

doi:10.15199/48.2020.12.25

## Modelowanie nagrzewania przewodów elektrycznych w warunkach pożarowych z wykorzystaniem parametrów rozłożonych

**Streszczenie.** Artykuł omawia zjawisko wymiany ciepła pomiędzy otoczeniem, a przewodem elektrycznym podczas warunków temperaturowych przekraczających wartości dopuszczalne dla powszechnie stosowanych przewodów elektrycznych niepalnych. Model przepływu ciepła wykorzystuje metodę opartą na parametrach rozłożonych, co stanowi własny wkład naukowy autorów w badanie zjawisk cieplnych w przewodach elektrycznych. Porównanie zaproponowanego rozwiązania z danymi eksperymentalnymi udowodniło jego przydatność dla przyjętego celu modelowania.

**Abstract.** The article discusses a phenomenon of heat exchange between the environment and an electrical cable in temperature conditions exceeding the permissible values for commonly used non-flammable electrical cables. The heat flow model uses a method based on distributed parameters, which is the authors' own scientific contribution to the study of thermal phenomena in electrical cables. Comparison of the proposed solution with experimental data proved its usefulness for the adopted modelling purpose. (*Analysis of heat exchange between the environment and an electrical cable*)

**Słowa kluczowe:** parametry rozłożone, temperatura pożarowa, bezpieczeństwo, instalacje przeciwpożarowe.

**Keywords:** distributed parameters, fire temperature, safety, fire-fighting installations.

### Wstęp

Zapewnienie bezpieczeństwa ludzi, urządzeń oraz obiektów budowlanych, w których zaistniało zagrożenie spowodowane wystąpieniem pożaru, zależy od poprawności działania systemów mających to bezpieczeństwo wspierać. Realizacja tego zadania wymaga zagwarantowania pewnego zasilania i sterowania systemów, instalacji oraz urządzeń, które powinny działać w przypadku pojawienia się warunków termicznych występujących podczas pożaru (200°C÷1200°C) [4]. Nagrzewanie przewodów instalacyjnych zasilających urządzenia przeciwpożarowe zakłóca lub wręcz uniemożliwia ich prawidłowe zasilanie lub sterowanie [1]. Do urządzeń takich zaliczamy między innymi: oświetlenie awaryjne i ewakuacyjne, silniki elektryczne pomp pożarowych, wentylatorów, dźwiękowe systemy ostrzegawcze, źródła zasilania gwarantowanego (akumulatory, agregaty prądowłórcze). Prawidłowość funkcjonowania całości systemu przeciwpożarowego zależy w dużej mierze od znajomości stanu fizycznego przewodowej instalacji zasilającej. W określeniu tego stanu potrzebne jest opracowanie modelu zachowania się przewodów elektrycznych w termicznym środowisku pożarowym. Stosowany obecnie model temperaturowy, zakłada podział przewodu na dwie strefy: gorącą oraz zimną [8], a ocena funkcjonalności przewodu zależy od procentowego udziału strefy gorącej w całkowitej długości przewodu [3]. W modelu tym zakłada się, że nagrzewanie przewodu skupione jest tylko w obszarze strefy gorącej (lub w jednym jej punkcie), a poza tą strefą przewód pozostaje w normalnych warunkach eksploatacyjnych (-40°C÷90°C). Ponadto przyjmuje się, że skutek zaburzenia temperaturowego w strefie gorącej przewodu (lub jednym jej punkcie) jest natychmiastowo odczuwany we wszystkich innych punktach w przewodzie. Model ten spełnia warunki typowego układu cieplnego o parametrach skupionych. Układ taki nie uwzględnia występowania strefy pośredniej, w której żyły przewodzące mogą mieć temperaturę wyższą niż określona jako normalna. Pomija się także fakt, że skutki wystąpienia zaburzenia się w jednym punkcie przewodu, będą widoczne w innym punkcie z pewnym opóźnieniem.

