

Odchylenie poprzeczne przewodów jezdnych sieci trakcyjnej pod wpływem wiatru

Marek KANIEWSKI¹, Paulina BIELSKA²

Streszczenie

W listopadzie 2014 roku Komisja Europejska przyjęła Rozporządzenie nr 1301/2014 (UE) dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia”. W Unii Europejskiej rozporządzenie to weszło w życie z dniem 1 stycznia 2015 roku. Od dnia 1 stycznia 2016 roku nowo wyprodukowane odcinki sieci trakcyjnej powinny być objęte deklaracją UE o zgodności z wymaganiami lub o przydatności do stosowania. Zasadniczo, nowy dokument dotyczy sieci trakcyjnej, jednak są w nim odniesienia do Rozporządzenia nr 1302/2014 (UE) w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski”. W artykule opisano doświadczenia autorów w ocenie odchylenia poprzecznego przewodu jezdnej sieci trakcyjnej pod wpływem wiatru.

Słowa kluczowe: sieć trakcyjna, TSI „Energia”, odchylenie poprzeczne przewodu jezdnej

1. Odchylenie poprzeczne przewodu jezdnej sieci trakcyjnej

Przy projektowaniu sieci trakcyjnej i ocenie projektu przez jednostki certyfikujące, istotnym zagadnieniem jest sposób obliczenia odchylenia poprzecznego sieci trakcyjnej, spowodowanego przez wiatr. Błędne wyliczenie odchylenia wiatrowego może wywołać kolizję pantografu z siecią trakcyjną przy wietrze wiejącym prostopadle do sieci jezdnej z maksymalną prędkością, co z pewnością spowoduje długotrwałe ograniczenia w ruchu kolejowym na tym to-

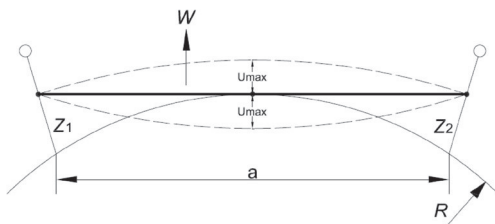
rze lub linii. Wartość odchylenia poprzecznego decyduje o maksymalnej długości przęsła danego typu sieci, przekłada się na zwiększony koszt inwestycyjny. Wartość odchylenia poprzecznego zależy od: składowej prostopadłej siły parcia wiatru na przewody (liny nośne i przewody jezdne), średnicy przewodów jezdnych i lin nośnych, odległości między przewodami jezdnymi, uwzględnienia lub nieuwzględnienia parcia wiatru na wieszaki łączące przewody jezdne z liną nośną, usytuowania przęsła podwieszenia na prostej lub łuku. Kształt odchylenia poprzecznego przewodu na prostej i na łuku toru pokazano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Odchylenie poprzeczne przewodu pod wpływem parcia wiatru na prostym odcinku toru przy założeniu, że odsuw przewodu pod słupami wynosi 0,3 m i – 0,3 m [opracowanie własne]

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: mkaniewski@ikolej.pl.

² Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: pbielska@ikolej.pl.



Rys. 2. Odchylenie poprzeczne przewodu pod wpływem parcia wiatru na łuku odcinka toru [opracowanie własne]

2. Obliczenia odchylenia poprzecznego według wytycznych projektowania let-107

W wytycznych projektowania [8] określono sposób obliczenia obciążenia wiatrowego (parcia wiatru). W punkcie 4 załącznika 3 do let-107 podano za normą PN-E 05100:1998 [3], że parcie wiatru w na przewód wyraża się wzorem (1):

$$w = C \cdot K \cdot p \cdot A \text{ [daN/m]} \quad (1)$$

gdzie:

- C – współczynnik nierównomierności parcia wiatru,
- K – współczynnik opływu,
- p – podstawowe obciążenie wiatrowe [N/m^2],
- A – rzut powierzchni lin i przewodu od strony nawietrznej na płaszczyznę prostopadłą do kierunku wiatru.

