

MODELOWANIE OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ PRZEWODÓW NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

Jarosław KMAK¹, Wiesław NOWAK², Waldemar SZPYRA³, Rafał TARKO⁴

1. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studia doktoranckie
tel.: +48663662731, e-mail: kmak@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: +48 12 617 28 24, e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl
3. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: +48 12 617 32 47, e-mail: wszpyra@agh.edu.pl
4. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: +48 12 617 36 53, e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Streszczenie: Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną wymusza konieczność modernizacji istniejących oraz budowanie nowych sieci elektroenergetycznych. Alternatywne rozwiązanie stanowi zastosowanie w istniejących sieciach systemów dynamicznej obciążalności. Dopuszczalny prąd jest w tych rozwiązaniach dostosowywany do panujących warunków zewnętrznych. Określenie obciążalności przewodu wymaga przeprowadzenia złożonych obliczeń z wykorzystaniem modeli matematycznych. W artykule przeanalizowano trzy przykładowe modele. Pierwszy oparty jest na bilansie cieplnym. Kolejne dwa modele wykorzystują obliczenia numeryczne w programie ANSYS i różnią się stopniem złożoności odwzorowania geometrii przewodu.

Słowa kluczowe: napowietrzne linie elektroenergetyczne, obciążalność dynamiczna linii, metoda elementów skończonych.

1. WPROWADZENIE

1.1. Obciążalność linii

Linie elektroenergetyczne mają ograniczone zdolności przesyłowe, które wynikają z właściwości cieplnych i mechanicznych zastosowanych przewodów (względny bezpieczeństwa – odległości przewodów od ziemi i obiektów krzyżowanych). O obciążalności linii decyduje temperatura osiągnięta przez przewód. W przeszłości linie projektowano na dopuszczalną temperaturę przewodu wynoszącą 40°C, następnie zwiększono ją do 60°C, a obecnie wynosi ona 80°C. Temperatura osiągnięta przez przewód zależy od bilansu cieplnego, którego składniki zależą od prądu przepływającego przez linię oraz warunków wymiany ciepła z otoczeniem. W związku z tym, określając dopuszczalny prąd, należy sprecyzować warunki, dla których został on wyznaczony.

Do określania obciążalności stosowane są zasadniczo dwa podejścia: statyczne oraz dynamiczne. Obciążalność statyczna określana jest jako jedna wartość dla całego roku bądź sezonu, obliczona dla ściśle określonych warunków atmosferycznych. Warunki te wyznaczono na podstawie wieloletnich obserwacji, jako najbardziej niekorzystne, które jednocześnie mogą wystąpić na danym terenie. Wartości wyznaczonych w ten sposób prądów dopuszczalnych, zostały dla poszczególnych typów przewodów stabilizowane

i są wygodne do stosowania, jednak nie uwzględniają one panujących w rzeczywistości warunków atmosferycznych. Najczęściej panujące warunki atmosferyczne są znacznie łagodniejsze od założonych, co skutkuje niepełnym wykorzystaniem zdolności przesyłowych linii.

Obciążalność dynamiczna stanowi alternatywę dla analizowanego problemu. W tym przypadku prąd dopuszczalny określany jest dla chwilowych warunków atmosferycznych. Stosowane są dwie metody wyznaczania obciążalności dynamicznej: bezpośrednia i pośrednia. Pierwsza z nich opiera się na pomiarze wartości parametrów będących skutkiem przepływającego prądu (temperatura przewodu, zwiś, naprężenie) [1]. Natomiast w metodzie pośredniej prąd dopuszczalny określa się z wykorzystaniem modelu matematycznego na podstawie pomiaru warunków meteorologicznych.

Zastosowanie systemów dynamicznej obciążalności w elektroenergetyce przynosi wymierne korzyści. Wylimitowane zostają ograniczenia projektowe w systemie przesyłowym, wynikające ze stosowania stabilizowanych wartości dopuszczalnych prądów. W ten sposób w korzystniejszych warunkach atmosferycznych prąd obciążenia może być zwiększony. W efekcie rozbudowa bądź modernizacja sieci (zwiększenie zdolności przesyłowej), może być odroczone. Poprawie ulega szeroko rozumiane bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego, a ponadto wylimitowane zostaje zagrożenie przeciążenia przewodów w przypadku wystąpienia mniej sprzyjających warunków niż przyjęte do wyznaczenia obciążalności statycznej. System dynamicznej obciążalności linii umożliwia również wyznaczenie obciążalności na podstawie prognoz warunków atmosferycznych. Znajomość prognozowanej obciążalności linii może być wykorzystana do planowania i optymalizacji pracy systemu elektroenergetycznego.

