

Marcin WESOŁOWSKI*
Ryszard NIEDBAŁA*
Daniel KUCHARSKI*
Jacek HAUSER**

MODELOWANIE OBCIĄŻALNOŚCI DŁUGOTRWAŁEJ KABLI W PRZEPUSTACH

W artykule scharakteryzowano podstawowe zagadnienia związane z wyznaczaniem na drodze obliczeniowej obciążalności długotrwałej kabli energetycznych umieszczonych w przepustach. Podano problemy klasycznego obwodowego podejścia do niniejszego zagadnienia, wynikające przede wszystkim z ograniczonych możliwości precyzyjnego odzwierciedlenia warunków roboczych. Podano podstawowe modele polowe oraz wpływ zwyczajowo przyjmowanych uproszczeń na jakość wyników symulacyjnych.

1. WPROWADZENIE

Dobór kabli w liniach elektroenergetycznych jest zagadnieniem niesłychanie istotnym, determinującym trwałość i niezawodność funkcjonowania linii energetycznych. Praktyka projektowa polega zazwyczaj na rozwiązywaniu modeli obwodowych. Dobór przewodów ze względu na obciążalność długotrwałą oraz przeciążalność często ogranicza się do analizy podstawowych przypadków generacji ciepła w warunkach odniesienia. Wpływ otoczenia linii kablowych oraz sposób prowadzenia i konfiguracja przewodów uwzględniany jest poprzez wprowadzenie dodatkowych współczynników korekcyjnych [3]. W większości przypadków tego typu podejście (najczęściej zgodne z obowiązującymi unormowaniami) pozwala na prawidłowy dobór przekroju i typu kabli energetycznych. Tym niemniej, ze względu na mnogość układów i warunków środowiskowych, wyniki obliczeń często przekładają się na niezbyt optymalny dobór średnic kabli energetycznych. W tych przypadkach, uzyskiwanie wyższych dokładności obliczeń wymaga stosowania technik precyzyjnego modelowania numerycznego.

Niniejsza praca dotyczy analizy wybranych aspektów obliczania długotrwałej obciążalności kabli elektroenergetycznych umieszczonych w przepustach prądowych. Celem pracy było wykazanie zasadniczej odmienności procesu obliczeniowego od typowej w tej dziedzinie praktyki. Obiektem prac analitycznych był model przepustu prądowego o narzuconych wymiarach

* Politechnika Warszawska.

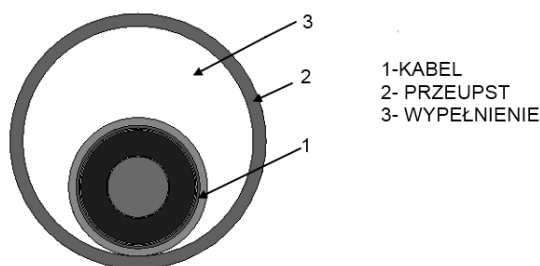
** Politechnika Poznańska.

poprzecznych, z umieszczonym wewnątrz kablem typu XRUHKXS-FIMT 1x1000RMC/120. Trudności w precyzyjnym rozwiązaniu zadania na drodze analitycznej wymusiły wykorzystanie modelowania numerycznego, przy założeniu wiernego opisu geometrii układu oraz modelu fizycznego. Wykazany został wpływ zwyczajowo przyjmowanych uproszczeń w postaci zakładania stałej gęstości źródeł ciepła oraz uproszczonego opisu zjawisk transportu ciepła w środowiskach płynnych, na szeroko rozumianą jakość wyników obliczeń.

2. MODELOWANIE OBIEKTU

2.1. Wstęp

Geometria analizowanego układu zawiera model kabla energetycznego typu XRUHKXS-FIMT 1x1000RMC/120, umieszczonego w przepuście rurowym SRS 160, wypełnionym powietrzem (rys. 1). Wartości parametrów cieplnych izolacji kabla przyjęto na podstawie danych literaturowych ([4], [5]).