Wartość współczynnika K zależy od liczby przewodów jezdnych, ich średnicy oraz odległości między przewodami. Według wytycznych projektowania [8] i normy [3], bez uwzględnienia wpływu wieszaków i uchwytów, współczynnik K wynosi:

- dla jednego przewodu jezdnych o przekroju 100 mm^2 – 1,16,
- dla jednego przewodu jezdnych o przekroju 150 mm^2 – 1,20,
- dla dwóch przewodów o przekroju 100 mm^2 odległych od siebie od 70 mm do 100 mm – 1,70,
- dla dwóch przewodów o przekroju 150 mm^2 odległych od siebie od 70 mm do 100 mm – 1,76.

Z uwzględnieniem wpływu wieszaków i uchwytów, współczynnik K ma większą wartość i wynosi:

- dla jednego przewodu jezdnych o przekroju 100 mm^2 – 1,20,
- dla jednego przewodu jezdnych o przekroju 150 mm^2 – 1,24,
- dla dwóch przewodów o przekroju 100 mm^2 odległych od siebie od 70 mm do 100 mm, w torze na nasypie o wysokości 5 m – 2,06,
- dla dwóch przewodów o przekroju 150 mm^2 odległych od siebie od 70 mm do 100 mm – 1,82.

We wzorze (1) współczynnik nierównomierności parcia wiatru dla przewodów jezdnych i lin nośnych C ma wartość 0,8.

Zgodnie z normą PN-E-05100-1:1998 [3] na terenie Polski są trzy strefy wiatrowe. Strefa I obejmuje tereny nizinne na przeważającej części Polski. W tej strefie do obliczeń przyjmuje się prędkość wiatru $v = 29,6 \text{ m/s}$. W strefie II (nadmorskiej – побереże Bałtyku) i III (górskiej – Karpaty i Sudeyty) przyjmuje się prędkość równą $v = 32,3 \text{ m/s}$. Podstawowe obciążenie wiatrowe p można obliczyć z zależności (2). Zależy od kwadratu prędkości wiatru v i gęstości powietrza ρ :

$$p = \rho v^2 / 2 = 0,613 v^2 \text{ [N/m}^2] \quad (2)$$

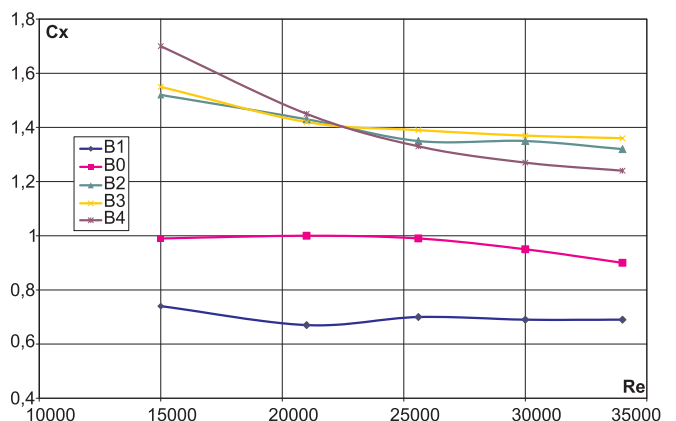
lub

$$p = v^2 / 16 \text{ [kG/m}^2] \quad (3)$$

gdzie: v – prędkość wiatru [m/s].

Dla maksymalnej prędkości wiatru w I strefie nizinnej w Polsce, podstawowe obciążenie wiatrowe wynosi $p = 539 \text{ N/m}^2$, a w II i III strefie (nadmorskiej i górskiej) obciążenie wiatrowe wynosi $p = 637 \text{ N/m}^2$.

Iloczyn współczynników C i K , określane w badaniach aerodynamicznych jako współczynnik oporu powietrza C_x , zależy od kształtu danego obiektu oraz gładkości jego powierzchni. Współczynnik C_x określa się doświadczalnie w tunelu aerodynamicznym. Takie badania przeprowadzono na zlecenie ówczesnego Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa (COBiRTK, obecnie Instytut Kolejnictwa) na Wydziale MEiL Politechniki Warszawskiej [7]. Wartość współczynnika C_x dla układu dwóch przewodów jezdnych o różnych odległościach między sobą pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność współczynnika oporu powietrza od liczby Reynoldsa³ dla dwóch przewodów $D_{jp}100$ znajdujących się w odległości między ich osiami $B_0 = 0 \text{ mm}$, $B_1 = 24 \text{ mm}$, $B_2 = 48 \text{ mm}$, $B_3 = 72 \text{ mm}$, $B_4 = 96 \text{ mm}$ mierzonej między osiami przewodów [opracowanie własne]

³ Liczba Reynoldsa jest to stosunek gęstości płynu, prędkości charakterystycznej płynu, wymiaru charakterystycznego do lepkości dynamicznej płynu. W praktyce wielkość liczby Reynoldsa umożliwia określenie, kiedy ruch płynu jest laminarny, a kiedy może pojawić się turbulencja.

