prądu.

Jakość współpracy odbieraka z siecią ocenia się jako zadowalającą, jeżeli $|n_1| \wedge |n_2| \leq 0,3 + 0,5$. Dla wyższych prędkości jazdy zalecane jest przyjmowanie mniejszych wartości n_1 i n_2 .

Według pracy [2] współczynnik zmienności siły stykowej może być określony wzorami:

$$n' = \frac{F_{kmax} - (F_{st} + F_a)}{F_{st} + F_a} \quad \text{oraz} \quad n'' = \frac{(F_{st} + F_a) - F_{kmin}}{F_{st} + F_a} \quad (4)$$

gdzie F_a - składowa siła aerodynamiczna nacisku odbieraka na sieć.

Jakość współpracy odbieraka z siecią ocenia się jako zadowalającą, gdy $|n'| \wedge |n''| \leq 0,5$.

Według pracy [3] współczynnik zmienności siły stykowej może być określony wzorem:

$$k_n = \frac{\sum F_{kmax_i}}{\sum F_{kmin_i}} \quad (5)$$

Indeksem i oznaczone są ekstrema tego samego typu w rozpatrywanym przędzie zawieszenia (lub na odcinku kilku przędzi).

Jakość współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest tym lepsza, im bardziej zbliżona jest do 1 wartość współczynnika k_n .

3. Składowa zmienna siły stykowej

Według pracy [4] składowa ta opisana jest wzorami:

$$Q_1 = F_{kmax} - F_{st} \quad \text{oraz} \quad Q_2 = F_{kmin} - F_{st} \quad (6)$$

Współpracę odbieraka z siecią można uznać jako zadowalającą, gdy:

$$|Q_1| \wedge |Q_2| \leq (0,3 + 0,5) F_{st}$$

Według pracy [2] składowa zmienna siły stykowej opisana jest następującymi wzorami:

$$Q'_1 = F_{kmax} - (F_{st} + F_a) \quad \text{oraz} \quad Q'_2 = (F_{st} + F_a) - F_{kmin} \quad (7)$$

Współpracę odbieraka z siecią można uznać jako zadowalającą, gdy:

$$|Q_1'| \wedge |Q_2'| \leq 0,3 (P_{st} + P_a)$$

4. Odchylenie średniokwadratowe siły stykowej

Odchylenie średniokwadratowe siły stykowej można obliczyć według wzoru [4]:

$$\epsilon_{sr}(P_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^C (P_{ki} - \sum_{i=1}^C P_{ki} \frac{C_i}{C})^2 \frac{C_i}{C}} \quad (8)$$

gdzie:

P_{ki} - wartość średnia siły stykowej w przedziale i ,

C_i - liczba przypadków o wartości P_{ki} ,

C - całkowita liczba analizowanych przypadków.

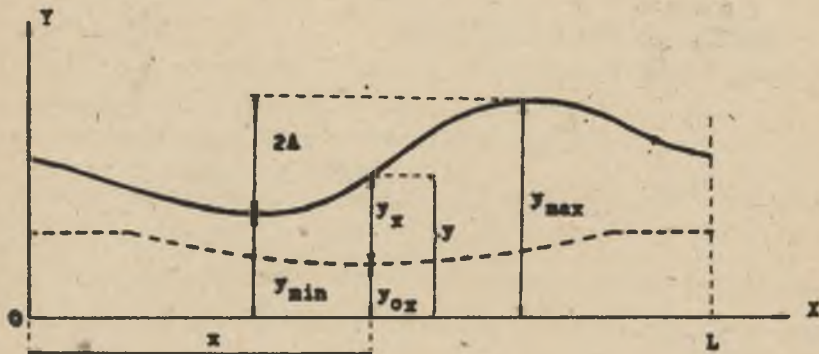
Jakość współpracy odbieraka z siecią jest tym lepsza, im mniejsze jest ϵ_{sr} .

5. Zakres pionowych przemieszczeń punktu styku

Zakres ten (tzw. podwójna amplituda) określony jest wyrażeniem [2,4]:

$$2A = y_{\max} - y_{\min} \quad (9)$$

gdzie y_{\max} i y_{\min} - wartości ekstremalne pionowego przemieszczenia punktu styku odbieraka prądu z siecią trakcyjną w rozpatrywanym prześle zawieszania (rys. 1).



Rys. 1. Ilustracja graficzna kryteriów p.p. 5 i 6

Jakość współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest tym lepsza, im mniejszy jest zakres pionowych przemieszczeń punktu styku.