Rys. 1. Przyjęty sposób ułożenia kabli oraz przepustów

Podstawowa geometria modelu (rys. 1) jak i warunki graniczne różniły się, w zależności od realizowanego etapu obliczeniowego. Spośród stosowanych modeli, wyróżnić można układy 2D i 3D. Wszystkie modele wykonane zostały w dwóch niezależnych systemach obliczeniowych oraz rozwiązywane według autorskich procedur obliczeniowych. Wyróżniono następujące etapy prowadzące do kompleksowego rozwiązania głównego celu pracy:

- określenie wpływu stosowanego wymuszenia na dokładność wyników obliczeniowych;
- określenie wpływu stosowanych uproszczeń na jakość i dokładność wyników obliczeniowych.

2.2. Analiza możliwości wykorzystywania stałej gęstości mocy grzejnej

Obliczenia elektro - cieplne wymagają we wszystkich przypadkach analizy sprzężonych pól elektromagnetycznych i cieplnych. Stopień sprzężenia jak i przyjmowane uproszczenia mogą w pewnych przypadkach nie być istotne ze

względu na cel prowadzonych prac. Przewodzenie ciepła w przypadku analizy problemów nagrzewania kabli energetycznych może zostać opisane zależnością (1).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + (\mathbf{w} \cdot \nabla)t = \frac{p_V}{c\rho} + \frac{1}{c\rho}[\nabla(\lambda \nabla t)] \quad (1)$$

Zależność ta, w odniesieniu do zagadnień obciążalności długotrwałej może zostać uproszczona, między innymi dzięki eliminacji konieczności analizy dla stanów niestacjonarnych. Tym niemniej, w ogólnym przypadku analizy efektów generacji ciepła związanych z grzejnictwem jest równanie różniczkowe pola we wsadzie, w układzie cylindrycznym (2) z rozwiązaniem w postaci funkcji Bessela pierwszego rodzaju zerowego rzędu [2].

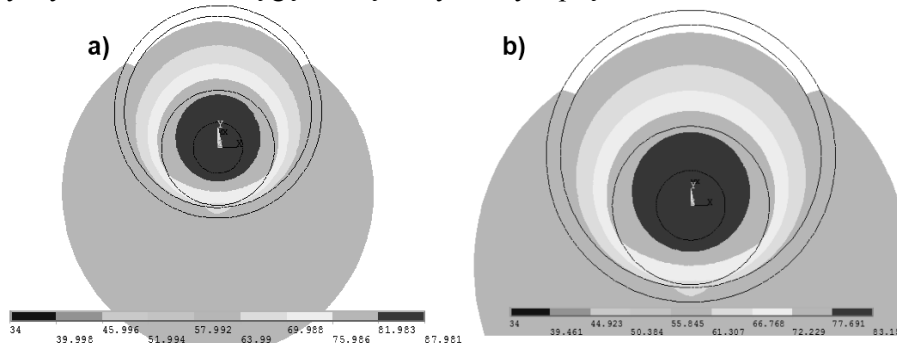
$$\frac{d^2 H_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_\varphi}{dr} = \alpha^2 H_\varphi \quad (2)$$

gdzie: $\alpha = [(I+j)/\delta]$ jest stałą zależną od częstotliwości pola i własności wsadu.

Warunki brzegowe w przyjętym rozwiązaniu formułuje się jako $H_{r=r_0} = \frac{I}{2\pi r_0}$

oraz $H_{r=0} = 0$.

Wstępna analiza zaprezentowana poniżej miała na celu dokonanie ilościowej oceny uproszczeń modeli numerycznych, wynikającej z przyjęcia stałej gęstości mocy w przekrojach poprzecznych żył roboczych. Przyjmowane uproszczenia są jednoznaczne z pominięciem efektów wypierania prądów, co zawsze odbiega od rozwiązania ścisłego. Na rysunku 2 zaprezentowano wyniki obliczeń cieplnych przy wymuszeniach stałą gęstością mocy i stałym prądem.



Rys. 2. Pola temperatury uzyskane na podstawie obliczeń przy stosowaniu zróżnicowanego zadawania wymuszeń. a) wymuszenie stałą wartością gęstości mocy; b) wymuszenie prądowe

Na podstawie wyników możliwe jest dokonanie oceny różnic wnoszonych przez stosowane uproszczenia w postaci zadawania stałej wartości objętościowej gęstości mocy, na rozkłady temperatury. Charakter uzyskanych w ramach obliczeń pól jest identyczny w obu przypadkach. Jednak maksymalne obliczone wartości różnią się o niemal 5 K, co jest wynikiem dopuszczalnym ze względu na

dokładność obliczeń. Analiza rozkładu temperatury wewnątrz żył roboczych dla obu analizowanych przypadków pozwala na stwierdzenie braku wpływu efektu naskórkowości na rozkład pola temperatury w kablu. Jednorodność gęstości mocy jest na poziomie 0.01 W/m^3 . Niewielkie różnice pomiędzy wynikami są skutkiem odmienności powierzchni poddanej procesowi dyskretyzacji w stosunku do rzeczywistej powierzchni przyjmowanej do wyznaczania objętościowej gęstości mocy.