Najmniejszy opór powietrza stawia para przewodów znajdujących się w odległości 24 mm pomiędzy ich osiami. Stosowany w Polsce układ dwóch przewodów o odległości 80 mm między ich osiami jest jednym z najmniej korzystnych. Otrzymana podczas prób wartość współczynnika oporu powietrza C_x jest większa o 6% dla przewodu jezdniowego i o 12% dla lin nośnych od iloczynu $C \times K$ podanego w wytycznych projektowania [8]. Wartość współczynnika C_x nie jest stała i zmienia się z prędkością wiatru. Dla układu dwóch przewodów jezdnych znajdujących się w odległości 72 mm pomiędzy osiami przy prędkości wiatru 17,8 m/s wynosi 1,55, natomiast przy prędkościach 35,7 m/s i 40,0 m/s maleje i wynosi 1,38.

W opracowaniu [7] podano, że w latach od 1961 do 1975, maksymalne prędkości wiatru w porywach dochodziły do 40 m/s na obszarze pomiędzy Grudziądzem i Gdańskiem. W dniu 20.10.1986 r., kiedy wystąpiła bardzo duża liczba uszkodzeń sieci trakcyjnej w Polsce z powodu maksymalnego wywiania, prędkość wiatru wynosiła 38 m/s w pobliżu Łodzi. Uszkodzenia sieci występowały na obszarze, w którym prędkość wiatru była większa od 30 m/s. Obszar ten obejmował miasta: Szczecin, Poznań, Warszawę, Łódź, Wrocław wraz z ich otoczeniem.

Odchylenie poprzeczne U , spowodowane wiatrem na torze prostym, w przypadku gdy wartość bezwzględna odśuwu Z_1 jest równa Z_2 (oznaczona jako Z) oblicza się z zależności (4).

$$U = \frac{a^2 \cdot w}{8(X+N)} + \frac{2(X+N)}{a^2 \cdot w} \cdot Z^2 \quad (4)$$

gdzie:

- a – długość pręśła naprężenia [m],
- w – parcie wiatru na sieć [daN/m],
- X – naciąg liny nośnej [daN],
- N – naciąg przewodu jezdniowego [daN],
- Z – odsuw przewodu jezdniowego [m].

3. Obliczenia odchylenia poprzecznego według normy PN-EN 50119:2009

W normie PN-EN 50119:2009 [4] podano wzory do obliczenia siły parcia wiatru (5) i odchylenia poprzecznego Q_{wc} (7).

Siła parcia wiatru q_k :

$$q_k = 0,5 \cdot G_q \cdot G_t \cdot \rho \cdot v_R^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

gdzie:

- G_q – współczynnik zdefiniowany w ENV 1991-2-4:1995 [1], w przypadku sieci jezdnych projektowanych na wysokości do 10 m, G_q wynosi 2,05,
- G_t – współczynnik uwzględniający specyfikę terenu, w otwartym terenie G_t wynosi 1,0, w innych przypadkach powinien zdefiniować zamawiający,

- v_R – oznacza referencyjną, uśrednioną w ciągu 10 minut, prędkość wiatru na wysokości 10 m nad ziemią w m/s,
- ρ – gęstość powietrza równa 1,225 kg/m³ w temperaturze 15°C i do wysokości 600 m.

W innych przypadkach gęstość należy obliczyć z zależności (6):

$$\rho = 1,225 \cdot \left(\frac{288}{T} \right) \cdot e^{-1,2 \cdot 10^{-4} H} \quad (6)$$

gdzie:

- T – temperatura bezwzględna [K],
- H – wysokość [m].