1.2. Bilans cieplny przewodu

Podstawę do wyznaczania obciążalności linii stanowi bilans cieplny przewodu, którego składnikami są ciepło wytworzone w przewodzie, ciepło zaabsorbowane przez przewód z otoczenia oraz ciepło oddane z przewodu do otoczenia. W stanie równowagi zyski równają się stratom

ciepła i ustala się temperatura przewodu. W przypadku zmiany warunków pracy występuje stan przejściowy, podczas którego temperatura ulega zmianie. Na prąd dopuszczalny w przewodzie wpływa wiele czynników. Część z nich może być zaniedbana, inne agregowane są w jeden składnik bilansu. Najczęściej stosuje się bilans czteroskładnikowy [1, 2, 3]:

$$P_{AC} + P_S = P_C + P_R \quad (1)$$

gdzie: P_{AC} – moc wydzielona w przewodzie na skutek przepływającego prądu przemiennego, P_S – moc zaabsorbowana przez przewód na skutek nasłonecznienia, P_C – moc oddana do otoczenia na drodze konwekcji, P_R – moc oddana do otoczenia na drodze promieniowania.

Moc wydzielona w przewodzie na skutek przepływu prądu przemiennego P_{AC} uwzględnia straty mocy Joule'a oraz ciepło wydzielane w rdzeniu stalowym na skutek histerezy i prądów wirowych a także uwzględnia tak zwany efekt transformatorowy [4]. Te dodatkowe straty uwzględniane są poprzez zwiększenie efektywnej rezystancji przewodu. Moc P_{AC} uzależniona jest od prądu oraz rezystancji, a więc pośrednio od parametrów konstrukcyjnych i materiałowych przewodu oraz od jego temperatury.

Moc zaabsorbowana przez przewód na skutek promieniowania słonecznego zależy od szeregu czynników. Decydujący wpływ ma natężenie promieniowania słonecznego oraz absorpcyjność powierzchni przewodu, która informuje jaka część promieniowania padającego zostaje absorbowana przez przewód. Uzależniona jest ona od stanu powierzchni przewodu: chropowatość, zanieczyszczenie, obecność tlenków.

Moc oddana przez przewód do na drodze konwekcji P_C ma najistotniejszy wpływ na chłodzenie przewodu. Do jej prawidłowego określenia niezbędna jest znajomość praw mechaniki płynów, wymiany ciepła i masy wyrażonych w postaci równań różniczkowych, do których rozwiązania wykorzystuje się teorię podobieństwa oraz zależności półempiryczne. Decydujący wpływ na wielkość P_C mają prędkość i kierunek wiatru oraz właściwości powietrza, takie jak współczynnik lepkości i przewodzenia ciepła, których wartości zależą od temperatury.

Na wielkość mocy oddanej do otoczenia na drodze promieniowania P_R , wyznaczanej na podstawie prawa Stefana-Boltzmana, ma wpływ emisyjność (parametr zbliżony do absorpcyjności) oraz temperatura przewodu.

1.3. Warunki wyznaczania obciążalności

Obciążalność przewodów metodą statyczną wyznacza się dla określonych parametrów. W Tabelicy 1 podano najczęściej przyjmowane wartości tych parametrów.

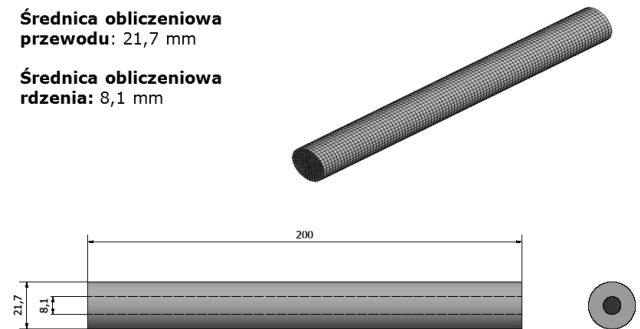
Tabelica 1. Warunki dla wyznaczania obciążalności [5]

Parametr	Kwiecień - Październik	Listopad – Marzec
Temperatura otoczenia [°C]	30	20
Prędkość wiatru [m/s]	0,5	0,5
Natężenie promieniowania słonecznego [W/m ²]	900	720
Emisyjność/absorpcyjność [-]	0,5	0,5
Temperatura przewodu dopuszczalna długotrwale [°C]	80	80

