Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Instytut Systemów Elektronicznych (1),

doi:10.15199/48.2023.01.40

Określenie wpływu konstrukcji zabudowy na nagrzewanie bezhalogenkowych przewodów elektrycznych.

Streszczenie. Artykuł opisuje badania zjawisk wymiany ciepła pomiędzy otoczeniem, a przewodem elektrycznym podczas warunków termicznych przekraczających wartości dopuszczalne, dla powszechnie stosowanych przewodów elektrycznych niepalnych. Podjęto próbę wyznaczenia podstawowych parametrów cieplnofizycznych dla przewodu elektrycznego jako jednego układu fizycznego złożonego z żyły przewodzącej, izolacji żyły, izolacji zewnętrznej przewodu. Do budowy modelu przewodzenia ciepła przez przewód elektryczny, wykorzystane zostały dane pomiarowe uzyskane z zaprojektowanego eksperymentu dla trzech przypadków zabudowy przewodu: w otwartym korycie kablowym, w izolacji termicznej (PUR) oraz w zamkniętym kanale kablowym (light concrete). Do zamodelowania przepływu ciepła wykorzystano metodę analogii układów cieplnych i elektrycznych. Model matematyczny jest równaniem linii długiej (linia Kelwina – Thompsona) opisana parametrami rozproszonymi co stanowi własny wkład naukowy autorów w badanie zjawisk cieplnych w przewodach elektrycznych.

Abstract. The article describes the study of the heat exchange phenomena between the environment and the electric conductor during thermal conditions exceeding the permissible values for commonly used non-flammable electric cables. An attempt was made to determine the basic thermophysical parameters for an electric conductor as one physical system consisting of a conductor, conductor insulation, and outer insulation of the conductor. To build a model of heat conduction through an electric cable, the measurement data obtained from the designed experiment for three cases of cable installation were used: in an open cable tray, in thermal insulation (PUR) and in a closed cable channel (light concrete). The method of analogy of thermal and electrical systems was used to model the heat flow. The mathematical model is an equation of a long line (Kelvin - Thompson line) described with dispersed parameters, which is the authors' own scientific contribution to the study of thermal phenomena in electrical cables (Determination of the influence of the building structure on the heating of halogen-free electric cables.

Słowa kluczowe: temperatura, przewód elektryczny, przewodność elektryczna, rezystancja, urządzenia przeciwpożarowe. **Keywords**: temperature, electric wire, electric conductivity, resistance, fire fighting equipment.

Wstęp

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

Do modelowania przepływu ciepła wykorzystano metodę analogii układów cieplnych i elektrycznych. Model matematyczny nagrzewania przewodów elektrycznych bezhalogenkowych wykorzystujący analogie cieplno – elektryczne jest równaniem o parametrach rozłożonych Kelwina – Thomsona opisującym linię długą. Jest to nowy sposób modelowania nagrzewania przewodów elektrycznych co stanowi własny wkład naukowy autorów w badanie zjawisk cieplnych w przewodach elektrycznych.

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

- a) zabudowy w otwartym korycie kablowym,
- b) zabudowy w izolacji termicznej,
- c) zabudowy w kanale kablowym.

Przepływ strumienia ciepła w przewodach jest złożonym zjawiskiem fizycznym, które decyduje o własnościach użytkowych i trwałości eksploatacyjnej przewodów. Badania nad tą tematyką dostępne w literaturze koncentrują się głównie na modelowaniu termicznych skutków przepływu prądu elektrycznego. W modelach tych do określenia profilu temperaturowego przewodu wykorzystywane jest prawo Fouriera lub prawo Joule'a – Lenza. Modele te 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.

Model symulacyjny nagrzewania przewodów

Spotykane w literaturze algorytmy obliczeniowe modeli wykorzystują metodę elementów skończonych (MES) oraz zakładają stacjonarne warunki przepływu prądu elektrycznego przez przewody ułożone pojedynczo, wielowarstwowo lub w wiązce. Dla podobnych warunków przepływu prądu w pracach [1] 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 dotyczą kabli i przewodów w izolacji palnej PCV lub gumowej.