Model przewodzenia ciepła w przewodzie elektrycznym przedstawiony przez autorów reprezentuje nowe i

oryginalne podejście do problemu modelowania temperaturowego. Uwzględnia fakt, że parametry cieplne przewodu rozłożone są równomiernie wzdłuż jego długości, a więc między strefą gorącą i zimną występuje strefa pośrednia. Pozwala także na obliczenie temperatury przewodu w każdej chwili czasowej w trakcie procesu nagrzewania. W modelu wykorzystane zostało równanie różniczkowe cząstkowe przewodnictwa cieplnego, którego rozwiązanie wykorzystuje rachunek operatorowy i przekształcenie Laplace'a. Zmiennymi niezależnymi w przedstawionym modelu są: czas nagrzewania  $t$  oraz współrzędna odległościowa  $x$  od źródła ciepła. Pozwoliło to na zamodelowanie ciągłego przebiegu temperatury żył podczas nagrzewania wzdłuż osi przewodu oraz określenie na tej podstawie zdolności przesyłowych przewodu.

W warunkach termicznych pożaru rezystancja żył w przewodach elektrycznych wzrasta około pięciokrotnie w stosunku do rezystancji żył w warunkach normalnej eksploatacji na tym samym odcinku długości przewodu. Skutkiem tego jest zmniejszenie występującego w przewodzie napięcia skutecznego zasilającego urządzenia przeciwpożarowe. Próba uruchomienia np. silnika elektrycznego pompy wody pożarowej przy obniżonym o 10% napięciu skutecznym  $U_{sk}$  wywołuje wzrost prądu rozruchowego  $I_r$  w obwodzie stojana o 11% oraz spadek momentu rozruchowego  $M_r$  silnika o 19% [8]. Przekroczenie przez moment rozruchowy  $M_r$  minimalnej wartości krytycznej oraz wzrost prądu rozruchowego  $I_r$  powodują, że rozruch obciążonego pompą silnika elektrycznego będzie utrudniony lub wręcz niemożliwy w przypadku zadziałania zabezpieczeń nadprądowych.

Określenie stanu cieplnego instalacyjnych przewodów elektrycznych (przekrój czynny  $S_{zp} < 10 \text{ mm}^2$ ), pozwala na ocenę zdolności przesyłowej przewodów i sformułowanie wymagań jakie powinna spełniać instalacja, aby zapewnić funkcjonalność urządzeń ochrony przeciwpożarowej [2].

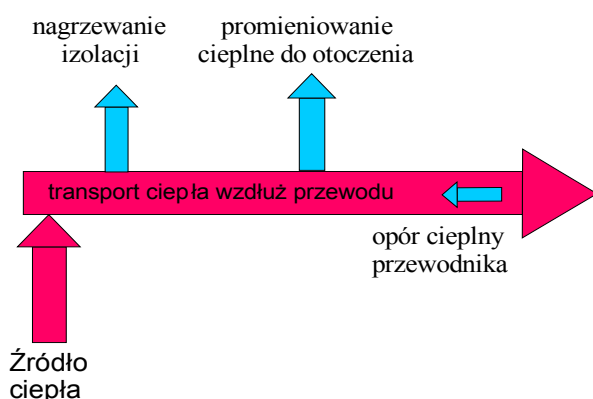
Towarzysząca pożarowi temperatura wywołuje przepływ strumienia ciepła w miedzianych żyłach przewodów elektrycznych. Nagrzewanie jest zjawiskiem, które decyduje o własnościach użytkowych i trwałości eksploatacyjnej przewodów. Przepływ ten pojawia się samoistnie w niejednorodnych polach temperatury, tj. tam, gdzie istnieje różnica temperatury.

Przepływ ciepła w przewodzie elektrycznym ma istotny wpływ na parametry elektronicznych urządzeń systemu ochrony przeciwpożarowej. Wywołuje on nagrzewanie elektronicznych elementów półprzewodnikowych urządzeń sterujących i sygnalizacyjnych.