Odchylenie poprzeczne:

$$Q_{wc} = q_k \cdot G_c \cdot d \cdot C_c \cdot (L_1 + L_2) / 2 \cdot \cos^2 \varphi \quad (7)$$

gdzie:

- q_k – parcie wiatru obliczone według wzoru (5),
- G_c – współczynnik strukturalny odpowiedzi dla przewodów, uwzględniający wpływ innych ruchomych przewodów sieci trakcyjnej, współczynnik G_c należy określić zgodnie z doświadczeniem krajowym (powszechnie akceptowaną wartością jest $G_c = 0,75$),
- d – średnica przewodu,
- C_c – współczynnik oporu przewodu (zaleca się wartość 1,0),
- L_1, L_2 – długości dwóch sąsiadujących pręśel zawieszenia,
- φ – kąt wiania krytycznego kierunku wiatru w stosunku do prostopadłej do przewodu jezdniowego, (jeżeli $\varphi = 0$ wówczas wiatr wieje prostopadle i parcie wiatru ma największą wartość).

W przypadku sieci z dwoma przewodami można zmniejszyć obciążenie wiatrem w przewodzie do 80% przewodu nawietrznego, jeżeli odległość między osiami jest mniejsza niż pięciokrotność średnicy. Przewody jezdne stosowane w Polsce mają przekrój poprzeczny 100 mm² i 150 mm². Średnica przewodu o przekroju 100 mm² wynosi 12 mm, a pięciokrotność tej wartości wynosi 60 mm. Dla przewodu o przekroju 150 mm² odległość krytyczna wynosi 72,5 mm. Stosowana odległość pomiędzy przewodami w sieciach trakcyjnych polskich wynosi 80 mm, a więc w żadnym przypadku, podczas obliczeń, nie można zmniejszyć parcia wiatru do 80%. Taki wniosek jest zbieżny z wynikami badań zleconymi przez COBiRTK i podanymi w rozdziale 2.

4. Obliczenia odchylenia poprzecznego według literatury niemieckiej

W publikacji [2], jest podany wzór (8) na parcie wiatru (F'_w):

$$F'_w = C_w \cdot \gamma \cdot v^2 \cdot D \quad (8)$$

gdzie:

- współczynnik C_w zależy od średnicy przewodu i wynosi: 1,2 dla $D < 12,5$ mm, 1,1 dla $12,5 \leq D < 15,8$ mm i 1,0 dla $D \geq 15,8$.

γ – gęstość powietrza,
 v – prędkość wiatru,
 D – średnica przewodu jezdnych lub liny nośnej.

Jak wynika z rysunku 1, na prostym odcinku toru odchylenie poprzeczne w punkcie x pomiędzy punktami podwieszenia jest sumą e_w oraz e_b . Wartości w kolejnych punktach można obliczyć ze wzorów (8), (9) i (10). Wzór (9) można stosować, gdy wywianiu podlega jeden przewód, a wzór (9a) gdy wywianiu podlegają lina i przewód jezdny. Wzór (9a) ma charakter przybliżony, ponieważ nie uwzględnia interakcji pomiędzy przewodem jezdnym i liną, wywołanej przez łączące je wieszaki. Jest ona różna, zależna od typu sieci.

$$e_w = F'_w \cdot x \cdot (L - x) / (2H) \quad (9)$$

$$e_w = (F'_{wDjp} + F'_{wLn}) \cdot x \cdot (L - x) / [2(H_{Djp} + H_{Ln})] \quad (9a)$$

gdzie:

F'_{wDjp} – parcie wiatru na przewód jezdny,
 F'_{wLn} – parcie wiatru na linę nośną, odległość liczona od początku przęsła (rys. 1),
 L – długość przęsła,
 H – naciąg przewodu,
 H_{Djp} – naciąg przewodu jezdnych,
 H_{Ln} – naciąg liny nośnej.

