

## ZJAWISKA CIEPLNE W INSTALACJI ELEKTRYCZNEJ W AWARYJNYCH STANACH PRACY SPOWODOWANYCH WARUNKAMI ZEWNĘTRZNYMI

### Streszczenie

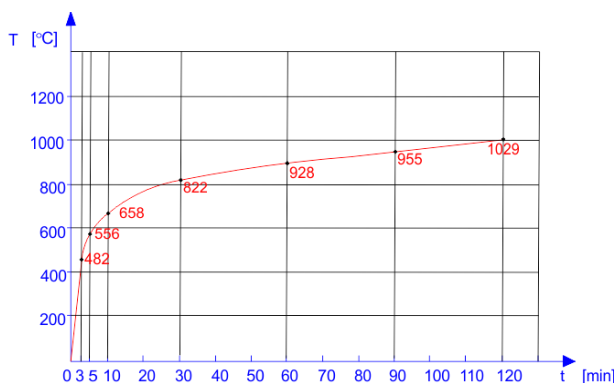
W artykule przedstawiona została problematyka dotycząca zjawisk związanych z przewodnością elektryczną i cieplną żył przewodzących kabli poddanych działaniu temperatur zbliżonych do warunków termicznych występujących w czasie pożaru. Na przykładzie przenikania ciepła od pożaru przez przegrody kanału kablowego do przewodu dokonano oceny wzrostu rezystancji żyły kabla elektrycznego.

### WSTĘP

Zapewnienie bezpieczeństwa ludzi, urządzeń oraz obiektów budowlanych, w których zaistniało zagrożenie spowodowane wystąpieniem pożaru, zależy od poprawności działania systemów mających to bezpieczeństwo zapewniać. Realizacja tego zadania wymaga zagwarantowania niezawodnego zasilania i sterowania systemów, instalacji oraz urządzeń, które powinny działać w przypadku pojawienia się niekorzystnych pod względem środowiskowym warunków otoczenia, jakimi są warunki termiczne występujące podczas pożaru. Nagrzewanie się żył przewodzących powoduje zmniejszenie przewodności elektrycznej kabli, co wpływa na pogorszenie jakości przesyłanych sygnałów elektrycznych. Zakłóca to lub wręcz uniemożliwia zasilanie i sterowanie tych urządzeń. Pogorszenie jakości energii elektrycznej przesyłanej przez przewód instalacji elektrycznej będący w strefie objętej pożarem, powoduje spadek sprawności urządzeń elektrycznych, których poprawne działanie jest konieczne w czasie pożaru. Do urządzeń takich zaliczamy między innymi: silniki elektryczne pomp pożarowych, silniki elektryczne wentylatorów oddymiających oświetlenie awaryjne, oświetlenie ewakuacyjne, systemy nagłośnienia, silowniki elektryczne, źródła zasilania gwarantowanego (akumulatory, agregaty prądotwórcze).

### 1. WPLYW ENERGII CIEPLNEJ NA INSTALACJĘ ELEKTRYCZNĄ

Temperatura  $T$  pomieszczeń objętych pożarem w funkcji czasu  $t$  zależy od rodzaju materiałów, które ulegają spalaniu. W literaturze [3] opisane są krzywe symulujące przebieg  $T=f(t)$ . Przykładowy przebieg krzywej normowej  $T=f(t)$  dla pożarów celulozowych jest przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Krzywa normowa „temperatura-czas” dla pożarów celulozowych [3]

Wzrost temperatury w pomieszczeniu objętym pożarem oddziałuje bezpośrednio na instalację elektryczną znajdującą się w tym pomieszczeniu. Przewody instalacji elektrycznej z chwilą wystąpienia pożaru poddawane są ciągłemu nagrzewaniu. Skutkiem tego nagrzewania jest pogorszenie warunków przesyłania energii elektrycznej do zasilanych poprzez tą instalację odbiorników. Pogarszające się warunki przesyłania energii elektrycznej powodują, spadek efektywności działania tychże odbiorników, które często są częścią systemu służącego do likwidacji lub ograniczania skutków występowania