### Model temperaturowy przewodu elektrycznego

Temperatura nagrzewanych miedzianych żył przewodzących, zmienia wzdłuż osi przewodu w wyniku występowania strat ciepła do otoczenia (Rys. 1.). W opracowanym modelu temperaturowym założono, że straty ciepłe w układzie przewód – otoczenie wynikają z:

- pojemności cieplnej izolacji elektrycznej miedzianej żyły przewodu,
- promieniowania ciepła z izolacji elektrycznej do otoczenia,
- oporu cieplnego miedzianej żyły przewodu.



Rys.1. Struktura strat ciepłych modelu temperaturowego

Bezpośrednią przyczyną spadku temperatury żyły jest przenikanie strumienia ciepła z powierzchni bocznej żyły przewodzącej do izolacji pierwotnej (teflon, mika) oraz izolacji zewnętrznej (HFFR). Przenikanie ciepła z żyły przewodzącej do otoczenia jest określone stratą cieplną poprzeczną, a straty ciepła spowodowane oporem cieplnym żyły są stratami transportu ciepła wzdłuż osi podłużnej przewodu. Ze względu na dużą przewodność cieplną między straty ciepłe poprzeczne są dominujące w stosunku do strat wzdłużnych. Straty poprzeczne zależne są od wielkości powierzchni bocznej żył, materiałów użytych do izolacji elektrycznej przewodu oraz warunków środowiskowych w których zabudowany jest przewód. Straty transportowe (wzdłużne) nie zależą od warunków środowiskowych, ich wielkość jest proporcjonalna do współczynnika przewodnictwa cieplnego  $\lambda$  materiału żyły przewodzącej.

Procedurę wyznaczenia modelu nagrzewania przewodu można podzielić na dwa etapy: nagrzewania i stanu ustalonego. Wpływ na szybkość zmian temperatury żył mają fizyczne warunki środowiska w postaci pól temperaturowych źródła ciepła oraz pozostałej przestrzeni otaczającej przewód, a także parametry cieplne materiałów izolacyjnych (opór cieplny, pojemność cieplna).

Sposób oddziaływania źródła ciepła na przewód może być określony np. krzywą pożaru lub jako funkcja o dowolnym przebiegu zmiany temperatury (np. skokowa).

Równanie opisujące układ o parametrach rozłożonych ma postać równania różniczkowego cząstkowego drugiego rzędu [1].

$$(1) \quad \nabla^2 \varphi = k^2 \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} + f(x, t)$$

gdzie:  $k$  – stała materiałowa związana z przewodnictwem cieplnym.

Równanie (1) nazywane jest równaniem przewodnictwa cieplnego lub równaniem dyfuzji. Parametr  $\varphi$  w równaniu reprezentuje temperaturę żył przewodu elektrycznego w środowisku jednorodnym (o stałych właściwościach w każdym kierunku). Zapisujemy je także w postaci

$$(2) \quad \nabla^2 \varphi = k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

oraz

$$(3) \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Stosując przekształcenie Laplace'a przychodzimy do dziedziny operatorowej. Postać operatorowa umożliwia wyznaczenie temperatury żyły przewodu  $T(x, t)$  jako odpowiedzi na wymuszenie skokowe  $T_0$  [6]. W tym celu układ o parametrach rozłożonych zastępujemy układem o parametrach skupionych opisanym transmitancją  $H(x, s)$ .

Przy założeniu, że funkcja wymuszająca przepływ strumienia ciepła  $T(0, t)$  ma postać  $e^{st}$ , to temperatura  $T(x, t)$  w dowolnym punkcie o współrzędnej  $x$  jest określona zależnością

$$(4) \quad T(x, t) = H(s, t) \cdot e^{st}$$

Podstawiając równanie (4) do równania (3) otrzymujemy

$$(5) \quad \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \cdot e^{st} = \frac{s}{\alpha} \cdot H(x, s) \cdot e^{st}$$

oraz

$$(6) \quad H(s, t) = A \cdot e^{\sqrt{\frac{s}{\alpha}} x} + B \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha}} x}$$

gdzie  $A$  i  $B$  są stałymi.