2.3. Analiza wpływu ruchów konwekcyjnych

Zagadnienia związane z wymianą ciepła w środowiskach płynnych w niskich temperaturach wymagają zwykle analizy konwekcyjnej wymiany ciepła. Wymiana ciepła przez konwekcję w tego typu układach wymaga zastosowania szczególnych procedur obliczeniowych.

W ogólności rozwiązywanie zagadnień wymiany ciepła na drodze konwekcji wymaga rozpatrywania układu równań różniczkowych bilansu ilości substancji, pędu oraz energii, wraz z odpowiednimi warunkami jednoznaczności rozwiązania. Wykonanie tego typu analiz jest zwykle procesem skomplikowanym i czasochłonnym, przez co wykorzystuje się zazwyczaj możliwości uproszczonego opisu problematyki konwekcyjnej wymiany ciepła.

W przypadku rozpatrywania układów przepustów, których dotyczy niniejsza praca, wymiana ciepła zachodzi pomiędzy powierzchniami zlokalizowanymi w relatywnie niewielkiej odległości. Zamiast przeprowadzania pełnej analizy konwekcji ciepła, bardzo powszechne jest korzystanie z podstawowych zależności opisujących przewodzenie ciepła bez uwzględniania ruchów konwekcyjnych. Przybliżona analiza problematyki wymiany ciepła w tego typu układach pozwala na wyznaczenie oporu cieplnego szczeliny gazowej o szerokości δ i przewodności właściwej λ (3) [1].

$$W = \frac{1}{\alpha_{ot1} \cdot F} + \frac{\delta}{\lambda \cdot F} + \frac{1}{\alpha_{dt2} \cdot F} \quad (3)$$

gdzie: α_{ot1} - współczynnik odpływu ciepła od cieplejszej powierzchni; α_{dt2} - współczynnik dopływu ciepła do chłodniejszej powierzchni; F - powierzchnia przekroju szczeliny; λ - przewodność cieplna właściwa płynu w szczelinie.

Przy wyznaczaniu oporu szczelin gazowych, zwykle nie korzysta się z zależności (3), ze względu na trudności w wyznaczaniu współczynników α_{ot1} i α_{dt2} . W obliczeniach praktycznych często korzysta się z pojęcia oporu zastępczego, określonego wzorem (4)

$$W = \frac{\delta}{\lambda_e \cdot F} \quad (4)$$

Użyty symbol λ_e jest tzw. równoważną przewodnością cieplną właściwą. Wielkość tę określić można na podstawie zależności (5)

$$\lambda_e = \frac{\alpha_{ot1} \cdot \alpha_{dt2} \cdot \lambda \cdot \delta}{\lambda \cdot \alpha_{dt2} + \alpha_{ot1} \cdot \delta \cdot \alpha_{dt2} + \lambda \cdot \alpha_{ot1}} \quad (5)$$

W praktyce wielkość λ_e wyznacza się na podstawie równania kryterialnego, opisanego zależnością (6).

$$\frac{\lambda_e}{\lambda} = f(Ra) \quad (6)$$

Zależność kryterialna Rayleigha określona jest zależnością (7)

$$Ra = \frac{g \cdot \delta^3 \cdot \beta \cdot (t1 - t2)}{a \cdot \nu} \quad (7)$$

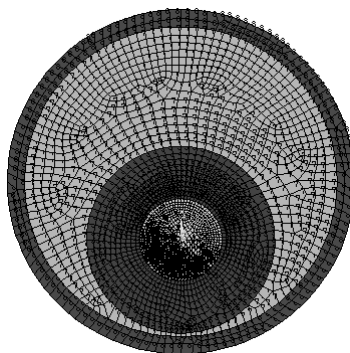
gdzie: g - przyspieszenie ziemskie; δ - wymiar charakterystyczny; $\beta = \frac{1}{273 + t_{ob}}$ - współczynnik rozszerzalności objętościowej powietrza; a – dyfuzyjność cieplna; ν - lepkość kinematyczna.