w budynkach wysokich temperatur w skutek zaistnienia pożaru. Urządzenia elektryczne systemu przeciwpożarowego do poprawnej pracy wymagają energii elektrycznej o określonych parametrach. Im te parametry są bardziej zbliżone do wartości znamionowych określonych przez producenta, tym praca urządzeń jest bardziej niezawodna

i efektywna. Odstępstwa od optymalnych warunków zasilania powodują nieprawidłową pracę odbiorników, objawiającą się między innymi pracą przy niskiej lub nadmiernie wysokiej wydajności, co w obydwu przypadkach jest szkodliwe zarówno dla samych odbiorników jak i systemu, w którym są zabudowane. Zmiana parametrów energii elektrycznej poza przedział uznany za wartości dopuszczalne, może spowodować nawet przerwy w zasilaniu odbiorników spowodowane zadziałaniem odpowiednich zabezpieczeń EAZ. Systemy przeciwpożarowe najczęściej funkcjonują w środowisku wewnętrznym chronionego obiektu, będąc narażonym na wszelkie wahania parametrów tego środowiska. Podczas pożarów mamy do czynienia z przepływem energii cieplnej z otoczenia do wnętrza przewodu elektrycznego.

### 2. FIZYCZNE PODSTAWY PRZEPLÝWU ENERGII CIEPLNEJ W KABLACH ELEKTRYCZNYCH

Ogrzewanie żyły przewodzącej kabla w dowolnie wybranym punkcie do temperatury  $t_1$  spowoduje różnicę temperatur na długości  $L$  kabla. Różnica temperatur spowoduje przepływ ciepła wzdłuż osi  $x$  kabla. Przepływ ciepła  $Q$  określony jest równaniem Fouriera:

$$Q = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{L} S \quad (1)$$

gdzie:

$\lambda$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego materiału pręta,  
 $S$  – przekrój żyły przewodzącej.

Strumień ciepła przepływający wzdłuż osi  $x$  żyły w czasie  $dt$  wynosi

$$dQ = q S dt \quad (2)$$

gdzie strumień energii cieplnej  $q$  przepływającej w jednostce czasu przez jednostkowy przekrój poprzeczny pręta wynosi:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Całkowity strumień ciepła przepływający przez przekrój  $S$  żyły w czasie  $t_2 - t_1$  wynosi

$$Q = -\lambda S \int_{t_1}^{t_2} \frac{dT}{dx} dt \quad (4)$$

Ilość ciepła  $\Delta Q$  potrzebna do podwyższenia temperatury pręta o  $\Delta T$  określona jest zależnością

$$\Delta Q = c_w \rho V \Delta T = c_w \rho S \Delta x \cdot \Delta T \quad (5)$$

gdzie:

- $c_w$  – ciepło właściwe materiału pręta,
- $m$  – masa żyły przewodzącej,
- $\rho$  – gęstość materiału żyły przewodzącej,
- $V$  – objętość żyły przewodzącej,
- $S$  – przekrój żyły przewodzącej.

Na długości  $x_2 - x_1$  równanie (4) przyjmie postać:

$$Q = c_w \rho S \int_{x_1}^{x_2} \Delta T(x) dx \quad (6)$$

Jeżeli założymy, że kabel może wymieniać ciepło z otoczeniem, to ilość ciepła  $\Delta Q_a$  przekazanego do otoczenia określa się równanie:

$$\Delta Q_a = SF(x, t) \Delta x \cdot \Delta t \quad (7)$$

lub w postaci całkowitej

$$Q_a = S \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} F(x, t) dx dt \quad (8)$$

Równanie (8) określa całkowite ciepło wymienione z ośrodkiem otaczającym w czasie  $t_2 - t_1$  na odcinku żyły o długości  $x_2 - x_1$ .