6. Uniesienie drutu jezdnego w wybranym punkcie

Uniesienie to można określić w oparciu o znajomość trajektorii punktu styku odbieraka prądu z siecią trakcyjną [4]:

$$y_x = y - y_{ox} \quad (10)$$

gdzie:

y - rzędna punktu styku w odległości x od konstrukcji wsporczej,
 y_{ox} - rzędna wybranego punktu w warunkach statycznych (rys. 1).

7. Współczynnik utraty styku

Współczynnik ten określony jest wzorem [2, 4]:

$$k_{od} = \frac{\sum t_{od}}{t} 100\% \quad (11)$$

gdzie:

$\sum t_{od}$ - suma czasów utraty styku ślizgacza odbieraka z drutem jezdnym na rozpatrywanym odcinku,
 t - czas przejścia odbieraka przez rozpatrywany odcinek.

Współpracę odbieraka prądu z siecią trakcyjną można uznać jako zadowalającą, jeżeli $k_{od} \leq 1,5\%$.

8. Kryterium SNCF [6]

Kryterium to stosowane jest na kolejach francuskich do oceny konstrukcji sieci trakcyjnej dla dużych prędkości jazdy. Podstawą kryterium są 4 współczynniki: uniesienia drutu jezdnego, zakresu pionowych przemieszczeń punktu styku, czasu trwania przerw stykowych oraz zmienności siły stykowej. Współczynnik wynikowy obliczany jest jako średnia arytmetyczna wymienionych współczynników.

9. Funkcja przenoszenia [5]

Kryterium to stosowane jest na kolejach brytyjskich do oceny konstrukcji odbieraków prądu dla dużych prędkości jazdy. Funkcja przenoszenia została zdefiniowana jako stosunek siły bezwładności odbieraka prądu do rzędnej ruchu pionowego jego górnego węzła. Im stosunek ten jest mniejszy, tym lepsza jest konstrukcja odbieraka.

Innym kryterium stosowanym na kolejach brytyjskich - podobnym do przedstawionego powyżej - jest impedancja mechaniczna [1], zdefiniowana jako stosunek sinusoidalnie zmiennej siły wymuszającej drgania układu mechanicznego do amplitudy tych drgań.

Dokonując analizy przedstawionych kryteriów oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną można zauważyć stosunkowo dużą ich różnorodność. Kryteria powyższe bazują na kilku wielkościach, z których najczęściej powtarzającą się jest siła stykowa.

Zasadniczą niedogodnością kryteriów opartych na wskaźnikach ekonomicznych jest ocena a posteriori jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną na podstawie zużycia materiałów stykowych (bez podania przyczyn tego zużycia) oraz poniesionych wydatków eksploatacyjnych. Kryterium oceny jakości, oparte na współczynniku utraty styku, jest szczególnie predystynowane dla badań eksperymentalnych, przeprowadzanych w warunkach liniowych. Przerwy styku określane są zwykle poprzez pomiar napięcia na odbieraku w warunkach bezprądowych.

Bazą wyjściową kryteriów z p.p. 2-7 jest trajektoria punktu styku odbieraka prądu z siecią trakcyjną oraz przebieg siły stykowej. Jedną kryteriów opartych na współczynnikach zmienności oraz składowej zmiennej siły stykowej, a także wysokości uniesienia drutu jezdnego w wybranym punkcie jest nieuwzględnienie ekstremów lokalnych, przez co dwa różne przebiegi mogą mieć ten sam współczynnik jakości. Mankamentu tego nie posiadają kryteria: k_n oraz $\xi_{sr}^*(F_k)$. Kryterium odchylenia średniokwadratowego siły stykowej w postaci (8) jest jednak niewygodne w stosowaniu, dlatego można go przedstawić w innej wersji:

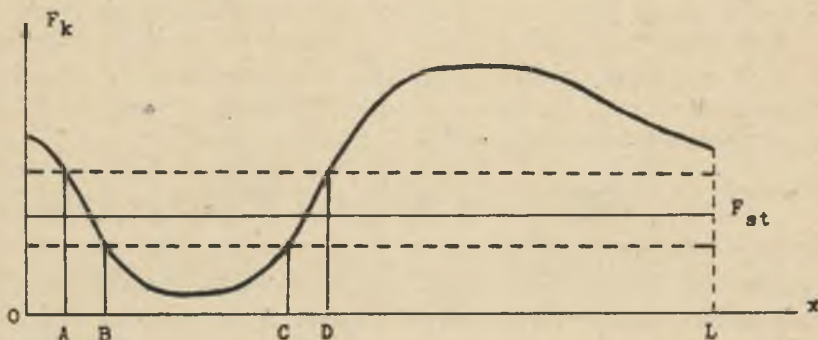
$$\xi_{sr}^*(F_k) = \sqrt{\frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} (F_k - F_{st})^2 dx}, \quad (12)$$

gdzie L_m oznacza długość rozpatrywanego odcinka sieci trakcyjnej.

