

Tadeusz Knych¹, Andrzej Mamala¹

ANALIZA ZMIAN NAPRĘŻEŃ W SAMONOŚNYCH PRZEWODACH ZE STOPÓW ALUMINIUM POD KĄTEM ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA PRACY LINII NAPOWIETRZNEJ

Streszczenie: Przewody linii napowietrznych podlegając trwałym przyrostom długości zmieniają w sposób nieodwracalny swe położenie nad ziemią, co wpływa na bezpieczeństwo ich pracy. Poprawny proces projektowania linii musi uwzględniać powyższe zmiany, co narzuca konieczność zastosowania nowego równania stanów oraz odmiennej filozofii projektowania przęsła wykorzystującej koncepcję rezerwy naprężeń. Możliwości jej zagospodarowania przedstawiono na przykładzie przewodu stopowego typu AAL400

Słowa kluczowe: mechanika przęsła, pełzanie, przewody ze stopów aluminium

1. Postawienie problemu

Podstawowym zagadnieniem podczas projektowania i eksploatacji elektroenergetycznych linii napowietrznych wysokiego napięcia jest zapewnienie właściwej izolacji elektrycznej wiszącego przewodu. Sprowadza się ono do zapewnienia bezpiecznej odległości gołego przewodu fazowego od pozostałych, uziemionych lub posiadających inny potencjał obiektów. Jak wiadomo, kształt linii zwisania przewodu zależy od jego parametrów, gęstości przepływającego prądu, geometrii przęsła oraz szeregu czynników o charakterze meteorologicznym. Rozpatrywane zagadnienie zapewnienia bezpiecznej odległości przewodu od ziemi i innych elementów linii nabiera więc charakteru wielowymiarowego.

Szczególną wagę, dla analizy rozpatrywanego zagadnienia zapewnienia elektrycznego i mechanicznego bezpieczeństwa pracy linii, posiada zjawisko trwałych przyrostów długości przewodu, które w skutku jest odpowiedzialne za permanentne pomniejszanie się odległości przewód - ziemia. Właściwe ulokowanie trwałych zmian długości w równaniu stanów wymagało opracowania jego nowej postaci uwzględniającej czynnik czasu oraz parametry reologiczne przewodu. Wobec jednoznacznej relacji między położeniem przewodu nad ziemią, a panującym w nim naprężeniem rozumowanie sprowadza się w efekcie do analizy zmian naprężeń w wiszącym przewodzie w czasie eksploatacji linii.

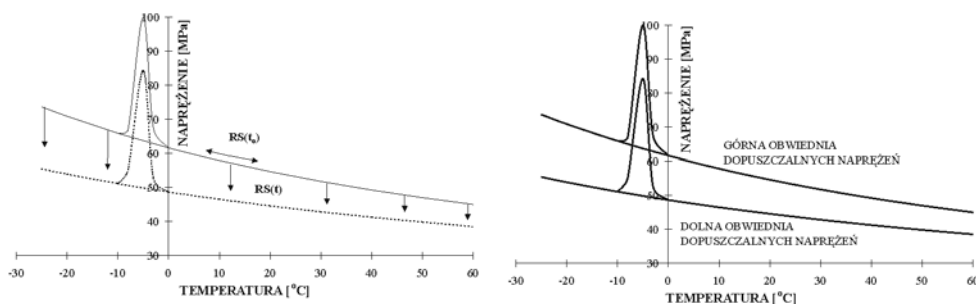
¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Metali Nieżelaznych

2. Analiza zagadnienia

Klasykne podejście do projektowania pracy wiszącego w przęśle przewodu opiera się o równanie stanów, które uwzględnia jedynie odwracalne zmiany naprężeń pochodzące od zmian temperatury i ciężaru objętościowego przewodu i nie uwzględnia czynnika czasu. Równanie to w swojej klasycznej postaci przedstawia wyrażenie (1)

$$\sigma' - \frac{a^2 g'^2 E}{24\sigma'^2} = \sigma - \frac{a^2 g^2 E}{24\sigma^2} - E\alpha(T' - T) \quad (1)$$

w którym a, E, α to odpowiednio rozpiętość przęsła, moduł sprężystości i współczynnik wydłużenia cieplnego przewodu, zaś σ' i g' to naprężenie w przewodzie oraz jego ciężar objętościowy w temperaturze T' , natomiast σ i g w temperaturze T . Graficzną ilustrację równania stanów w układzie $\sigma - T$ przedstawiono na rysunku 1. Pik charakterystyki odpowiada warunkom sady normalnej.