Ze względu na skończoną amplitudowo wartość odpowiedzi, stała  $A$  w równaniu (6) musi być równa 0, w przeciwnym razie transmitancja  $H(x, s)$  przyjmowałaby wartość nieskończoną w punkcie  $x = \infty$  co jest z fizycznych względów niemożliwe. Z tego powodu równanie (6) przyjmuje postać

$$(7) \quad T(x, t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ H(x, s) \frac{T_0}{s} \right] = \mathcal{L}^{-1} \left[ B \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha}} x} \frac{T_0}{s} \right]$$

Stosując odwrotne przekształcenie Laplace'a funkcji ujętej w nawiasie otrzymujemy równanie układy o parametrach rozłożonych o postaci

$$(8) \quad T_{erfc}(x, t) = B \cdot T_0 \cdot erfc \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right)$$

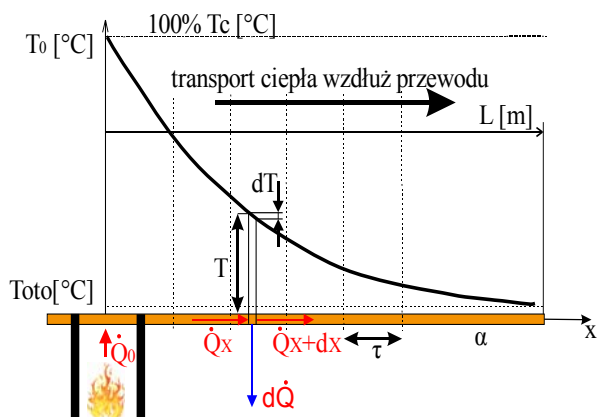
gdzie:  $\alpha$  [W/m<sup>2</sup> K] – współczynnik dyfuzyjności cieplnej,  $x$  [m] – odległość od źródła ciepła,  $t$  [s] – czas oddziaływania podwyższonej temperatury,  $T_0$  [°C] – temperatura wymuszenia (źródła ciepła).

Model temperatury żyły przewodu elektrycznego opisany równaniem (8) zawiera w zapisie nieelementarną uzupełnioną funkcję błędu  $erfc$  o parametrach rozłożonych  $(x, t)$ .

Graficznym przedstawieniem rozwiązania równania modelu  $T_{erfc}(x, t)$  dla jest krzywa temperatury o przebiegu wykładniczym (Rys. 2.).

Dla każdej chwili czasowej można wyznaczyć jedną krzywą temperaturową.

Oddziaływanie pożarowego pola temperaturowego na przewód można podzielić na dwa etapy: nagrzewanie i stan ustalony. Wyznaczenie współczynników krzywej w oparciu o aproksymację nieliniową danych eksperymentalnych, jest przybliżone z dokładnością tym większą, im bardziej jest ustalona w czasie temperatura wymuszająca nagrzewanie przewodu (stan ustalony). Wybór wartości stałej czasowej  $\tau_c$  ma duże znaczenie dla dokładności modelu cieplnego przewodu. Ważnym zatem jest, aby wyniki pomiarów użyte do walidacji modelu pobrane były z chwili czasowej, w której odpowiedź temperaturowa żyły przewodu elektrycznego miała charakter ustalony.