W całkowitym bilansie ciepła dla odcinka  $x_2 - x_1$  żyły w czasie  $t_2 - t_1$  uwzględniamy równania (4), (6), (8)

$$\begin{aligned} \lambda \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{dT(x_2, t)}{dx} - \frac{dT(x_1, t)}{dx} \right] dt \\ + \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} F(x, t) dx \\ = c_w \rho \int_{x_1}^{x_2} [T(x, t_2) - T(x, t_1)] dx \end{aligned} \quad (9)$$

Równanie (9) rozwiązuje się stosując twierdzenie o wartości średniej dla przedziału  $(x_1, x_2)$ :

$$\begin{aligned} \lambda \left[ \frac{dT(x_2, t)}{dx} - \frac{dT(x_1, t)}{dx} \right] \Delta t + F(x, t) \Delta x \Delta t \\ = c_w \rho [T(x, t_2) - T(x, t_1)] \Delta x \end{aligned} \quad (10)$$

Uwzględniając zależność (7) otrzymujemy równania (11) i (12):

$$\begin{aligned} \lambda \frac{d}{dx} \frac{dT}{dx} \Delta t \Delta x + F(x, t) \Delta t \Delta x \\ = c_w \rho \frac{dT}{dt} \Delta t \Delta x \end{aligned} \quad (11)$$

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + F(x, t) = c_w \rho \frac{dT}{dt} \quad (12)$$

Jeśli założymy, że składnik  $F(x, t)$  oznaczający wymianę ciepła między prętem a otoczeniem (stygnięcie pręta) podlega prawu Newtona to:

$$F(x, t) = -aT \quad (13)$$

gdzie:

- $a$  – współczynnik dyfuzji ciepła pomiędzy żyłą przewodnika a jej otoczeniem [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ].

Uwzględniając ten związek otrzymamy równanie przewodnictwa temperaturowego dla żyły przewodnika w postaci

$$\frac{dT}{dt} = k \frac{d^2 T}{dx^2} - \mu T \quad (14)$$

gdzie

$$k = \frac{\lambda}{c_w \rho} \quad (15)$$

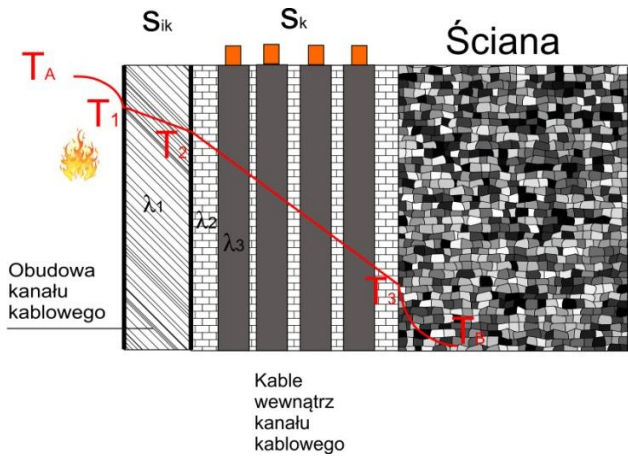
oraz

$$\mu = \frac{a}{c_w \rho} \quad (16)$$

Równanie różniczkowe cząstkowe drugiego rzędu (14) jest równaniem przewodnictwa temperaturowego żyły przewodzącej. Dla uproszczenia rozwiązania tego równania przyjmujemy, że żyła nie wymienia ciepła z otoczeniem. Wyjątkiem jest oczywiście obszar objęty płomieniem, który jest źródłem ciepła ogrzewającego żyłę. Rozwiązanie równania (14) daje możliwość określenia temperatury żyły przewodzącej kabla w zadanej odległości i po upływie znanego czasu w zależności od temperatury, która oddziałuje na kabel podczas pożaru. Znajomość temperatury żył przewodzących kabli podczas pożaru pozwala na określenie rezystancji kabla w zależności od odległości od źródła i czasu nagrzewania kabla, np. przez płomienie objętego pożarem pomieszczenia, w którym zabudowane są kable.