Jakość współpracy odbieraka z siecią będzie tym lepsza, im bardziej zbliżona będzie do zera wartość współczynnika ξ_{sr}^* .

Według pracy [4], przy projektowaniu sieci trakcyjnych i odbieraków prądu zalecane jest posługiwanie się następującymi kryteriami oceny jakości: zakresu pionowego przemieszczenia punktu styku, poziomu uniesienia drutu jezdnego w wybranym punkcie oraz składową zmienną siły stykowej. Przeznaczeniem kryterium z p. 6 jest sprawdzenie, czy nie wystąpi niedopuszczalne uniesienie drutu jezdnego w wybranym punkcie, np. w pobliżu konstrukcji warszawskiej. Sytuacja taka w warunkach rzeczywistych doprowadzić może do uszkodzenia sieci trakcyjnej, a także odbieraka prądu.

Przeznaczeniem kryterium z p. 3 jest sprawdzenie, czy nie wystąpi przekroczenie dopuszczalnej wartości siły stykowej. Ponieważ brak w tej mierze oddzielnych norm, na kolejach radzieckich zalecane jest przyjmowanie do obliczeń orientacyjnego zakresu zmienności siły stykowej [4]: 40-200 N dla odbieraków "lekkich" z wkładkami węglowymi oraz 60-300 N dla odbieraków "ciężkich". Oczywiście, im bardziej wartość siły stykowej przewyższa wartość siły statycznej odbieraka, tym większe jest zużycie materiałów



Rys. 2. Przykładowy przebieg ilustrujący potrzebę stabilizacji siły stykowej

stykowych. Zagadnienie to zilustrowano na rys. 2, na którym linią przerywaną zaznaczono granice optymalnego zakresu zmienności siły stykowej, wynoszące 0,7 oraz 1,4 $\cdot F_{st}$. Jak widać na przykładowym przebiegu, długość odcinka, na którym siła stykowa przyjmuje wartości należące do tego zakresu, wynosi tylko ok. 12% długości przęsła zawieszenia (odcinki AB + CD). Wartość siły stykowej na odcinku BC jest niekorzystna ze względu na zwiększone prawdopodobieństwo utraty styku, natomiast na odcinkach pozostałych - ze względu na zwiększone zużycie materiałów stykowych. Celowe jest zatem w takim przypadku dążenie do stabilizacji siły stykowej na poziomie zbliżonym do F_{st} na całej długości przęsła.

Dokonując podsumowania powyższych rozważań można stwierdzić, że przedstawione kryteria oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną - mimo stosunkowo dużej ich różnorodności - posiadają wspólną przeszyzną odniesienia, jaką są informacje zawarte w przebiegach: trajektorii punktu styku (y) oraz siły stykowej (F_k). Dwa najbardziej reprezentatywne kryteria: zmienności siły stykowej (n_1 i n_2) oraz zakresu pionowych przesłeszczeń punktu styku (2A) można połączyć w jedno zbiorcze kryterium w następujący sposób:

$$J^j = \sum_{i=1}^C \left| \frac{F_{kmax_i}}{F_{st}} - 1 \right| + \sum_{i=1}^C \left| \frac{F_{kmin_i}}{F_{st}} - 1 \right| + \frac{100}{L} \left(\sum_{i=1}^C |Y_{max_i}| + \sum_{i=1}^C |Y_{min_i}| \right) \quad (13)$$

gdzie:

J^j - współczynnik jakości współpracy odbieraka z siecią,

C - liczba ekstremów w rozpatrywanym przęsle zawieszenia.

Zaproponowane powyżej wyrażenie (13) ujmuje dwie najważniejsze wielkości (y oraz F_k), charakteryzujące współpracę odbieraka prądu z siecią trakcyjną, umożliwiając tym samym dokładną ocenę jakości odbioru prądu przez pojazd trakcyjny. Kryterium J' uwzględnia ewentualne ekstrema lokalne w przebiegach trajektorii punktu styku oraz siły stykowej.

