

Przegląd metod modelowania przepływu ciepła w przewodach elektrycznych

Streszczenie. W artykule proszone zostały zagadnienia związane z metodami modelowania zjawiska wymiany ciepła pomiędzy otoczeniem, a przewodem elektrycznym podczas warunków termicznych przekraczających wartości dopuszczalne, dla powszechnie stosowanych niepalnych przewodów instalacyjnych o przekroju czynnym żył przewodu 2,5; 4; 6 mm²

Abstract. The article presents issues related to the methods of modeling the phenomenon of heat exchange between the environment and an electric conductor during thermal conditions exceeding the permissible values for commonly used non-flammable installation cables with a conductor cross-section of 2.5; 4; 6 mm². **Review of heat flow modeling methods in electric wires.**

Słowa kluczowe: temperatura, przewód elektryczny, funkcja błędu, krzywa temperaturowa

Keywords: temperature, electric wire, error function, temperature curve.

Wstęp

Punktem wyjścia we współczesnym modelowaniu procesów cieplnych jest wyznaczenie pól temperatury w ciałach o prostej konstrukcji (pręty, cylindry, kule, prostopadłości) i nieskomplikowanych warunkach granicznych: warunek początkowy (Cauchy'ego), warunki brzegowe (Dirichleta, Naumana, Fouriera, IV rodzaju). Warunki brzegowe określają procedury osiągania rozwiązań modelu. Metody analityczne wykorzystują w ograniczonym zakresie pewne algorytmy numeryczne, na przykład do obliczeń wartości funkcji specjalnych, w tym modelu wykorzystującym na przykład funkcję błędu $\text{erfc}(x,t)$. Modele analityczne traktują układ ciała stałego (przewód elektryczny) – otoczenie jako układ ciągły. Modele te jednak nie nadają się do modelowania przepływu ciepła w ciałach o złożonej geometrii. Jest to niedogodność, która wynika z ograniczonych możliwości opisu geometrii ciał, który może być użyty do obliczeń analitycznych. Skomplikowany opis analityczny znacznie wydłuża obliczenia i jest źródłem powstawania błędów obliczeń. Niedogodności tej pozbawione są modele numeryczne, które zakładają dyskretny charakter układu: ciało stałe – otoczenie. W modelach tych dyskretyzacji podlegają zmienne przestrzenne x (długość) i czas t . Dyskretyzację przeprowadza się przed opracowaniem modelu przy założeniu ciągłości czasowej i przestrzennej zmiennych. Budowane współcześnie numeryczne modele przepływu ciepła do obliczeń wykorzystują kilka metod numerycznych:

a) Metoda bilansów elementarnych (MBE), która polega na podzieleniu rozpatrywanej powierzchni na dostatecznie dużą liczbę części (elementów geometrycznych) i sporządzeniu bilansów energii dla tych elementów [7],

- b) Metoda różnic skończonych (MRS), zastępująca ilorazami różnicowymi pochodne występujące w równaniach przewodnictwa cieplnego [5],
- c) Metoda elementów skończonych (MES), która zakłada podział rozpatrywanej powierzchni na elementy geometryczne i utworzeniu punktów węzłowych, w których przebieg temperatury aproksymuje się za pomocą funkcji próbnej, określonej skończoną sumą tzw. funkcją kształtu [1],
- d) Metoda elementów brzegowych (MEB), która opiera się na podziale różnicowym powierzchni ciała. Punkty węzłowe występują tylko na powierzchni ciała, a obliczany w nich rozkład temperatury dotyczy tylko powierzchni ciała [11].