Rys. 1. Położenia charakterystyki stanu przewodu AAL400 rozpiętego w przęśle o długości 400 m **Rys. 2.** Przykładowy przebieg obwiedni dopuszczalnych naprężeń pracy przewodu AAL400 rozpiętego w przęśle o długości 400 m

Analizując (1) łatwo zauważamy, że dla ustalonych parametrów przęsła położenie charakterystyki $\sigma(T, g)$ jest stałe. Mówiąc dokładniej, zgodnie z klasycznym równaniem stanów, naprężenia w przewodzie będą zawsze zmieniać swoje wartości wg charakterystyki $RS(t_0)$. Takie podejście, chociaż powszechnie stosowane, nie odpowiada rzeczywistości, ponieważ nie uwzględnia ono zmian naprężeń pochodzących od nieodwracalnych przyrostów długości przewodu spowodowanych procesami reologicznymi tzn. procesem pełzania i osiadania. Tak więc charakterystyka stanów zmienia w miarę upływu czasu swoje początkowe położenie $RS(t_0)$ na chwilowe $RS(t)$, a mówiąc inaczej podlega przesuwaniu się w dół w układzie naprężenie-temperatura (por. rys. 1) z tempem zależnym od mocy potencjału reologicznego przewodu oraz warunków jego pracy.

Z powyższej analizy wynika, że trwałe przyrosty długości przewodu mogą, po dłuższym okresie jego eksploatacji, doprowadzić do zmniejszenia odległości przewód – interesujący nas obiekt, (zwłaszcza w sprzyjających ku temu warunkach) do niedopuszczalnego poziomu. Powyższe rozumowanie uzasadnia potrzebę wprowadzenia procesów reologicznych do równania stanów, jako dodatkowej przyczyny nieodwracalnego pomniejszania się naprężeń w przewodzie, a w skutku nieodwracalnego powiększania się jego zwisu. Beż wnikania

w szczególności budowy mechaniczno-reologicznego modelu przewodu, równanie stanów przewodu stopowego uwzględniające spadek naprężenia pochodzący od pełzania, relaksacji naprężeń i osiadania przewodu posiada postać [1]:

$$\sigma'(t) - \frac{a^2 g^2 E}{24 \sigma'(t)^2} = \sigma_R(t) - E \left(\alpha(T' - T) + \Delta \sigma^0 \left(\frac{1}{E_p} - \frac{1}{E} \right) + \frac{1}{\beta \sigma(t=0)} \int_{t_0}^t e^{\phi T(t)} \sigma'(t)^{n+1} t^{\beta-1} dt \right) \quad (2)$$

Występująca w (2) wielkości $\sigma, T, a, g, E, \alpha$ posiadają analogiczne znaczenia jak w (1), t oznacza czas, zaś γ, ϕ, n, β to parametry reologiczne przewodu odpowiadające za trwałe przyrosty jego długości.

Nowa postać równania stanów wiszącego przewodu stopowego, która uwzględnia wszystkie, zarówno odwracalne jak i nieodwracalne, przyczyny zmian naprężeń, narzuciła konieczność opracowania właściwej koncepcji projektowania pracy przewodu, bazującej na dopuszczalnych obwiedniach naprężeń pracy przewodu. Na przedstawiony na rysunku 1 zakres zmienności naprężeń pracy wiszącego przewodu nakłada się pewne ograniczenia, związane z bezpieczeństwem pracy linii, które gwarantują zachowanie bezpiecznej odległości przewodu od innych obiektów, a więc właściwą izolację układu.