W przypadku nieuwzględnienia ekstremów lokalnych, kryterium (13) można przedstawić w wersji uroszczonej:

$$J = \left| \frac{F_{kmax}}{F_{st}} - 1 \right| + \left| \frac{F_{kmin}}{F_{st}} - 1 \right| + \frac{100}{L} (|Y_{max}| + |Y_{min}|) \quad (14)$$

W przypadku gdy przedmiotem analizy są wyniki z kilku pręseł, należy dokonać uśrednienia wartości poszczególnych składników wyrażeń (13) i (14).

Kryteria J i J' nie są wersjami zamkniętymi i mogą być rozbudowane o dodatkowe składniki, jak np. poziom uniesienia drutu jezdnego w pobliżu konstrukcji wsporczej, odchylenie średniokwadratowe siły stykowej lub czas przerw stykowych.

Określenie największej dopuszczalnej wartości współczynnika jakości współpracy odbieraka z siecią jest łatwiejsze w przypadku kryterium J niż J' . Przyjmując optymalny zakres zmienności siły stykowej wg rys. 2 oraz zakładając, że przemieszczenie pionowe punktu styku zawarte będzie w granicach $\pm 5 \cdot 10^{-4} L$, można napisać:

$$\left. \begin{array}{l} 0,7 F_{st} \leq F_k \leq 1,4 F_{st} \\ - 0,0005 L \leq y \leq 0,0005 L \end{array} \right\} \rightarrow J_{opt} \leq 0,8 \quad (15)$$

Warunek (15) stanowi jednak bardzo wysokie wymaganie jakości i J jest trudny do spełnienia w ramach klasycznych rozwiązań konstrukcyjnych sieci trakcyjnych i odbieraków prądu. Wobec powyższego jakość współpracy odbieraka z siecią można uznać jako zadowalającą, jeżeli F_k oraz y zawarte będą w następujących granicach:

$$\left. \begin{array}{l} 0,7 F_{st} \leq F_k \leq 2,0 F_{st} \\ - 0,0005 L \leq y \leq 0,0015 L \end{array} \right\} \rightarrow J \leq 1,5 \quad (16)$$

Warunek (16) określono przy założeniu, że mniej niekorzystny dla współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest dodatkowy wzrost wartości maksymalnej siły stykowej z poziomu $1,4 F_{st}$ do $2,0 F_{st}$, niż zmniejszenie wartości minimalnej poniżej $0,7 F_{st}$.

Przyjmując, zarówno w obliczeniach teoretycznych, jak i w pomiarach poligonowych $J_{\text{dop}} = 1,5$, można określić V_{dop} - największą dopuszczalną prędkość jazdy, przy której współpraca rozpatrywanego układu odbierak - sieć jest jeszcze zadowalająca.

LITERATURA

- [1] BEADLE A.R., BETTS A.I., SMITH W.R.: Pantograph development for high speeds - Railway Engineer Journal 1975/11.
- [2] BELJAEV I.A., MICHEJEW W.P., SZIJAN W.A.: Tokosjem i tokopriemniki elektropodwiżnogo sostava. Wyd. "Transport", Moskwa 1976.
- [3] FIDRYCH Z.: Issledowanije wlijanja paramietrow kontaktnoj podwieski na kaczestwo tokosjema pri vysokich skorostjach dwiżenja, Praca doktorska. MIIT, Moskwa 1971.
- [4] FRAJFELD A.W.: Projektowanje kontaktnoj sieti. Wyd. "Transport", Moskwa 1978.
- [5] GRAZIANO M.C.: Pantographs for high-speed running - Railway Davision Journal 1971/ss. 374-406.
- [6] ROMAN Z.: Kryteria oceny konstrukcji sieci trakcyjnej do dużych prędkości jazdy stosowane na kolejach SNCF. Przegląd Kolejowy Elektrotechniczny, 1975/12.

Wpłynęło do redakcji 29.V.1981 r.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Przemysław Pazdro

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКА
С КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКОЙ

Р е з ю м е

В статье составлены применяемые критерии оценки качества взаимодействия токоприемника с контактной подвеской. Проанализированы представленные критерии, а также предложен новый совместный критерий оценки качества взаимодействия этих систем.

CRITERIA OF QUALITY ESTIMATION OF CURRENT COLLECTOR
WITH THE OVERHEAD CONTACT SYSTEM COLLABORATION

S u m m a r y

In this article the applied criteria of estimation of quality dynamic collaboration with current collector with the overhead contact system has been compared. The analysis of presented criteria has been accomplished and the new collective criteria of estimation of collaboration quality of this system has been suggested.