### 3. PRZENIKANIE CIEPŁA PRZEZ PRZEGRODY KANAŁU KABLOWEGO

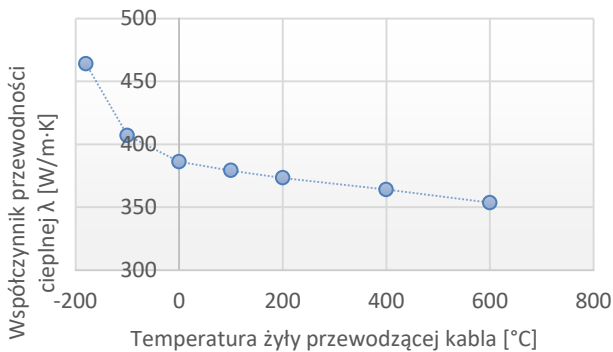
Najczęściej stosowanymi w budownictwie systemami zabudowy kabli elektrycznych jest zabudowanie kanału kablowego na ścianie budynku przykrytego płytami typu G-K lub stalowymi, rys. 2.



Rys.2. Kanał kablowy zabudowany płytą G-K

Pod wpływem ogrzewania obudowy kanału kablowego zabudowane w kanale kable nagrzewają się. Ciepło dopływające do obudowy kanału przenika przez materiał obudowy i ogrzewa przestrzeń wewnątrz kanału. Kable wewnątrz kanału nagrzewają się i wzrasta temperatura żył przewodzących. Ciepło jest transportowane wzdłuż osi kabla. Prędkość przepływu ciepła wzdłuż kabli zależy od przewodności cieplnej materiału żył przewodzących oraz strat związanych z wnikaniem ciepła w materiał obudowy kanału. Podczas nagrzewania się przestrzeni wewnętrznej kanału przybliżony rozkład temperatury w przekroju poprzecznym kanału pokazany jest na rysunku 2 [9].

Współczynnik przewodności cieplnej żył przewodzących kabli elektrycznych zawiera się w granicach wartości od 353 do 464 W/m·K [1], [8]. Zgodnie z równaniem (17) wartość współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  zależy od temperatury przewodnika. Na rysunku 3 przedstawiony został przebieg zmienności współczynnika  $\lambda$  w zależności od temperatury przewodnika [9].



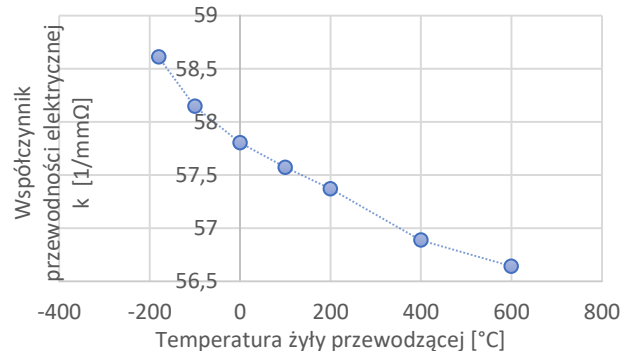
Rys. 3. Zmiany współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  żyły przewodzącej kabla w zależności od temperatury

Z prawa Wiedemanna – Franza wynika, że istnieje związek między współczynnikiem przewodności cieplnej i współczynnikiem przewodności elektrycznej. Zależność została wyznaczona doświadczalnie

$$\frac{\lambda}{k} = L \cdot T \quad (17)$$

gdzie:

$L = 2,44 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \Omega / \text{°C}^2]$  (liczba Lorentza),  
 $T$  – temperatura [°C].



Rys.4. Zmiany współczynnika przewodności elektrycznej  $k$  w zależności od temperatury żyły przewodzącej kabla [1], [12]

Na rysunku 4 przedstawiony został przebieg zmian konduktywności miedzi przewodowej w zależności od temperatury żyły. W badaniach nad wpływem temperatur pożarowych na kable elektryczne wygodniej jest się posługiwać odwrotnością konduktywności, czyli rezystywności żył kabli. Rezystywność miedzi przewodowej w temperaturach od 0°C÷100°C wynosi  $1,75 \cdot 10^{-8} \text{ m}$  [2], [7]. Rezystywność żył kabli elektrycznych rośnie wraz ze wzrostem temperatury żył. Wzrost rezystywności żył powoduje wzrost rezystancji przy przepływie prądu. Doświadczalnie stwierdzono, że w zakresie temperatur 0°C÷1000°C, a więc osiąganych w przestrzeni objętej pożarem, rezystancja żył przewodzących kabli wzrasta około pięciokrotnie w stosunku do rezystancji żył w temperaturze 20°C na tym samym odcinku długości przewodu [6]. W Tabeli 3 zamieszczono wyniki własnych obliczeń z zależności (20) i (21), a Rys. 5 przedstawia przebieg krotności zmian rezystancji w zakresie temperatur od 20°C do 1000°C.