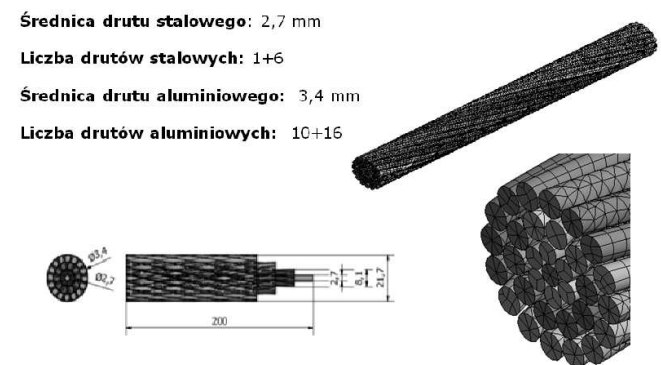
2. ANALIZOWANE MODELE

Dla wyznaczenia rozkładów temperatur oraz obciążalności przewodów w różnych warunkach atmosferycznych opracowano trzy modele przewodu AFL-6 240 mm²:

- model wykorzystujący bilans cieplny przewodu (1),
- model z uproszczonym (walcowym) odwzorowaniem geometrii przewodu (rys. 1),
- model z dokładnym odwzorowaniem geometrii przewodu (rys. 2).



Rys. 1. Uproszczone odwzorowanie przewodu AFL-6 240 mm²



Rys. 2. Dokładne odwzorowanie przewodu AFL-6 240 mm²

Model przestrzenny przedstawiony na rys. 2 pozwala wziąć pod uwagę wymianę ciepła pomiędzy warstwami i poszczególnymi drutami w warstwach z uwzględnieniem skoku skręcenia drutów.

3. WYNIKI ANALIZ

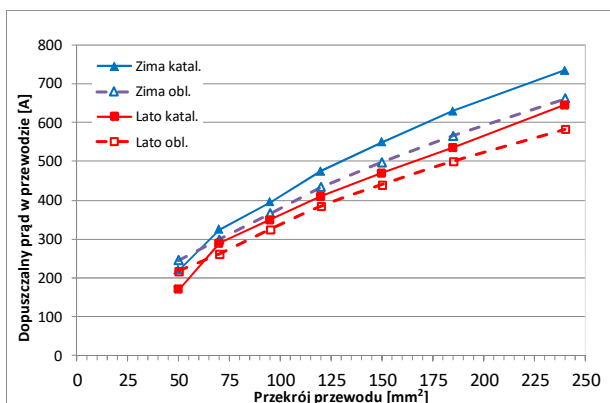
3.1. Model cieplny przewodu – bilans czteroskładnikowy

Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programu MATLAB. Wyznacza on metodą podaną w [1] dopuszczalny prąd w przewodzie w zdefiniowanych warunkach. W tabelicy 2 przedstawiono składniki bilansu, dla warunków podanych w tabelicy 1. Na ich podstawie można wywnioskować, że najistotniejszym zjawiskiem wpływającym na obciążalność przewodu jest konwekcja. Chłodzenie radiacyjne ma nieco mniejsze znaczenie. Otrzymane wartości prądów dopuszczalnych są mniejsze od wartości podanych w [5]. Dla zbadania tego trendu przeprowadzono obliczenia dla szeregu przekrojów przewodów AFL. Wyniki przedstawiono na rysunku 3. Porównano na nim wartości prądów dopuszczalnych podanych w [6] z wartościami obliczonymi przy pomocy modelu dla okresów letniego oraz zimowego. Przedstawione

wyniki pokazują, że dla mniejszych przekrojów wartości obliczone są większe od tablicowych, natomiast dla większych przekrojów sytuacja jest odwrotna.

Tablica 2. Składniki bilansu cieplnego oraz obciążalność długotrwała przewodu AFL-6 240 mm²

Parametr	Kwiecień – Październik	Listopad – Marzec
P_{AC} , W/m	51,3	66,0
P_S , W/m	17,0	15,0
P_C , W/m	54,9	65,7
P_R , W/m	13,4	15,3
I_b , A	582	661



Rys. 3. Obciążalności przewodów AFL-6 o różnych przekrojach, wyznaczone dla okresów zimowego i letniego

Różnice pomiędzy wartościami obciążalności przedstawionymi na rysunku 3 wynikają z uwzględnienia wpływu na rezystancję przewodu zjawisk zachodzących przy prądzie przemiennym (naskórkowość, histereza i prądy wirowe w rdzeniu stalowym, promieniowy rozkład temperatury w przewodzie [1]), które powodują zwiększenie rezystancji przewodu dla prądu przemiennego, a tym samym wzrost ilości ciepła wydzielonego w przewodzie na skutek przepływu prądu.