Przy różnych odsuwach przewodu jezdnych Z_1 i Z_2 pod konstrukcjami wsporczymi, na prostej w warunkach bezwietrznych, położenie e_b przewodu jezdnych można obliczyć ze wzoru (10):

$$e_b = (Z_1 - Z_2) \cdot (L - x) / L + Z_2 \quad (10)$$

Ostateczny kształt i wartość przemieszczenia bocznego przewodu jezdnych lub liny nośnej można obliczyć ze wzoru (11):

$$e_w = [(F'_w \cdot x) / (2H) + (Z_1 - Z_2) / L] \cdot (L - x) + Z_2 \quad (11)$$

W rzeczywistych przypadkach stosowane są różne przekroje lin i przewodów jezdnych oraz różne naciągi. Odchylenie poprzeczne obliczone ze wzoru (11) daje większe wartości odchylenia poprzecznego niż w rzeczywistości. W rzeczywistości wieszaki, które łączą przewód jezdny i linę nośną, pod wpływem wiatru zmieniają swoje położenie przestrzenne i wywołują przemieszczenia obciążeń między drutem jezdnym i liną nośną.

Jeżeli wywianie przewodu jezdnych jest większe niż wywianie liny nośnej, wówczas lina nośna zmniejsza wywianie przewodu jezdnych. Z układu geometrycznego sieci jezdnych wynika, że powstaje składowa siła parcia skierowana do słupa. Wówczas parcie wiatru oblicza się ze wzoru (12), przy założeniu, że wszystkie wieszaki w całym przęsle mają taką samą długość jak środkowy wieszak. Oznacza to, że wszystkie wieszaki w przęsle mają równy kąt wyparcia. Długość

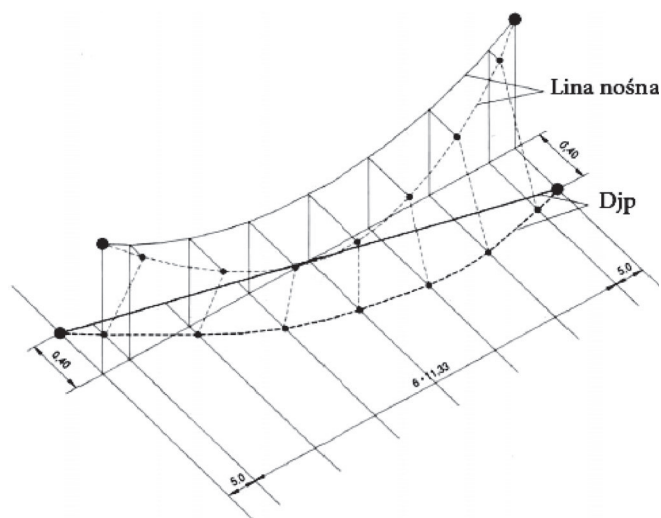
tego wieszaka wynosi 2/3 wysokości konstrukcyjnej. To założenie jest dopuszczalne, jeżeli wysokość konstrukcyjna sieci jest większa niż 1,40 m.

$$F_{w,Djp,Ln} = \frac{(F'_{w,Djp} \cdot H_{Ln} - F'_{w,Ln} \cdot H_{Djp})}{[H_{Djp} + H_{Ln} + (16 \cdot H_{Djp} \cdot H_{Ln} \cdot WK)] / (3L^2 G'_{Djp})} \quad (12)$$

gdzie oznaczenia w poprzednich wzorach oraz:

H_{Djp} – naciąg w przewodzie jezdnych,
 H_{Ln} – naciąg w linie nośnej,
 WK – wysokość konstrukcyjna,
 G'_{Djp} – ciężar przewodu jezdnych.

Jak twierdzą autorzy artykułu [2], weryfikacja nowej metody obliczeń powinna się odbyć przez porównanie wyników obliczeń z pomiarami na sieciach trakcyjnych. Jednakże założenia leżące u podstaw obliczeń nie mogą zostać odtworzone z dostateczną dokładnością w rzeczywistych warunkach. Do weryfikacji nowej metody zastosowano metodę MES. Parcie wiatru zamodelowano w węzłach wieszaków i przewodu jezdnych. Na rysunku 4 pokazano przestrzenne położenie sieci trakcyjnej łańcuchowej Re 200 w wyniku działania wiatru.