W obliczeniach rezystancji wygodnie jest posługiwać się rezystywnością  $\rho$ . Związek rezystancji z rezystywnością żyły przewodzącej opisuje zależność

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (18)$$

gdzie:

$\rho$  – rezystywność [ $\Omega \cdot \text{m}$ ],  $l$  – długość żyły [m],  
 $S$  – przekrój żyły [ $\text{m}^2$ ].

Kable elektryczne stosowane w instalacjach, uzwojeniach maszyn elektrycznych itp. charakteryzują się dużą długością i małym przekrojem. Rezystancję  $R_T$  określa równanie:

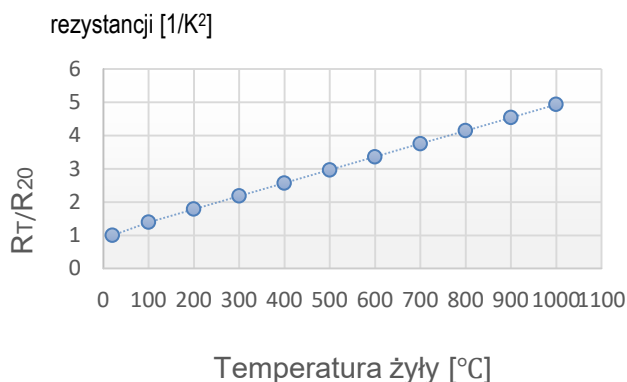
$$R_T = R_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta^2 \cdot \Delta T^2) \quad (19)$$

gdzie:

$R_T$  – rezystancja żyły w zadanej temperaturze,  $R_{20}$  – rezystancja żyły w temperaturze 20°C,  $\alpha$  – temperaturowy współczynnik rezystancji [1/K],  $\beta$  – drugi temperaturowy współczynnik

Tab. 1. Rezystancja i krotność zmian rezystancji żyły w zależności od temperatury dla przewodu DY 2,5 mm<sup>2</sup>, długość 100 metrów

T [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$R_T$ [ $\Omega$ ]	0,7553	0,9751	1,2502	1,5253	1,8004	2,0755	2,3506	2,6257	3,9008	3,1759	3,4510
$R_{20}/R_T$	1	1,3930	1,7860	2,1790	2,5720	2,9650	3,3580	3,7510	4,1440	4,5370	4,9300



**Rys. 4.** Zależność stosunku rezystancji przewodu w temperaturze 20 °C w zależności od temperatury żyły przewodzącej, przewód DY 2,5mm<sup>2</sup>, długość 100 metrów

Zależność (19) określa rezystancję żyły  $R_T$  w zadanej temperaturze. Warunkiem poprawności obliczeń jest by współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$  były stałe w całym interesującym nas zakresie temperatur. Tak nie jest, ponieważ współczynnik  $\alpha$  powiązany jest z rezystywnością materiału i zmienia się, gdy zmienia się rezystywność i temperatura żyły [1].

$$\alpha_0 = \frac{1}{\rho_0} \left[ \frac{\delta \rho}{\delta T} \right]_{T=T_0} \quad (20)$$

gdzie:

$\alpha_0$  – temperaturowy współczynnik rezystancji w temperaturze odniesienia,  $T_0$  – temperatura odniesienia [°C]

Dla miedzi przewodowej Cu-ETP temperaturowy współczynnik rezystancji wynosi  $\alpha_{20}=0,00393$  [1/°C], drugi temperaturowy współczynnik rezystancji  $\beta_{20}=10^{-6}$  [1/°C<sup>2</sup>] i jego wpływ na wyniki obliczeń w tej pracy jest pomijalnie mały. W praktyce oraz w tej pracy przyjmuje się, że choć jest to uproszczenie to obydwa współczynniki są stałe.