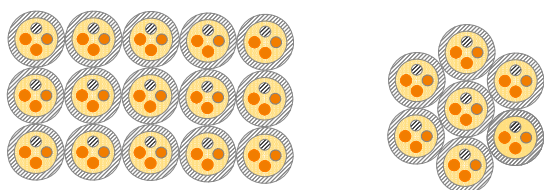
Metody dyskretne pozwalają uzyskać przybliżone rozwiązania równań przewodnictwa. Metodyka obliczeń zakłada podział powierzchni ciała na n elementów geometrycznych (dyskretnych), w których badana temperatura reprezentowana jest przez jej wartość wewnątrz tego elementu, w tym także w jego środku (węzle siatki). Część elementów, która zlokalizowana jest wewnątrz obiektu określa się, jako elementy wewnętrzne, a reszta tworząca brzeg elementu jako elementy brzegowe. Element, dla którego przypisano równanie bilansowe jest elementem bilansowym (centralnym). Wszystkie elementy dyskretne modelu można przypisać do grup elementów o takich samych strukturach równań bilansowych. W elementach wewnętrznych równania bilansowe mają powtarzalną strukturę, natomiast w elementach brzegowych równania te mają bardziej zróżnicowaną postać zależną od położenia elementu na brzegu obiektu i rodzaju założonych na nim warunków brzegowych.

Metody numeryczne, choć umożliwiają rozwiązywanie modelowania przepływów strumienia ciepła nawet poprzez bardziej złożone geometrycznie ciała, są jednak drogimi narzędziami obliczeniowymi co znacznie ogranicza ich dostępność i powszechne stosowanie.

Przepływ strumienia ciepła w przewodach jest złożonym zjawiskiem fizycznym, które decyduje o właściwościach użytkowych i trwałości eksploatacyjnej przewodów. Badania nad tą tematyką dostępne w literaturze koncentrują się głównie na modelowaniu termicznych skutków przepływu prądu elektrycznego [12], [14], [15].

W modelach tych do określenia profilu temperaturowego przewodu wykorzystywane jest prawo Fouriera [16] lub prawo Joule'a-Lenza [17].

Modele zakładają jednakową temperaturę przewodu wzdłuż całej jego długości. Są to modele, w których temperatura przewodu zależy od czasu i wartości przepływającego prądu. Straty ciepła do otoczenia według tych modeli traktowane są jako globalne, bez określania poszczególnych składników w bilansie strat. Algorytmy obliczeniowe tych modeli wykorzystują metodę elementów skończonych (MES) oraz zakładają stacjonarne warunki przepływu prądu elektrycznego w przewodach ułożonych: pojedynczo wielowarstwowo lub w wiązce [2], [17], co przedstawia rysunek 1. Dla podobnych warunków przepływu prądu w pracach zaproponowany został model termiczny przewodu oparty na wyznaczonych doświadczalnie stałych czasowych nagrzewania, które dla badanych przewodów instalacyjnych są małe i wynoszą poniżej 2 minut. Obliczenia dotyczyły kabli i przewodów w izolacji palnej PCV lub gumowej.



Rys. 1. Sposoby ułożenia przewodów do badań temperaturowych

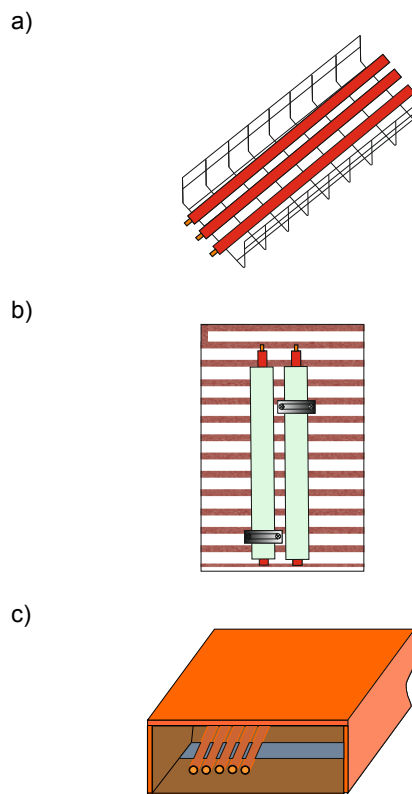
Znane modele nagrzewania się drutów topikowych bezpieczników [3] oraz aparatów elektrycznych takich jak styczniki i przełączniki [3], a także półprzewodniki [6], [8], [13] również mogą być wykorzystywane do opisu nagrzewania przewodów elektrycznych o małych długościach, których gradient temperatury na końcach przewodu był mały, a przepływ prądu zbliżony do warunków stacjonarnych.