Rys. 4. Odchylenie poprzeczne sieci trakcyjnej Re200 obliczone metodą MES; naciąg w linie nośnej i w przewodzie jezdnych – po 10 kN, wysokość konstrukcyjna 1,8 m, $L = 80$ m, $D_{jp} = R100$, $L_n = Bz11 50$ [2]

5. Obliczenie odchylenia poprzecznego przewodu jezdnych

Do porównania wyników obliczeń odchylenia poprzecznego metodą według wytycznych projektowania let [8] i według normy PN-EN 50119:2009 [4] przyjęto najprostszą, stosowaną w torach bocznych PKP sieć trakcyjną typu C95-C o następujących parametrach: naciąg liny nośnej – 1167 daN, naciąg przewodu jezdnych – 956 daN, normalna długość przęsła 72 m, sieć zaprojektowana dla pierwszej strefy wiatrowej, odsuw przewodu jezdnych 0,300 m.

5.1. Obliczenie odchylenia poprzecznego metodą wytycznych projektowania let-107

Obliczenie według wzorów:

- (2) podstawowe obciążenie wiatrowe: $p = 329,2 \text{ N/m}^2$,
- (1) parcie wiatru na linię nośną $w_{Ln95} = 3,982 \text{ daN/m}^2$,
- (1) parcie wiatru na przewód jezdny $w_{Djp100} = 3,793 \text{ daN/m}^2$,
- (1) parcie wiatru na sieć C95-C $w_{c95-c} = 7,775 \text{ daN/m}^2$,
- (4) odchylenie poprzeczne sieci jezdnej $U = 0,373 \text{ m}$.

5.2 Obliczenie odchylenia poprzecznego metodą według normy PN-EN 50119:2009

Obliczenie według wzorów:

- (2) podstawowe obciążenie wiatrowe: $p = 329,2 \text{ N/m}^2$,
- (1) parcie wiatru na linię nośną $w_{Ln95} = 3,905 \text{ daN/m}^2$,
- (1) parcie wiatru na przewód jezdny $w_{Djp100} = 4,101 \text{ daN/m}^2$,
- (1) parcie wiatru na sieć C95-C $w_{c95-c} = 8,006 \text{ daN/m}^2$,
- (4) odchylenie poprzeczne sieci jezdnej $U = 0,379 \text{ m}$.

Odchylenie poprzeczne sieci jezdnej obliczone metodą podaną w normie PN-EN 50119:2009 [4] jest większe o 6 mm w stosunku do obliczonego metodą podaną w wytycznych projektowania let-107 [8]. Różnica 6 mm stanowi 1,2% maksymalnego odchylenia poprzecznego wymaganego przez TSI podsystemu „Energia”.

6. Wnioski

1. Rozstaw przewodów jezdnych, wynoszący 80 mm między osiami przewodów, jest niekorzystny z punktu widzenia odchylenia przewodu jezdnej. Należy go zmniejszyć na mniejszy niż 60 mm, na przykład 50 mm.
2. Wyniki obliczeń odchylenia poprzecznego sieci jezdnej metodą podaną w wytycznych projektowania let-107 [8]

różnią się od wyników obliczonych metodą podaną w normie PN-EN 50119:2009 [4] o 1,2%, co należy uznać za wielkość nieistotną.

Bibliografia

1. ENV 1991-2-4:1995: Eurocode 1. Basis of design and actions on structures – actions on structures. Wind actions (together with united kingdom national application document) Comite Europeen de Normalisation (CEN).
2. Kießling F., Schmidt P.: *Windabrieb von Oberleitungskettenwerken*. Elektrische Bahnen nr 7 z 1998 r, s. 231–235.
3. PN-E-05100-1:1998 – wersja polska: Elektroenergetyczne linie napowietrzne – Projektowanie i budowa – Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi.
4. PN-EN 50119:2009 – wersja angielska: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Sieć jezdna górna trakcji elektrycznej.
5. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia” systemu kolei w Unii Dz.U. UE L 356 z 12.12.2014.
6. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej Dz.U. UE L 356 z 12.12.2014.
7. Wójtowicz A.: *Weryfikacja metody obliczenia obciążeń sieci trakcyjnej parciem wiatru*. Warszawa, COBiRTK, czerwiec 1987 r.
8. Wytyczne projektowania i warunki odbioru sieci trakcyjnej z uwzględnieniem standardów wymogów dla linii interoperacyjnych, let-107. PKP PLK. S.A. Warszawa, 2007.