## PODSUMOWANIE

Nagrzewanie się kabli elektrycznych podczas pożarów stanowi przyczynę osłabienia zdolności przesyłowej linii zasilającej urządzeń, których działanie umożliwia zabezpieczenie ewakuacji osób z zagrożonych obiektów. Wpływ procesów termicznych zachodzących w środowisku objętym pożarem na kable elektryczne, ze względu na złożoność zależności opisujących przepływ energii cieplnej do wnętrza kabla powoduje pewne trudności w określeniu stopnia niezawodności linii i urządzeń przeciwpożarowych. Na podniesienie bezpieczeństwa i niezawodności instalacji przeciwpożarowych mają duży wpływ materiały stosowane na obudowy kanałów kablowych. Kanały kablówce ognioodporne zbudowane są z materiałów oraz elementów, które mają za zadanie opóźnić lub uniemożliwić zniszczenie kabli elektrycznych przez działanie termiczne pożaru, a tym samym utrzymać lub przedłużyć ich funkcjonalność. Obudowa kanału kablowego oraz izolacja elektryczna kabli powinny charakteryzować się małym współczynnikiem przewodności cieplnej  $\lambda$ , małym współczynnikiem przenikania ciepła  $k$ , małą emisyjnością promieniowania  $\epsilon$ , wysoką temperaturą zapłonu, nierozprzestrzenianiem ognia.

W artykule podjęto próbę określenia wpływu temperatur pożarowych na zdolności przesyłowe linii elektrycznej zasilającej pompę przeciwpożarową. W dalszej pracy autorzy zweryfikują doświadczalnie wyniki, które otrzymali analitycznie.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kasap S. O.: *Principles of Electronic Materials and Devices*, Third edition 2006, University of Saskatchewan, Canada.
1. Kurdziel R.: *Podstawy elektrotechniki*, WNT Warszawa 1970.
2. Wiatr J., Orzechowski M.: *Instalacje elektryczne do zasilania urządzeń elektrycznych, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie pożaru*, Grupa MEDIUM Sp. z o.o. Sp. k., Warszawa 2016.
3. Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa 1979.
4. Wiśniewski S., S. Wiśniewski T.S.: *Wymiana ciepła*, Wydawnictwo WNT 2012.
5. Kittel. Ch.: *Introduction to Solid-State Physics*, John Wiley and Sons Inc., New York 1976.
6. Hanzelka Z.: *Jakość dostawy energii elektrycznej, zaburzenia wartości skutecznej napięcia*, Wydawnictwo Akademii Górniczo – Hutniczej, Kraków 2013.
7. Gogół W.: *Wymiana ciepła, tablice i wykresy*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej 1984.
8. Katalog producenta kabli TF Kable (edycja IX 2009).
9. Katalog producenta kabli DRUT PLAST Sp. z o.o. (wersja 7.0).
10. Katalog produktów FUMO Ostrzeszów Sp. z o.o. (ważny 07.2017r.).
11. Katalog produktów Leszczyńskiej Fabryki Pomp Sp. z o.o. (ważny 07.2017 r.).
12. www.copperlince.pl; ·Stefan Fasbinder – Praktyczne zastosowania materiałów przewodzących, Niemiecki Instytut Miedzi, Maj 2010 r.

## HEAT EXPLOSIVES IN ELECTRICAL INSTALLATION IN EMERGENCY WORKING CONDITIONS CONCERNING EXTERNAL CONDITIONS

### Abstract

*The article deals with the phenomena related to the electrical conductivity of conductive conductors of cables exposed to temperatures similar to the thermal conditions occurring during the fire. On an example of the heat transmission from the fire through by the conduit of the cable duct to the cable, an increase in the resistance of the conductor of the electric cable was evaluated.*

Autorzy:

dr hab. inż. **Dionizy Saniawa** prof. nadzw. UTH Rad. – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, e-mail: d.saniawa@uthrad.pl

e-mail: a.szafraniec@uthrad.pl

mgr inż. **Bogdan Perka** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechnik, email: perkab@interia.pl

dr inż. **Andrzej Szafraniec** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, e-mail: a.szafraniec@uthrad.pl