Zastosowanie nieelementarnej funkcji błędu $erfc(x,t)$ do opisu nagrzewania przewodu elektrycznego, pozwala na określenie temperatury przewodu w funkcji czasu trwania wymuszenia oraz odległości od źródła ciepła. Model wykorzystujący funkcję $erfc(x,t)$ jest kompilacją rozwiązania równania linii długiej znanej w elektrotechnice, jako linia Thomsona - Kelwina i znanych w fizyce analogii ciepło-elektrycznych, a także parametrów rozłożonych opisujących przewód elektryczny schematem zastępczym linii długiej. Wyniki badań eksperymentalnych, porównane z wynikami uzyskanymi z symulacji dają zbliżone wartości co sugeruje dobrą dokładność obliczeń. Metoda wykorzystująca parametry rozłożone [4], ze względu na użycie powszechnie dostępnych narzędzi obliczeniowych wspartych oprogramowaniem symulacyjnym Matlab i Simulink ma duży potencjał realizacji w praktycznych zastosowaniach do opisu procesu nagrzewania przewodów elektrycznych od temperatury otoczenia.

Prace badawcze nad odpornością ogniową obiektów budowlanych przyczyniły się do poszukiwania metod modelowania przepływu ciepła przez przewody wewnętrznych przeciwpożarowych instalacji elektrycznych.

Rodzaj konstrukcji nośnej przewodów jest głównym czynnikiem wpływającym na odporność ogniową instalacji elektrycznej oraz ma wpływ na szybkość absorpcji ciepła z przestrzeni objętej polem temperaturowym pożaru oraz na intensywność oddawania ciepła do otoczenia poza tą przestrzeń. Stosowane obecnie konstrukcje nośne przeciwpożarowych przewodów elektrycznych występują w postaci (Rys.2.):

- zabudowy w otwartym korycie kablowym (w tym zabudowa natynkowa),
- zabudowy w izolacji termicznej,
- zabudowy w kanale kablowym.

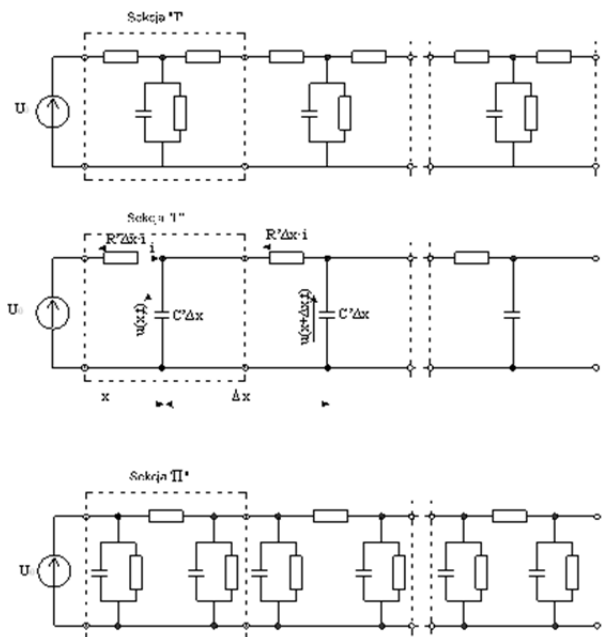


Rys.2. Rodzaje zabudowy przewodów instalacyjnych przeciwpożarowych: a – otwarte koryto, b – izolacja termiczna, c – kanał kablowy

Inne podejście do modelowania procesów cieplnych w przewodach elektrycznych zaproponowane zostało w pracach [9], [11]. Autorzy zaproponowali metodę analogii ciepło-elektrycznej w procesie nagrzewania układów mechanicznych. Modele te są dokładniejsze i bardziej praktyczne, mogą być zastosowane do badania rozkładu temperatury przewodu, uwzględniają i rozróżniają składniki strat cieplnych występujących wzdłuż przewodu. Metoda analogii ciepło-elektrycznych pozwala modelować złożony proces cieplny przy wykorzystaniu elementów skupionych układów elektrycznych R, C. W opisie matematycznym temperaturę zastąpiono napięciem elektrycznym U, opór cieplny przewodnika (strata podłużna) jest zastępowany rezystancją elektryczną przewodu R, a pojemność cieplna izolacji (strata poprzeczna nagrzewania izolacji) zastępowana jest pojemnością elektryczną przewodu C. Przewód elektryczny przedstawiony jest zastępczo jako czwórnik RC w różnych konfiguracjach połączeń (typ L, Π, Γ, T) przedstawiający przepływ ciepła w przewodzie i straty do otoczenia co przedstawia rysunek 3.