Ponadto w pracach [1], [2] przestawione zostały modele nagrzewania się drutów topikowych bezpieczników oraz aparatów elektrycznych takich jak styczniki i przekaźniki, Według przyjętych założeń modele te mogą być wykorzystywane także dla przewodów elektrycznych o małych długościach, których gradient temperatury na końcach przewodu był mały, a przepływ prądu zbliżony do warunków stacjonarnych.

Przedstawione w artykule wyniki z pomiarów nagrzewania przewodów posłużyły do opracowania modelu symulacyjnego. Model ten są dokładniejszy i bardziej praktyczny do badania rozkładu temperatury przewodu, składniki uwzględnia i rozróżnia strat cieplnych występujących wzdłuż przewodu. Wykorzystana metoda analogii cieplno - 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 i podobnie pojemność cieplna izolacji (strata poprzeczna nagrzewania izolacji) zastępowana jest pojemnością przewodu C. Przewód elektryczną elektryczny przedstawiony jest zastępczo jako czwórnik RC w różnych konfiguracjach połączeń (typ L, П, Г, Т) reprezentujących przepływ ciepła w przewodzie i straty do otoczenia.

Opracowana do celów inżynierskich norma związana z projektowaniem linii zasilających urządzenia dobierania przeciwpożarowe przedstawia metodykę przewodów do zasilania urządzeń przeciwpożarowych, w której całkowita długość przewodu została podzielana na dwie strefy: gorącą i zimną. 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 określa temperatury pożaru na przewody sie współczynnikiem wzrostu rezystancji żył przewodzących k_R. W normie podane są wartości współczynników k_R dla różnych procentowych udziałów strefy gorącej w całkowitej długości przewodu. Otrzymane wyniki uwzględniają przybliżone oszacowanie długości strefy gorącej i obliczenie względnej wartości długości przewodu, który z największym prawdopodobieństwem znajdzie się strefie gorącej. Dla wymaganego w normie czasu funkcjonowania przewodu 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. W normie nie uwzględnia się także wpływu sposobu zabudowy przewodu. Nie daje to pełnego obrazu profilu temperaturowego nagrzewanego przewodu, a więc do modelowania nagrzewania przeciwpożarowych instalacyjnych bezholgenkowych przewodów elektrycznych założenia przyjęte w normie są niewystarczające.

Do opisu matematycznego Autorzy wykorzystali równanie telegrafistów opisujące linie długą, którego rozwiązaniem przy założeniu braku indukcyjności oraz przewodności poprzecznej linii jest równanie modelowe zwane równaniem kabla Thomsona [3]. Model ten jest dwuwymiarowy o parametrach zależnych od czasu t i położenia x, a wymuszeniem jest zewnętrzne źródło ciepła. Rozwiązaniem graficznym równania modelowego jest krzywych temperaturowych przebiegu rodzina 0 wykładniczym malejącym wraz z rosnącą odległością od przedstawia profil źródła ciepła. Każda krzywa temperaturowy przewodu dla kolejnych wartości czasu nagrzewania. Stosując analogię cieplno – elektryczną równaniem kabla Thomsona można modelować proces nagrzewania przewodu. Metoda analogii cieplno elektrycznej pozwala na modelowanie wolnozmiennych procesów termicznych, elementami o parametrach skupionych [4]. Wykorzystanie rozwiązania równania telegrafistów dla linii elektrycznej Thomsona, pozwoli na uzyskanie pełnego i dokładnego profilu temperaturowego przewodu elektrycznego znajdującego się w warunkach termicznych pożaru.

Model nagrzewania i przewodzenia ciepła w przewodzie elektrycznym został opracowany według następującego schematu:

Opracowywany na potrzeby badań model ma złożoną strukturę, a specyfika zjawisk związanych z procesami cieplnymi wymusza opis matematyczny, w którym zawarte są równania różniczkowe. Układ cieplny przewodu można wtedy przedstawić jako czwórnik elektryczny złożony z elementów RC. Opór cieplny przewodu jest modelowany rezystancją R, a poprzeczne straty ciepła pojemność C.