Z jednej strony niezbędne jest ograniczenie naprężeń pracy przewodu od góry z uwagi na skończoną nośność elementów przęsła. Z drugiej zaś należy ograniczyć naprężenia pracy przewodu od dołu z uwagi na bezpieczną odległość przewodu od ziemi uniemożliwiająca elektryczne przebicie, co w praktyce sprowadza się do kontroli maksymalnego zwisu przewodu. Zastosowana koncepcja odpowiadająca zasadzie górnej i dolnej obwiedni naprężeń została przedstawiona na rysunku 2 i pozwala na ustalenie pola dopuszczalnych naprężeń pracy przewodu (por. rys. 2).

Niżej położona krzywa na rys. 2 (dolna obwiednia) reprezentuje minimalne, charakterystyczne dla danych warunków (temperatura, prędkość wiatru, sadz), dopuszczalne naprężenia pracy przewodu, krzywa położona wyżej zaś naprężenia maksymalne – jest to więc obwiednia górna. Maksyma na wykresach odpowiadają pojawieniu się sadzi. Pole między obiema obwiedniami stanowi zakres dopuszczalnych naprężeń pracy przewodu. Takie ujęcie zależności naprężeń w przewodzie jako funkcji temperatury i czasu pozwala potraktować odstęp pomiędzy górną i dolną obwiednią jako swego rodzaju rezerwę naprężeń, którą w optymalny sposób wykorzystać można przy projektowaniu przęsła. Zagadnieniu temu poświęcono następny rozdział niniejszej pracy.

3. Projektowanie pracy przewodu w oparciu o koncepcję dopuszczalnych obwiedni naprężeń

Praktyczną ilustrację możliwości wykorzystania rezerwy naprężeń przedstawiono na przykładzie przewodu stopowego - zamiennika klasycznej bimetalowej konstrukcji stalowo-aluminiowej. Rozpatrzmy w tym celu typowe przęsło odciągowe linii 220 kV o rozpiętości 400 m, w którym wysokość zawieszenia przewodu wynosi 20,5 m. Naprężenie podstawowe pracy przewodu wynosi 100 MPa, a temperatura graniczna robocza +60°C. Jako przewody fazowe wykorzystano konstrukcję AAL400. Jest to stopowy zamiennik, opracowanej w latach 80-tych konstrukcji bimetalowej AFL8-350. Oba przewody posiadają identyczną budowę geometryczną i są sobie równoważne pod względem wytrzymałościowym i elek-

trycznym. Przewód wykonany został w Krakowskiej Fabryce Kabli S.A. wg technologii opracowanej wspólnie z zespołem naukowym Akademii Górniczo-Hutniczej w ramach projektu celowego[2]. Parametry analizowanej konstrukcji przedstawiono w tabelicy I.

Tablica I. Własności przewodu typu AAL400

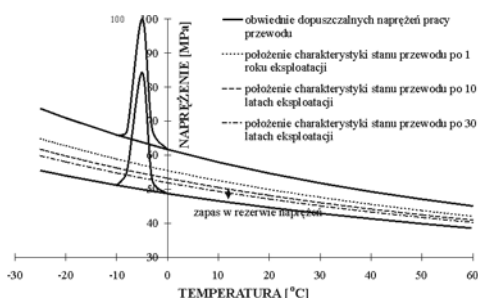
Typ przewodu		AAL400
Napężenie dopuszczalne katastrofalne - σ_{dk}	[MPa]	275
Napężenie dopuszczalne normalne - σ_{dn}	[MPa]	137.5
Napężenie codzienne EDS	[MPa]	89,3
Moduł sprężystości E_p	[MPa]	55300
Moduł sprężystości E_k	[MPa]	62800
Wsp. wydłużenia cieplnego - α	[1/°C]	0.000023
Ciążar objętościowy przewodu - g	[MPa/m]	0.027
Ciążar objętościowy przewodu z sadią normalną - g_{sn}	[MPa/m]	0.0516
Ciążar objętościowy przewodu z sadią katastrofalną - g_{sk}	[MPa/m]	0.0762
Temperatura graniczna robocza - T_{GR}	[°C]	80
Parametry funkcji pełzania:		
	γ	0.000000191
	β	0.203
	n	1.27
	ϕ	0.02

Przykładowe położenia charakterystyki stanu po 1, 10 i 30-tu latach przedstawiające zależność napężenia w funkcji temperatury przewodu umieszczonego w analizowanym prześle dla różnych sposobów wykorzystania rezerwy naprężeń zamieszczono na rysunkach 3, 4, 5.