3.2. Model numeryczny przewodu

W celu wykonania obliczeń numerycznych w programie ANSYS, konieczne jest określenie następujących warunków brzegowych: konwekcja, promieniowanie, promieniowanie słoneczne, wewnętrzne źródło ciepła, siła naciągu. Wartości parametrów wprowadzanych do programu zostały uprzednio obliczone na podstawie zależności występujących w literaturze [2].

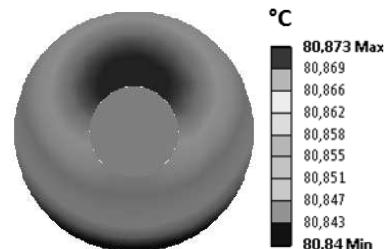
Oprogramowanie specjalistyczne ANSYS, wykorzystujące metodę elementów skończonych, umożliwia obliczenie szeregu wielkości termicznych i mechanicznych charakteryzujących stan przewodu. W dalszej części przedstawiono rozkłady temperatury, odkształcenia termicznego i naprężenia równoważnego von Mises'a.

3.2.1. Uprozczone odwzorowanie przewodu

W ramach analiz przeprowadzonych dla uproszczonego odwzorowania przewodu rozpatrzono cztery przypadki. Pierwszy z nich (bazowy) odpowiada normatywnym warunkom wymiany ciepła dla okresu letniego, podanych w tabelicy 1. Temperaturę maksymalną, zbliżoną do założonej temperatury projektowej równej 80°C, otrzymano dla natężenia prądu równego 541A. Kolejne dwa przypadki odpowiadają większym natężeniom prądu (600 A i 700A).

Czwarty wariant odnosi się do prądu 541A i prędkości wiatru 1,5m/s. W każdym z analizowanych wariantów otrzymano podobny obraz pola temperatury (dla wariantu podstawowego przedstawia go rysunek 4).

Maksymalne wartości temperatury występują w pobliżu rdzenia od strony nasłonecznionej. Jednakże gradienty temperatury są niewielkie. Wzrost prądu powoduje zwiększenie temperatury maksymalnej, odpowiednio do 91,7°C oraz 110°C.

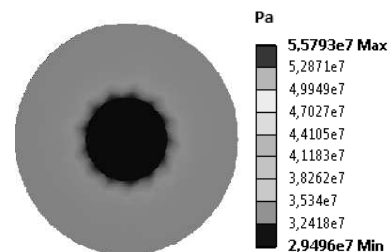


Rys. 4. Rozkład temperatury w przewodzie AFL-6 240 mm² dla warunków bazowych (odwzorowanie uproszczone)

Dla większej prędkości wiatru zaobserwowano jej spadek do 63,2°C. Z temperaturą przewodu związane jest jego odkształcenie termiczne. Dla wariantu podstawowego przedstawiono je na rysunku 5. Można zaobserwować, że gdyby przewód miał konstrukcję taką jak w odwzorowaniu uproszczonym, byłby niestabilny mechanicznie. Na rysunku 6 przedstawiono rozkład naprężeń równoważnych w przekroju przewodu.



Rys. 5. Odkształcenie termiczne przewodu AFL-6 240 mm² dla warunków bazowych (odwzorowanie uproszczone)



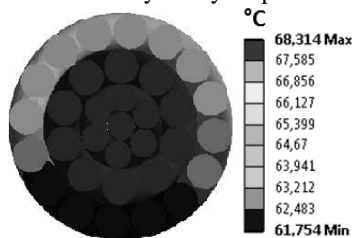
Rys. 6. Rozkład naprężeń równoważnych w przewodzie AFL-6 240 mm² dla warunków bazowych (odwzorowanie uproszczone)

Największe zagrożenie zniszczenia występuje na granicy rdzenia i oplotu. Wzrost temperatury powoduje wzrost naprężeń i odkształceń termicznych przewodu, zwiększając narażenie mechaniczne przewodu.

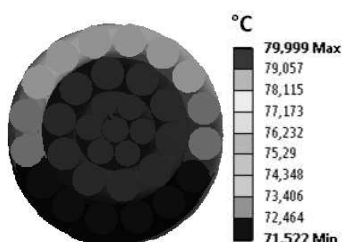
3.2.2. Odwzorowanie dokładne przewodu

Symulacja numeryczna dla odwzorowania dokładnego przewodu i warunków brzegowych, jak w wariacie pierwszym dla odwzorowania uproszczonego, dała w wyniku rozkład temperatur przedstawiony na rysunku 7. Otrzymano wartość temperatury maksymalnej równej 68,3°C oraz większy gradient temperatury. W tej sytuacji przyjęto jako podstawową wartość tablicową obciążalności

przewodu AFL-6240 mm² równą 630A. W wyniku obliczeń otrzymano pole temperatury przedstawione na rysunku 8. Jest ono zgodne z oczekiwaniami. Odwzorowanie uproszczone przewodu okazuje się niewystarczające, ponieważ model nie uwzględnia rozkładu temperatury w przekroju (za duże powierzchnie kontaktu) oraz za mało rozwinięta powierzchnia wymiany ciepła z otoczeniem.