Do celów inżynierskich związanych z projektowaniem linii zasilających urządzenia przeciwpożarowe opracowana została norma opisująca metodyką dobierania przewodów do zasilania urządzeń przeciwpożarowych, w której całkowita długość przewodu została podzielona na dwie strefy: gorącą i zimną (Rys. 4.) [17].

Przewód w strefie nieobjętej pożarem znajduje się pod działaniem temperatury otoczenia lub w skrajnym przypadku temperatury dopuszczalnej długotrwale spowodowanej przepływem prądu o wartości dopuszczalnej długotrwale. Wpływ temperatury pożaru na rezystancję przewodu określa się współczynnikiem wzrostu rezystancji żył przewodzących k_R .

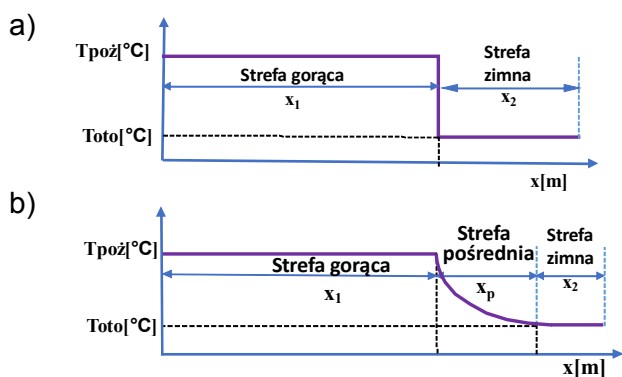


Rys.3. Konfiguracje połączeń czwórników RC używane w modelach cieplnych przewodów

Tabela 1. Współczynniki wzrostu rezystancji żył przewodów w warunkach pożaru [17].

Względny udział strefy gorącej w długości trasy przewodu (kabla) [%]	Współczynnik wzrostu żył rezystancji przewodu Dla warunków klasy E30	
	od 30°C	od 90°C
0	1,0	1,0
10	1,3	1,2
20	1,6	1,5
30	2,0	1,7
40	2,3	1,9
50	2,6	2,1
60	2,9	2,4
70	3,2	2,6
80	3,5	2,8
90	3,9	3,1
100	4,2	3,3

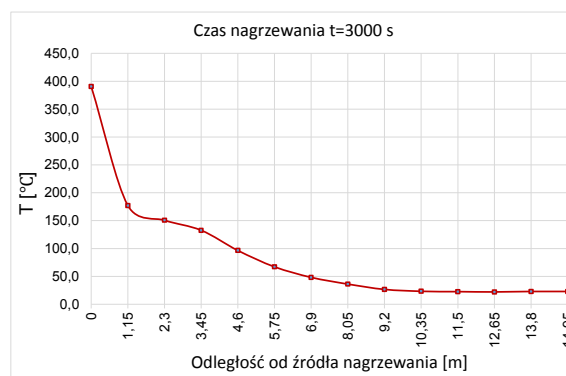
W normie DIN 41021 podano wartości współczynników k_R dla różnych procentowych udziałów strefy gorącej w całkowitej długości przewodu (Tabela 1). Otrzymane wyniki uwzględniają przybliżone oszacowanie długości strefy gorącej i obliczenie względnej wartości długości przewodu, który z największym prawdopodobieństwem znajdzie się w strefie gorącej.



Rys.4. Podział przewodu na strefy termiczne: a – przyjęty w normie; b- rzeczywisty

Dla wymaganego w normie czasu funkcjonowania przewodu w czasie pożaru można obliczyć spodziewany wzrost rezystancji jako sumę arytmetyczną rezystancji odcinka zakwalifikowanego do strefy gorącej oraz rezystancji odcinka przewodu zakwalifikowanego do strefy zimnej. Rezystancja ta będzie zawsze większa od rezystancji odniesionej do normalnych warunków pracy rozpatrywanego odcinka przewodu. Przyjęta w normie metodologia nie zakłada istnienia strefy pośredniej, w której przewód na pewnej długości osiąga temperaturę znacznie przekraczającą wartości dopuszczalne. Nie daje to pełnego obrazu profilu temperaturowego przewodu, a więc do modelowania nagrzewania przeciwpożarowych instalacyjnych bezholgenowych przewodów elektrycznych jest to założenie niewystarczające.