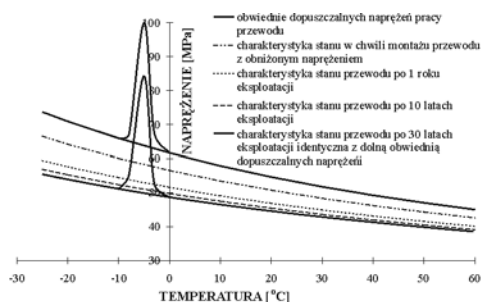
Z charakterystyk zamieszczonych na rysunku 3 wynika, że naturalnym sposobem wykorzystania istniejącej rezerwy naprężenia jest ich przeznaczenie na trwałe przyrosty długości przewodu. Kolejne położenia charakterystyki stanu na rysunku odpowiadają warunkom montażu i po 1, 10 i 30 latach. Bardziej szczegółowa analiza pracy przewodu w rozpatrywanym prześle pozwala na stwierdzenie, że ogólne wyężenie przewodu stopowego jest znacząco niższe, niż analogicznego przewodu aluminiowo-stalowego. Niższe naprężenia robocze przewodu zwiększają dodatkowo jego bezpieczeństwo pracy, z jednej strony z uwagi na statyczne obciążenie mechaniczne przewodu w warunkach ekstremalnych oraz pełzanie, z drugiej zaś ze względu na odporność zmęczeniową. Kontynuując rozważania nad pracą przewodu stopowego zauważamy, że wprowadzenie przewodu opartego o stopy Al do prześla optymalnie zaprojektowanego dla przewodów typu AFL skutkuje pojawieniem się dużego zapasu odległości przewód - ziemia, nie wykorzystanego na trwałe przyrosty długości wiszącego przewodu. Rozpatrzmy więc dodatkowe możliwości wykorzystania istniejącego zapasu odległości przewód - ziemia.

Po pierwsze, istnieje możliwość zmiany geometrii prześla tzn. obniżenia wysokości konstrukcji wsporczych lub zwiększenia rozpiętości prześla, co redukuje koszty budowy linii. W rozpatrywanej sytuacji geometria prześla jest narzucona przez istniejące słupy i odległości

między nimi. W tym przypadku, najprostszym rozwiązaniem jest zawieszenie przewodu ze zmniejszonym wyętwieniem co przedstawiono na rysunku 4.

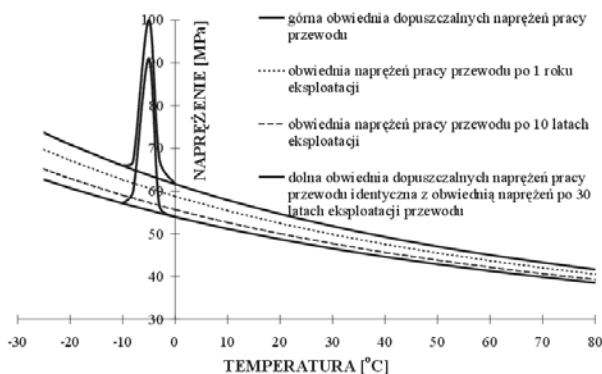


Rys. 3. Położenia charakterystyki stanu wiszącego przewodu AAL 400 w wybranych chwilach jego eksploatacji. Linia 220 kV, przeszło o rozpiętości 400 m, wysokość zawieszenia przewodu 20.5 m, naprężenie podstawowe 100 MPa, temperatura graniczna robocza +60°C