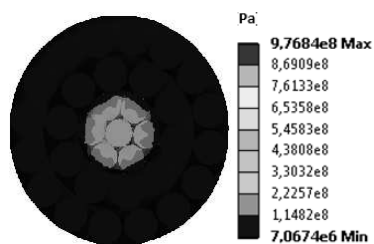
Rys. 7. Rozkład temperatury w przewodzie AFL-6 240 mm² dla odwzorowania dokładnego



Rys. 8. Rozkład temperatury w przewodzie AFL-6 240 mm² dla odwzorowania dokładnego



Rys. 9. Odształcenie termiczne przewodu AFL-6 240 mm² dla odwzorowania dokładnego



Rys. 10. Rozkład naprężeń równoważnych w przewodzie AFL-6 240 mm² dla odwzorowania dokładnego

Jako skutek otrzymane obciążalności zaniżone są o ok. 100A. Pozostałe rozpatrzone przypadki dotyczą prądów 700 A i 800 A oraz 630 A przy prędkości wiatru 1,5 m/s.

Otrzymane wartości maksymalne temperatury wynoszą odpowiednio 89,6°C, 104,8°C i 65°C. Rozkład odkształceń termicznych (rysunek 9) i naprężeń równoważnych (rys. 10) uzasadnia stosowanie tak złożonej konstrukcji przewodu. Pozwala ona skompensować skutki zastosowania materiałów o dwóch różnych współczynnikach rozszerzalności temperaturowej. Również maksymalne naprężenia mechaniczne są mniejsze i występują w obszarze rdzenia stalowego.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W ramach przeprowadzonych analiz rozważono trzy różne modele do oszacowania obciążalności prądowej przewodu. Sformułowano następujące wnioski:

- Metoda oparta na obliczeniach bilansowych pozwala stosunkowo szybko wyznaczyć obciążalność przewodu. Występują jednak rozbieżności spowodowane uproszczeniami w radialnym rozkładzie temperatury w przewodzie. Dla małych przekrojów występuje przeszacowanie prądu dopuszczalnego.
- Modele bazujące na metodzie elementów skończonych pozwalają wyznaczyć rozkłady temperatury i wielkości mechanicznych w przewodzie. Ich wadą są czasochłonne obliczenia.
- Dla dokładnego odwzorowania geometrii przewodu wyniki są zgodne z oczekiwaniami.
- Analizowane modele w praktyce eksploatacyjnej byłyby na tym etapie trudne do wykorzystania. Mogą jednak znaleźć zastosowanie w projektowaniu przewodów i linii elektroenergetycznych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines, CIGRÉ Brochure 601, December 2014
2. Morgan V. T.: Thermal Behaviour of Electrical Conductors. England, Research Studies Press LTD. 1991
3. Szpyra W., Nowak W., Tarko R., Kaczmarczyk A.: Wpływ warunków atmosferycznych na obciążalność prądową elektroenergetycznych linii napowietrznych, VI Konferencja Elektroenergetyczne Linie Napowietrzne, PTPiREE, Wisła 13 – 14 października 2015, s. 145 – 152.
4. Alternating Current (ac) Resistance of Helically Stranded Conductors, CIGRÉ Brochure 345, 2008
5. Praca zbiorowa: Poradnik Inżyniera Elektryka, WNT, Warszawa 2007
6. Informator Sieciowy Energoprojekt Kraków, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego WEMA, Warszawa 1977

MODELING AMPACITY OF THE CONDUCTORS OF THE OVERHEAD POWER LINES

As a result of growth in demand for electricity changes in power systems are required. Modernization of existing power lines and building new ones is essential. The alternative is application of dynamic thermal rating systems. Permissible current in this case is adjusted to actual atmospheric conditions. For determining ampacity in this way complex calculations are required. Mathematical modeling is used. In framework of the article three different models are considered. The first one is based on heat balance equation. In others two variants numerical calculations in ANSYS are applied. The difference between them is in complexity of geometry models. The most satisfactory results are obtained for numerical calculations and accurate geometry of conductor

Keywords: dynamic thermal rating, heat balance equation, numerical model of conductor.