Przebieg krzywej temperaturowej przewodu (n)HXH wyznaczony doświadczalnie został przedstawiony na rysunku 5 [9]. Badany przewód o przekroju $2,5 \text{ mm}^2$ zabudowany został w zamkniętym kanale kablowym w postaci rurki wykonanej z MgO o średnicy wewnętrznej 28mm. Źródłem ciepła była komora grzewcza o długości 1 metra, w której uzyskana została temperatura około 400°C .



Rys.5. Krzywa temperaturowa w strefie pośredniej wyznaczona doświadczalnie

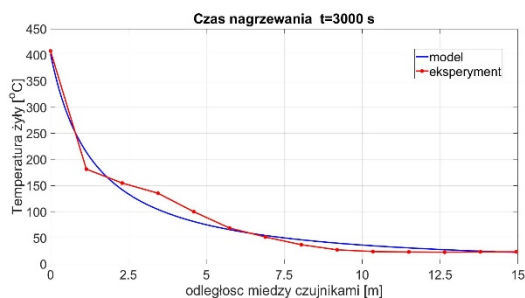
Przy stałej wartości wymuszenia nagrzewania żył, temperatura wzdłuż osi podłużnej przewodu jest funkcją malejącą. Wyniki dla kolejnych punktów pomiarowych w stanie ustalonym pokazują, że zmiana temperatury po długości przewodu ma charakter zbliżony do wykładniczego tłumienia sygnału. Przebieg rozkładu temperatury możemy opisać analitycznie jako odpowiedź układu inercyjnego rzeczywistego pierwszego rzędu na zakłócenie impulsowe. Oznaczając wymuszenie temperaturowe przez $x(t)$, a odpowiedź (rozkład temperatury wzdłuż przewodu $y(t)$), układ opisuje równanie

$$(1) T \frac{dy}{dt} + y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$$

Po przejściu do dziedziny operatorowej i zastosowaniu odwrotnego przekształcenia Laplace'a otrzymujemy równanie modelu przebiegu krzywej temperaturowej teoretycznej w strefie pośredniej przewodu.

$$(2) y(t) = \alpha^{-1} [y(s)] = \frac{k}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

W celu określenia zmiany rozkładu temperatury na podstawie danych doświadczalnych, dla wybranej chwili czasowej rzeczywisty rozkład temperatury został poddany aproksymacji funkcją wykładniczą przy użyciu klasycznej metody najmniejszych kwadratów (Rys. 6).



Rys.6. Krzywa temperaturowa w strefie pośredniej wyznaczona doświadczalnie i z aproksymacji

Spadek temperatury wzdłuż przewodu jest skutkiem:

- oporu cieplnego żył przewodzących przewodu,
- pojemności cieplnej warstw izolacyjnych przewodu,
- stratami ciepła do otoczenia przewodu.

Do opisu dynamiki spadku krzywej temperaturowej można zastosować stałą czasową τ chłodzenia przewodu, która występuje w równaniu 2. Wyznaczenie wartości τ można przeprowadzić graficznie lub analitycznie [10].

Podsumowanie

Przedstawione metody opisu procesu nagrzewania i przewodzenia ciepła w przewodach elektrycznych pozwalają na oszacowanie wartości temperatury przewodu w zależności od czasu nagrzewania i odległości od źródła ciepła.