Rys.2. Teoretyczny przebieg krzywej chłodzenia

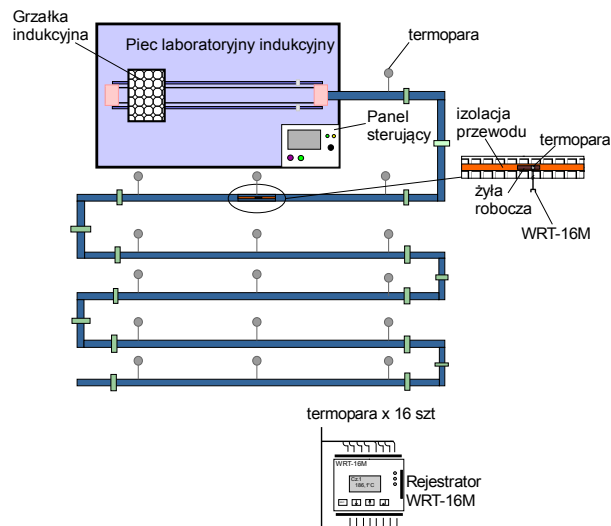
Tabela 1. Zestawienie stałych czasowych nagrzewania badanych przewodów

Metoda	Stała czasowa $\tau_c$ [s]	Czas opóźnienia $\tau_{op}$ [s]
styczna	401	62
styczna i punkt	165	62
dwa punkty	127,5	84,5

Do wyznaczenia stałej czasowej można się posłużyć metodą graficzną (Rys. 2.) lub analityczną. Wykorzystać do tego należy zarejestrowany przez rejestrator przebieg temperatury. Ze względu na ograniczoną dokładność rysowania stycznej, metoda graficzna jest mniej dokładna niż analityczna. Przyjmuje się, że stan ustalony występuje po 3÷5 stałych czasowych wyznaczonych z odpowiedzi układu na wymuszenie [6]. Wartość odpowiedzi temperaturowej żyły przewodu dla pierwszej termopary licząc od wylotu przewodu z komory grzewczej osiągała poziom 63,2 % wartości maksymalnej odpowiedzi po czasie 1622 sekund. Mając na uwadze wyniki otrzymane metodami graficzną i analityczną przyjmujemy, że stan ustalony w procesie nagrzewania nastąpi po 1600 sekundach od wystąpienia wymuszenia temperaturowego, przyjęta do obliczeń stała czasowa wynosi 400 sekund.

W celu weryfikacji zaproponowanego modelu zbudowano system pomiarowy. W niektórych systemach pomiarowych w celu otrzymania informacji o stanie danego obiektu należy zastosować dodatkowo układ obliczeniowy. Przykład takiego systemu w zastosowaniu do badania materiałów półprzewodnikowych przedstawiono w pracy, [5]. Analiza metod pomiarowych temperatury przewodów elektrycznych pozwoliła na wybranie metody, która pozwoli na zarejestrowanie temperatury w postaci sygnału elektrycznego, przydatnego do stosowania w dalszych obliczeniach związanych z walidacją modelu matematycznego nagrzewania się przewodów elektrycznych. Metoda z użyciem termoelementów jest

korzystna ze względu na możliwości konstrukcyjne czujników termoparowych, dokładności pomiarów oraz możliwość wykorzystania otrzymanych wyników pomiarów do dalszych obliczeń. Zaprojektowane i wykonane przez autorów stanowisko badawcze składa się z: pieca laboratoryjnego, układu zasilającego z regulacją temperatury wewnątrz komory grzewczej, układu pomiarowego z przetwarzaniem i rejestracją temperatury, konstrukcji nośnej badanego przewodu. Schemat stanowiska przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego

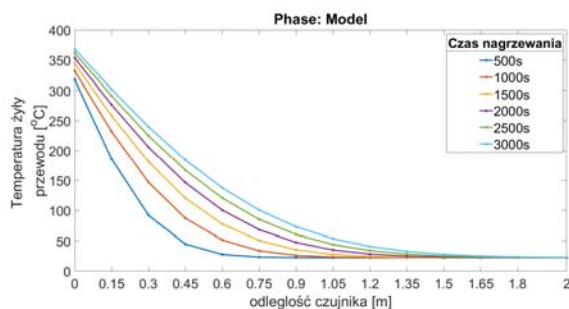
Konstrukcja pieca umożliwiła osiągnięcie temperatury około 400°C wewnątrz komory grzewczej. Długość strefy gorącej wynosiła 1,0 m. Eksperymentalnie została dobrana długość przewodu, w której widoczne były zmiany temperatury. Dla przewodu zabudowanego w korycie kablowym otwartym wyniosła ona 2,0 m. Do badań użyty został przewód niepalny (N)HXH 3x6mm<sup>2</sup> FE180 PH90/E90, który posiada żyły przewodzące z miedzi przewodowej CU ETP CW004, w której zawartość miedzi wynosi 99,8%, co pozwala założyć, że jest czysta materiałowo miedź [7].