Analogię linii Thomsona-Kelwina do układu cieplnego można wyrazić za pomocą łańcucha czwórników RC przestawionego na rysunku 2. Analiza rozkładu napięć oraz rozpływu prądów w przedstawionych układach pozwala na sformułowanie równań opisujących linię długą.



Rys.1. Schemat budowania modelu nagrzewania przewodów.



Rys.2. Zastosowanie prawa Kirchhofa do fragmentu linii długiej.

Zgodnie z II prawem Kirchoffa dla schematu przedstawionego na rysunku 2 można zapisać

$$u(x,t) - R \Delta x \cdot i(x,t) - L \Delta x \quad \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} - u(x + \Delta x,t) = 0$$

Dla węzła 2 zgodnie z I prawem Kirchoffa otrzymujemy

$$i(x,t) - G \Delta x u(x,t) - C \Delta x \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - i(x + \Delta x,t) = 0$$

Rozwiązaniem równania napięciowego przy założeniu, że L=G=0 jest równanie linii Thomsona – Kelwina przedstawiające przebieg napięcia w linii długiej jednostronnie ograniczonej przy skokowym załączeniu napięcia stałego U_0 .

$$u(x,t) = U_0 \cdot erfc\left(\frac{x}{2}\sqrt{\frac{RC}{t}}\right)$$

gdzie: U₀ – napięcie wymuszenia ; x – odległość od źródła wymuszenia; R – rezystancja elektryczna linii; C – pojemność elektryczna linii; t – czas odziaływania wymuszenia U0

Przebieg napięcia u(x,t), które odwzorowuje temperaturę żyły przewodu przedstawia rysunek 3. Odległości czujników pomiarowych w modelu matematycznym reprezentują odległości od źródła ciepła *x*.

Nagrzewanie przewodów elektrycznych w komorze pieca symulowało warunki pożarowe. Badanie polegało na nagrzaniu komory pieca do maksymalnej możliwej do uzyskania temperatury i umieszczeniu w niej przewodu elektrycznego. Profile temperaturowe przewodów dla trzech sposobów montażu, po 120 min nagrzewania przedstawione są rysunku 4.



Rys.3. Symulacja przebiegu temperatury w przewodzie.

Analiza wyników badań eksperymentalnych

Wyniki pomiarów temperatury żyły wzdłuż długości przewodu odwzorowują proces 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 pozwalały na określenie wartości parametrów R i C w modelu przewodzenia ciepła w zależności od sposobu montażu przewodów.

Analiza profili temperaturowych badanych przewodów pozwala na zebranie kilku wniosków dotyczących badanych sposobów zabudowy przeciwpożarowych linii zasilających:

 a) przewody w otwartej zabudowie posiadają krótką strefę przejściową w polu temperaturowym, czyli szybko się schładzają,

b) przewody w izolacji cieplnej wolniej się nagrzewają, ale po nagrzaniu występuje w nich dłuższa strefa przejściowa w polu temperaturowym,

c) przewody w zabudowie kanałowej nagrzewają się najdłużej, ale po nagrzaniu obudowy kanału, występuje w nich najdłuższa strefa przejściowa, która ze względu na dużą pojemność cieplną obudowy kanału utrzymuje się przez czas znacznie dłuższy niż w poprzednich przypadkach.

 d) przewody w zabudowie kanałowej są jednak mniej narażone na uszkodzenia mechaniczne oraz bezpośrednie oddziaływanie ognia w strefie gorącej, co ma wpływ na ich odporność pożarową.

Do badań użyty został przewód typu (N)HXH 3x 6mm² FE180 PH90/E90 0,6/1kV, który jest niepalny i posiada izolację elektryczną z tworzyw bezhalogenowych nierozprzestrzeniających płomienia (HFFR- halogen – free flame retardant). Przewód przeznaczony jest do stosowania w instalacjach, gdzie wymagane jest zapewnienie bezpieczeństwa ludzi i wyposażenia ze szczególnym uwzględnieniem instalacji przeciwpożarowych. Czas nagrzewania wynosił 120 minut, a zadana temperatura wymuszenia nagrzewania w komorze wynosiła 400°C.