Przepływ ciepła w szczelinach pomiędzy powierzchniami ograniczającymi przepust prądowy oblicza się w taki sposób, jakby odbywał się jedynie przez przewodzenie. Nie operuje się rzeczywistą wartością przewodności cieplnej właściwej gazu, lecz określa równoważną przewodność cieplną.

W pracy dokonano oceny wpływu przyjętego modelu matematycznego wymiany ciepła w środowiskach płynnych (model pełny oraz uproszczony) na rozbieżność wyników pól temperatury, uzyskiwanych przy analizie przepustów prądowych wypełnionych powietrzem. Opracowano model (rys. 3) składający się z żyły roboczej, jednej warstwy izolacji o znamionowej przewodności cieplnej właściwej wynoszącej 1W/(mK) oraz stalowej obudowy przepustu. Pomiędzy zewnętrzną warstwą izolacji kabla a wewnętrzną powierzchnią obudowy przepustu widoczna jest warstwa powietrza. Przyjęto dwa warianty obliczeniowe, dla zróżnicowanych warunków brzegowych:

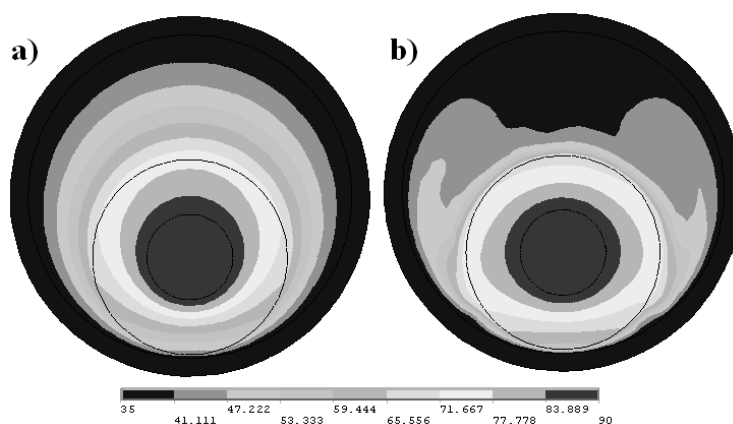
- I) przy zadanej wartości temperatury żyły (90°C) i zadanej wartości temperatury zewnętrznej przepustu (35°C);
- II) przy zadanej wartości mocy wydzielanej w żyłę (wartość odpowiadająca 1200A) oraz zadanej wartości temperatury zewnętrznej przepustu (35°C).

Wykonane obliczenia miały na celu określenie wpływu uproszczeń w rozpatrywaniu konwekcyjnej wymiany ciepła przy wykorzystywaniu zastępczych przewodności cieplnych właściwych w odniesieniu do obliczeń pełnych (sprężonych pól przepływowych oraz cieplnych). Na rysunku 4 pokazano uzyskane pola temperatury przy analizie uproszczonej (a) oraz pełnej (b) dla przypadku zadanych wartości temperatur (I).



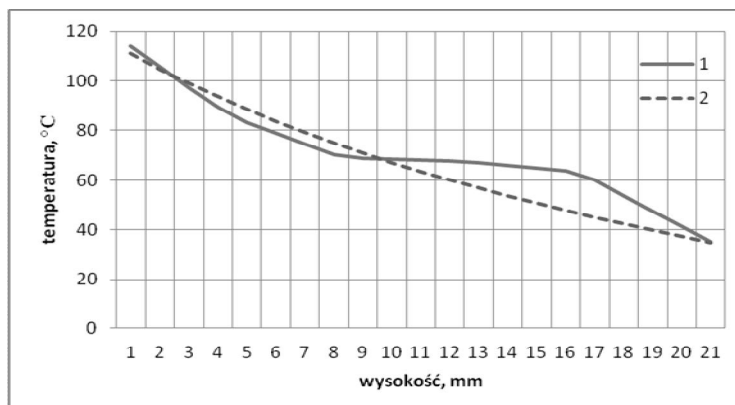
Rys. 3. Widok modelu do określania wpływu sposobu obliczania konwekcyjnej wymiany ciepła na jakość wyników

Z zaprezentowanych rezultatów widać nieco odmienny charakter rozkładu temperatury w przekroju modelu. Pełny model (rys. 4.a) odzwierciedla nieco gorsze warunki oddawania ciepła z powierzchni kabla grzejnego w stosunku do modelu uproszczonego. Tego typu wynik jest zgodny z oczekiwaniami. Relatywnie niewielkie prędkości przepływu płynu, nie przekraczające 0,12 m/s, świadczą o braku rozwiniętej konwekcji w rozpatrywanych przepustach prądowych.