Pomiary z termopar rozmieszczonych co 0,15m wzdłuż przewodu, były rejestrowane w rejestratorze WRT-16M. Czas próbowania temperatury wynosił 120 min, co odpowiada długości normowego czasu trwania pożarów celulozowych [8].

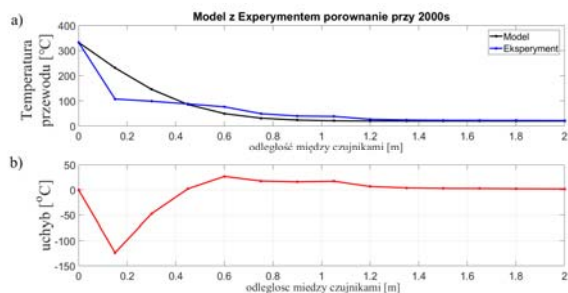
Wynikiem numerycznej symulacji modelu  $T_{erfc}(x,t)$  jest rodzina krzywych wykładniczych. Każda krzywa reprezentuje wynik obliczeń zmian temperatury żyły wzdłuż przewodu w jednej chwili czasowej, która upłynęła od momentu zadziałania wymuszenia temperaturowego. Krzywe przedstawione na rysunku 4 pochodzą z obliczeń teoretycznych nie uwzględniających danych pomiarowych, są tylko symulacją przebiegu temperatury. W miarę upływu czasu nagrzewania krzywe wyplaszczają się, co jest efektem stopniowego ustalania się temperatury wzdłuż przewodu.

Wprowadzenie danych pomiarowych do algorytmu obliczeniowego modelu, sprawia, że model aproksymuje wynik modelu do eksperymentalnego przebiegu temperatury. Do aproksymacji danych model wykorzystuje klasyczną metodę najmniejszych kwadratów opartą na algorytmie Levenberga – Marquadta (algorytm L-M) [7].

Wynik aproksymacji i obliczeń temperatury dla dowolnie wybranej chwili czasowej równej 2000 sekund od zadziałania wymuszenia temperaturowego przedstawiony jest na rysunku 5a.



Rys. 4. Wynik symulacji numerycznej modelu.



Rys. 5. Wynik aproksymacji i obliczeń modelu: a) aproksymacja danych pomiarowych; b) porównanie wyników modelowania i danych eksperymentalnych.

Wykorzystując algorytm obliczeniowy modelu możemy wyznaczyć parametry tłumienia krzywej wykładniczej temperatury w badanym przewodzie elektrycznym.

$$(9) \quad T_{(x,t=2000s)} [^{\circ}\text{C}] = a \cdot e^{-bx}$$

W wyniku obliczeń dla wybranej chwili czasowej 2000 sekund są współczynniki  $a$  i  $b$ , które wynoszą odpowiednio:  $a = 328,3 [^{\circ}\text{C}]$ ,  $b = 4,637 [-]$ .

Parametr  $a$  jest wartością chwilową temperatury wymuszenia. Natomiast parametr  $b$  określa nachylenie krzywej temperaturowej co odpowiada szybkości schładzania się przewodu. W wymiarze fizycznym reprezentuje on współczynnik dyfuzyjności cieplnej  $\alpha$  izolacji przewodu.