Rys.4. Profile temperaturowe przewodów po 120 minutach nagrzewania: a) zabudowa na otwartym korycie kablowym; b) zabudowa izolowana cieplnie; c) zabudowa w kanale kablowym.

Wartość zadana temperatury w komorze pieca została ustalona po przeprowadzeniu wstępnych prób wygrzewania komory grzewczej. Podczas prób osiągnięto maksymalną temperaturę 409°C. Czas próbkowania w pomiarze temperatury wynosił 2 sekundy. W czasie badania uzyskano z każdej termopary 3365 wyników pomiarów temperatury. Rejestrator w trybie on-line rejestrował wyniki w formie wykresu płynącego oraz pliku tekstowego zapisywanego w pamięci wewnętrznej.

Wymuszenie temperaturowe w każdym przypadku było na zbliżonym poziomie wynoszącym około 400°C. Różnice w rozkładzie temperatury dla poszczególnych przekrojów w tym samym rodzaju zabudowy nie są znaczące, najszybciej nagrzewa się przewód o najmniejszym z badanych przekrojów (2,5 mm²) i najszybciej się też wychładza w zależności od odległości od źródła ciepła. Spowodowane jest to najmniejszą pojemnością cieplną tego przewodu w stosunku do przewodów o przekroju 4 mm² i 6 mm². Wobec podobnej objętości izolacji cieplnej różnica ta wynika z najmniejszej masy miedzianej żyły przewodzącej w tym samym odcinku przewodu, która wynosiła: 59 g/mb (2,5 mm²), 102 g/mb (4,0 mm²), 149 g/mb (6,0 mm²), co stanowi odpowiednio 23%, 31%, 37% masy całości przewodu o długości 1 metra.

Kształt i rozkład po długości profili temperaturowych odpowiada kształtowi i rozkładowi długościowemu krzywych temperaturowych w kolejnych dwusekundowych czasowych odcinkach pomiarowych. Parametrem pozwalającym na ocenę zdolności przewodu do pełnej obciążalności prądowej jest szybkość rozprzestrzeniania się strumienia ciepła wewnątrz przewodu i strat cieplnych poprzecznych wpływających na temperaturę nagrzewania. Wpływ na temperaturę żył przewodzących ma sposób zabudowy przewodu, od którego zależą straty ciepła w izolacji elektrycznej spowodowane pojemnością cieplną materiału izolacyjnego [5], [6]. Zarejestrowane krzywe temperaturowe nagrzewania uzyskane z eksperymentu pozwalały na określenie stałych czasowych rc nagrzewania przewodów opóźnienia transportowego strumienia ciepła wewnątrz przewodu w zależności od sposobu jego zabudowy. Warunki otoczenia przewodu w odniesieniu do warunków pożarowych zakładają stały poziom zdolności przesyłania mocy elektrycznej od początku zaistnienia pożaru

(wymuszenia temperaturowego) i stanowią przyjęcie wariantu bardziej niekorzystnego dla zdolności przesyłowej przewodu. Stan taki gwarantuje jednak, że przyjęcie takich założeń do obliczenia temperatury nagrzewania nie spowoduje zaniżenia poziomu bezpieczeństwa dla zapewnienia ciągłości zasilania urządzeń służących do walki z pożarem.

Tabela 1. Zestawienie parametrów czasowych nagrzewania (zabudowa natynkowa).

Metoda	Stała czasowa [s]	Czas opóźnienia [s]
stycznej	401	62
stycznej i punktu	165	62
dwóch punktów	127,5	84,5

Istotną i zauważalną różnicą jest odległość od źródła ciepła przy jakiej zauważalny jest wpływ nagrzewania przewodu w strefie gorącej. Odległość ta dla strefy gorącej o długości około 1 metra (zastosowanej w eksperymencie) wynosi od 2÷15 metrów, najmniejsza jest dla przewodów zabudowanych w otwartym korycie kablowym, a największa dla przewodów w zamkniętym kanale kablowym przeciwpożarowym.