Rys. 4. Położenia charakterystyki stanu wiszącego przewodu AAL 400 w wybranych chwilach jego eksploatacji. Montaż z obniżonym wyętwieniem. Linia 220 kV, przeszło o rozpiętości 400 m, wysokość zawieszenia przewodu 20.5 m, naprężenie podstawowe 94 MPa, temperatura graniczna robocza +60°C

Świadome obniżenie wyętwienia oznacza, że przewodu nie montuje się z naprężeniem o wartości wynikającej z górnej obwiedni dopuszczalnych naprężeń, lecz z niższym, znajdującym się w polu rezerwy naprężeń. Mniejsze wyętwienie oznacza mniejsze trwałe przyrosty długości, co redukuje odległość między początkowym i końcowym położeniem charakterystyki stanu przewodu. Warunki montażu dobrać należy oczywiście w ten sposób, by obniżające się w czasie położenie przewodu nad ziemią nie przekroczyło nigdy odległości bezpiecznej wymaganej przez przepisy.



Rys. 5. Położenia charakterystyki stanu wiszącego przewodu AAL 400 w wybranych chwilach jego eksploatacji. Linia 220 kV, przeszło o rozpiętości 400 m, wysokość zawieszenia przewodu 20,5m, naprężenie podstawowe 100 MPa, temperatura graniczna robocza +80°C

Alternatywną możliwością wykorzystania zapasu w rezerwie naprężeń jest zwiększenie obciążalności prądowej linii. Takie postępowanie z uwagi na wzrost średniej temperatury pra-

cy przewodu wymaga podwyższenia poziomu jego temperatury granicznej roboczej. W rozważanym w pracy przykładzie zwiększenie granicznej roboczej temperatury przewodu z $+60^{\circ}\text{C}$ na $+80^{\circ}\text{C}$ pozwala zwiększyć obciążalność prądową przewodu AAL400 z 906 A na 1089 A, a więc o ponad 20%. Nowy zakres temperatur pracy przewodu zmienia oczywiście przebieg obwiedni dopuszczalnych naprężeń, górna zostaje jedynie przedłużona do $+80^{\circ}\text{C}$, dolna zaś ulega podwyższeniu, z uwagi na fakt, że największy zwis normalny występuje teraz w temperaturze $+80^{\circ}\text{C}$. Opisaną sytuację ilustrują charakterystyki przedstawione na rysunku 5.

4. Podsumowanie

1. Proces projektowania pracy wiszącego w przęśle przewodu powinien obejmować kompleksowo ogół procesów zachodzących w przewodzie, a m.in. trwałe przyrosty jego długości. Dopiero takie podejście umożliwi prawidłowe szacowanie odległości przewodu od innych obiektów.
2. Uwzględnienie trwałych przyrostów długości przewodu opiera się na nowej postaci równania stanów oraz towarzyszącej mu koncepcji obwiedni dopuszczalnych naprężeń.
3. Istniejącą rezerwę naprężeń między górną a dolną obwiednią dopuszczalnych naprężeń przeznaczyć można na procesy reologiczne w przewodzie, zmianę geometrii przęsła, obniżenie wyteżenia przewodów oraz zmianę obciążalności prądowej linii.

Literatura

- [1] **Mamala A.**: *Analiza zmian naprężeń w samonośnych napowietrznych przewodach ze stopu Al-MgSi uwzględniająca reologiczną naturę materiału*. Praca doktorska AGH Wydział Metali Nieżelaznych, Kraków 2001.
- [2] Projekt celowy nr 7 7754 94C/2192: *Uruchomienie produkcji energetycznych przewodów napowietrznych ze stopów AlMgSi*.

CHANGES OF STRESS IN ALUMINIUM ALLOYS OVERHEAD LINE CONDUCTORS DUE TO SAFETY EXPLOATATION OF LINE

Abstract: Distance to ground changes due to permanent elongation is observed in overhead line conductors. Better design of the line must include this process. Original method of design based on extreme characteristics is proposed