Wzrost współczynnika  $\alpha$  powoduje szybsze schładzanie się przewodu. Wyliczona przez algorytm wartość współczynnika  $\alpha$  jest wartością wypadkową dla kilku warstw izolacji z których składa się przewód.

Rysunek 5b przedstawia różnicę pomiędzy wartością temperatury obliczoną przez model, a temperaturą zmierzoną podczas eksperymentu. Zastosowana w modelu metoda aproksymacji danych daje zadowalające wyniki dzięki szybkiej zbieżności i łatwej implementacji danych do modelu. Różnica wartości obliczonej przez model w odniesieniu do danych eksperymentalnych jest największa w obszarze przewodu znajdującym się najbliższym źródła ciepła. W obszarze tym występują największe przyrosty temperatury co jest nie korzystne dla algorytmu obliczeniowego modelu, ale w miarę wzrostu współrzędnej odległościowej  $x$ , algorytm generuje wyniki z coraz większą dokładnością.

## Podsumowanie

Przedstawiona w artykule metoda wyznaczania temperatury żyły przewodu elektrycznego oparta o parametry rozłożone, reprezentuje nowe podejście do określenia nagrzewania się przewodów elektrycznych w warunkach termicznych zbliżonych do pożaru. W oparciu o uzyskane wyniki obliczeń temperaturowych można określić rezystancję przewodów elektrycznych, w zależności od czasu oddziaływania podwyższonej temperatury otoczenia i odległości od źródła ciepła. Ma to duży wpływ na warunki zasilania urządzeń elektrycznych w szczególności tych, które odpowiadają za bezpieczeństwo ludzi i urządzeń podczas wystąpienia tak niebezpiecznych zjawisk jak pożary budynków. Moment załączenia urządzeń przeciwpożarowych ma duży wpływ na pewność zadziałania całego systemu ochrony budynku. Przedstawiona w artykule metoda modelowania temperaturowego w istotny sposób pomaga w ocenie stanu termicznego przewodów instalacji zasilającej urządzenia przeciwpożarowe. Metoda jest dobrym narzędziem wspierającym projektantów instalacji przeciwpożarowych. W dalszych badaniach naukowych autorzy będą rozwijali zastosowanie metody dla innych sposobów konstrukcyjnych prowadzenia przewodów instalacyjnych niż system otwartych koryt kablowych.

**Autorzy:** mgr. inż. Bogdan Perka, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [bogdan.perka@wat.edu.pl](mailto:bogdan.perka@wat.edu.pl); mgr. inż. Karol Piwowarski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [karol.piwowarski@wat.edu.pl](mailto:karol.piwowarski@wat.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] Bontempi G., Vaccaro A., Villacci D., Power cables thermal protection by interval simulation of imprecise systems, (2004) IEE Proc. Generat. Transm. Distrib.
- [2] Norma N SEP E-005, Dobór przewodów elektrycznych do zasilania urządzeń przeciwpożarowych których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie pożaru.
- [3] Osowski S., Cichocki A., Siwek K., MATLAB w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów. OW PW, (2006).
- [4] Skibko Z., Wpływ temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale i temperatury otoczenia na obciążalność prądową długotrwale przewodów. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 10/2009.
- [5] Suproniuk M., Kamiński P., Pawłowski M., Kozłowski R., Pawłowski M.K., An intelligent measurement system for characterisation of defect centres in semi-insulating materials, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 86, ss. 247 – 252, 2010.
- [6] Suproniuk M., Pawłowski M., Wierzbowski M., Majda-Zdancewicz E., Pawłowski M.K., 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, vol. 89, ss. 044702-044710, 20018.
- [7] Suproniuk M., Kamiński P., Kozłowski R., Pawłowski M., Effect of Deep-Level Defects on Transient Photoconductivity of Semi-insulating 4H-SiC. Acta Physica Polonica, 125(4), 2014.
- [8] Wiatr J., Orzechowski M., Instalacje elektryczne do zasilania urządzeń elektrycznych, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie pożaru, Wydanie I, (2016).