Rys.5. Porównanie rzeczywistych rozkładów średnich temperatur przewodu w różnych sposobach zabudowy

Krzywe rozkładu temperatury zestawione na wykresie przedstawionym na rysunku 5 wyraźnie sugerują, że przewody w zabudowie otwartej najszybciej tracą ciepło poza strefą gorącą i mają najkrótszą strefą pośrednią w stosunku do przewodów o takich samych przekrojach, ale stosowanych w różnego rodzajach zamkniętych konstrukcyjnie osłon przeciwpożarowych.

Podsumowanie

Badaniom poddano trzy warianty zabudowy przewodów stosowane w praktyce inżynierskiej. Wykazano, że ujęty w normach podział długości przewodu będącego pod działaniem pola temperaturowego otoczenia (np. pożaru) na strefę gorącą i zimną, nie uwzględnia istnienia strefy pośredniej. Przeprowadzone badania potwierdziły istnienie takiej strefy (Rys. 4, Rys. 5.), a temperatura przewodu w jej obrębie osiągała wartości, znacznie przekraczające katalogowe parametry eksploatacyjne przewodów. Długość strefy pośredniej w zależności od sposobu zabudowy wynosiła: dwukrotność długości strefy gorącej dla otwartego koryta kablowego, pięciokrotność strefy gorącej dla przewodu izolowanego termicznie, piętnastokrotność strefy gorącej dla zabudowy kanałowej (Rys.5). Badania przeprowadzono w stanie ustalonym pola temperaturowego wymuszającego przepływ strumienia ciepła przez przewód. Za pomocą krzywej temperaturowej uzyskane z badań określono stałą czasową nagrzewania, która wyniosła 401 sekund, a całkowity czas pomiarów temperatury wyniósł 3000 sekund.

W celu przeprowadzenia symulacji przewód został podzielony na odcinki pomiarowe, a każdy odcinek potraktowano jako człon transmitancyjny o charakterze inercyjnym wyższego rzędu. Cały układ cieplny przewodu przedstawiono jako układ cieplny o określonym oporze cieplnym *R* i pojemności cieplnej *C*, na których wejściu był sygnał temperaturowy skokowo narastającego wymuszenia.

Wyniki pracy mogą służyć, jako wsparcie analizy oceny ryzyka zagrożenia pożarowego dla ludzi i budynków zarówno na etapie projektowania jak i eksploatacji już istniejacych obiektów. Ponadto umożliwią badanie możliwości zastosowania nowych sposobów zabudowy konstrukcyjnej przewodów, zwiększających ich odporność ogniową bez pogarszania zdolności przesyłu. Badania nad materiałami izolacyjnymi nowvmi zapewniającymi zwiększenie zdolności do oddawania ciepła przez przewody bez pogorszenia ich ognioodporności

Autorzy: 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; dr hab. inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.suproniuk@wat.edu.pl; mgr inż. Karol Piwowarski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Email: karol.piwowarski@wat.edu.pl; mgr inż. Piotr Paziewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Email: piotr.paziewski@wat.edu.pl; mgr inż. Witold Kaczmarek, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, email: witold.kaczmarek@wat.edu.pl .

LITERATURA

- [1] Novak B.; Tamus Z.; A., Koller, L. Heating of Cables Due to Fault Currents. 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation
- [2] Skibko Z., The impact of long-term permissible limit temperature and ambient temperature on long-term ampacity of cables. *Wiadomości Elektrotechniczne* Vol. 10/2009.
- [3] Perka B., Piwowarski K., A method for determining the impact of ambient temperature on an electrical cable during a fire. *Energies* 2021, 14, x. https://doi.org/10.3390/xxxxx
- [4] Granieri P. P., Hincapie L., van Weelderen R.: Heat Transfer Through the Electrical Insulation of Nb3Sn Cables. IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol. 24, No. 3, 2014.
- [5] Szczegielniak T., Kusiak, D., Piątek Z., Analiza strat mocy oraz temperatury kabla elektroenergetycznego średniego napięcia *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* - 2020, no. 103, s. 25-34
- [6] Wesołowski M., Czaplicki A., Hauser J., Skrzypczak P., Analogue RC model for temperature controller testing *Computer Applications in Electrical Engineering* - 2015, vol. 13, s. 132-142 133-137.