Rys. 4. Pole temperatury przy analizie konwekcji z wykorzystaniem modelu zastępczego (a) oraz pełnego (b)

W celu dokonania oceny wpływu stosowanego modelu konwekcyjnej wymiany ciepła na wartości temperatur w przestrzeni kabli grzejnych, wykonano kolejne badania obliczeniowe przy stałej mocy wydzielanej w żyłach roboczych. Na rysunku 5 pokazano rozkłady temperatury w pionowej osi modelu w warstwie powietrza dla obu przypadków.



Rys. 5. Rozkład temperatury w warstwie powietrza w pionowej osi przepustu.
1- Model pełny konwekcji; 2- model uproszczony

Wyniki wskazują, że różnice w rezultatach otrzymywanych na podstawie pełnego oraz uproszczonego modelu konwekcyjnej wymiany ciepła są relatywnie niewielkie, zwłaszcza w obszarach istotnych z punktu widzenia charakterystyk obciążalności długotrwałej kabli energetycznych. Odmienny charakter rozkładu temperatury wewnątrz warstwy powietrza nie jest istotny i wynika z lokalizacji oporów przejścia pomiędzy powierzchniami ciała stałego i płynu dla modelu pełnego. Tym niemniej, temperatury na powierzchniach ograniczających szczelinę są niemal identyczne, co umożliwia korzystanie z zastępczych przewodności cieplnych dla analizy konwekcji w przepustach.

3. PODSUMOWANIE

Podstawowe wyniki realizacji pracy są następujące:

- Wykonano analizę możliwości zastosowania modeli numerycznych do określania obciążalności prądowej długotrwałej przepustów rurowych.
- Dokonano wyboru oraz określono wpływ modeli matematycznych na jakość i dokładność wyników modelowania numerycznego w przypadkach klasy, do której należy niniejszy temat.
- Opracowano szereg modeli, zarówno płaskich jak i przestrzennych, wiernie oddających warunki pracy linii kablowych w przepustach rurowych.
- Określono błędy modelowania wynikające z przyjęcia stałej gęstości mocy w przekroju żyły roboczej kabla.
- Wyznaczono błędy wynikające z uproszczonej analizy konwekcyjnej wymiany ciepła w obszarze przepustów prądowych wypełnionych medium płynnym.
- Wykazano celowość obliczeń numerycznych w przypadku projektowania linii kablowych, zwłaszcza w przypadkach odbiegających od typowych.

LITERATURA

- [1] Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy Elektrotermii i Techniki Światłnej. WPP. Poznań. 2006.
- [2] Niedbała R., Kucharski D., Wesołowski M.: Skutki Energetyczne Ekranowania Pola Magnetycznego. Przegląd Elektrotechniczny nr 2008/7. Sigma NOT. Warszawa 2008.
- [3] Niestępski S., Parol M., Pasternakiewicz J., Wiśniewski T.: Instalacje Elektryczne. Budowa, Projektowanie i Eksploatacja. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa. 2001.
- [4] Saechtling H.: Tworzywa sztuczne. Poradnik. Warszawa: WNT, 1999.
- [5] White M. A.: Properties of Materials. 1999, ISBN-10: 0195113314



Niniejsza praca jest współfinansowana przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt
„Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”.

MODELING OF THERMAL LOAD OF CABLE CONDUITS

The paper refers to the modelling and simulations problems that occur during designing of cable conduits. The basic requirements in such issues concentrate to the optimal determination of long-term load in cable conduits, as the function of cable diameter. Many of commonly used calculating procedures do not allow for an accurate account of real environmental parameters. In the article some aspects of precisely modelling of high voltage cable lines placed in conduits were described. The influence of commonly used simplifications of mathematical models, on calculating precision was shown.