Przedstawiono wyniki z przeprowadzonych prób eksperymentalnych oraz poddano je analizie. Nagrzewanie przewodów elektrycznych w komorze pieca symulowało warunki pożarowe. Badanie polegało na nagraniu komory pieca do maksymalnej możliwej do uzyskania temperatury i umieszczeniu w niej przewodu elektrycznego. Przepływ strumienia ciepła wzdłuż miedzianej żyły przewodzącej powodował ich nagrzewanie. Wyniki pomiarów temperatury żyły wzdłuż długości przewodu pozwalały na pokazanie procesu nagrzewania się przewodów elektrycznych np. podczas pożarów, nie tylko w strefie objętej bezpośrednim oddziaływaniem temperatury, ale także w wyniku przewodzenia ciepła przez przewody elektryczne. Uzyskane wyniki badań posłużą do opracowanie modelu przewodzenia ciepła przez przewody elektryczne w stanie bezprądowym.

Autor: dr inż. Bogdan Perka, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: bogdan.perka@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Al.-Saud M. S., El-Kady M. A., Findlay R. D.: A Novel Finite-Element Optimization Algorithm with Applications to Power Cable Thermal Circuit Design. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [2] Klimczak T., Paś J.: Reliability and Operating Analysis of Transmission of Alarm Signals of Distributed Fire Signaling System. Journal of KONBiN 49, 2019.
- [3] Kulas S., Supronowicz H., Suproniuk M., Michta K.: Koncepcja jednofazowego łącznika hybrydowego do zastosowań energetycznych, 1/2016, str. 37-40.
- [4] Kački E.: Równania różniczkowe cząstkowe w zagadnieniach techniki i fizyki, WNT 1987.
- [5] Lin S., Hu W.: Theoretical research on temperature field of power cable joint with FEM. 2012 International Conference on System Science and Engineering, Dalian, China, 2012.
- [6] Majda-Zdanczewicz E., Suproniuk M., Pawłowski M., Wierzbowski M.: Current state of photoconductive semiconductor switch engineering, Opto-electronics Review 2/2018, page 92-102.
- [7] Oh M., Pantelidest C. C.: A modeling and simulation language for combined lumped and distributed parameters system. Computers Chem. Engineering, Vol. 20, No 6/7, 1996.
- [8] Pawłowski M., Suproniuk M.: Błąd adekwatności modelu obrazowania struktury defektowej półprzewodników wysokorezystywnych badanej metodą niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej, Przegląd Elektrotechniczny 10/2011, str. 230.
- [9] Perka B., Piwowarski K.: Modelowanie nagrzewania przewodów elektrycznych w warunkach pożarowych z wykorzystaniem parametrów rozłożonych, Przegląd Elektrotechniczny 12/2020, str 103-106.
- [10] Skibko Z.: Ciepła stała czasowa parametrem umożliwiającym pełne wykorzystanie obciążalności prądowej przewodu. Przegląd Elektrotechniczny 10/2009.
- [11] Soulier F., Langonotte P.: Modeling distributed parameter systems with discrete element network. 15th International Symposium on the Mathematical Theory of Networks and Systems, 2002.
- [12] Suproniuk M., Kaminski P., Kozłowski R., Pawłowski M., Wierzbowski M.: Current status of modelling the semi-insulating 4H-SiC transient photoconductivity for application to photoconductive switches, Opto-electronics Review 3/2017, page 171-180.
- [13] Suproniuk M., Kaminski P., Pawłowski M., Kozłowski R., Pawłowski M.: Baza wiedzy w inteligentnym systemie pomiarowym do badania centrów defektowych w półprzewodnikowych materiałach półizolujących, Przegląd Elektrotechniczny 12/2010, str. 247.
- [14] Suproniuk M., Pawłowski M., Wierzbowski M., Majda-Zdanczewicz E., Pawłowski M.: Comparison of methods applied in photoinduced transient spectroscopy to determining the defect center parameters: The correlation procedure and the signal analysis based on inverse Laplace transformation, Review of Scientific Instruments 2018, Volume 89, Issue 4.
- [15] Szczegielniak T.: Analityczne wyznaczanie temperatury w jednobiegunowym torze wieloprądowym, Przegląd Elektrotechniczny 8/2018, str. 124.
- [16] Wesółowski M., Skrzypczak P., Hauser J.: Parametry cieplne wpływające na dokładność modelowania procesu nagrzewania indukcyjnego, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2016.
- [17] Wiatr J.: Ochrona przeciwpożarowa kabli i przewodów. Elektro.Info 4/2008, 2008.