

Analiza wpływu temperatury elektrody środkowej na rezystywność izolatora świecy zapłonowej

Streszczenie. Wysoka temperatura w komorze spalania jest przyczyną obniżenia rezystywności izolatora świecy zapłonowej. Zjawisko to prowadzi do wzrostu natężenia prądu upływu i wyższego prawdopodobieństwa występowania wypadania zapłonów. W treści artykułu przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu rezystywności materiału ceramicznego izolatora świecy zapłonowej w funkcji temperatury elektrody środkowej. Uwzględniono trzy następujące przypadki: uruchamianie zimnego silnika przy temperaturze płynu chłodzącego równej 0°C, działanie świecy w temperaturze samooczyszczania stożka izolatora 450°C oraz efekt przegrzania świecy zapłonowej przy temperaturze 950°C. Wyniki symulacji komputerowej wskazują na ponad trzykrotnie niższą rezystywność materiału ceramicznego w obrębie dolnej części elektrody środkowej w warunkach przegrzania świecy zapłonowej w stosunku do temperatury samooczyszczania równej 450°C.

Abstract. The high temperature in a combustion chamber reduces the resistivity of a spark plug insulator. This phenomenon leads to an increase in the leakage current resulting in higher probability of misfire effect. This paper presents some results of calculations of temperature-dependent resistivity distribution in the ceramic material of a spark-plug insulator with respect to the temperature of center electrode. The following three cases were considered: cold engine start at coolant temperature 0°C, spark plug operation at self-cleaning temperature of 450°C, and spark plug overheating effect at 950°C. The results of computer simulation show more than three times lower resistivity of the ceramic material in the lower part of the center electrode of overheated spark plug than at the self-cleaning temperature of 450°C. (**Analysis of the effect of center electrode temperature on electrical resistivity of spark - plug insulator**).

Słowa kluczowe: automatyka, elektronika i elektrotechnika, świeca zapłonowa, izolator ceramiczny, układy zapłonowe

Keywords: automation, electronic and electrical engineering, spark plug, ceramic insulator, ignition systems

Wstęp

Podstawowym zadaniem świec zapłonowych jest zainicjowanie zapłonu sprężonej mieszanki paliwowej - powietrznej w komorze spalania silnika. Na skuteczność zapłonu mają zasadniczy wpływ warunki, w jakich funkcjonują świece. W pierwszym rzędzie jest to wysokie ciśnienie w komorze spalania, które w przypadku spalania stukowego może przekraczać 100 MPa [1]. Istotny jest również przedział zmian temperatury od około minus kilkudziesięciu do plus kilkuset stopni Celsjusza [2, 3]. Z uwagi na przepływ ciepła różnica między temperaturą elektrody środkowej, nagrzewającej izolator świecy od wewnątrz wskutek przewodzenia ciepła, i temperaturą zewnętrzną jego powierzchni nie zawsze jest wartością stałą. Temperatura elektrody środkowej zależy bowiem od szeregu czynników, w tym od prędkości obrotowej i obciążenia silnika [4]. Uwzględniając proces uruchamiania silnika, stopniowe nagrzewanie, jak również jego pracę w warunkach zmieniającego się obciążenia, warto rozważyć problem zmieniającej się temperatury elektrody środkowej i jej wpływ na rezystywność izolatora. Biorąc pod uwagę zależność rezystywności materiału ceramicznego od temperatury, różnica między temperaturą wewnętrzną i zewnętrzną powierzchni izolatora nie pozostaje bez wpływu na właściwości elektryczne izolatora.

Aby przeciwdziałać niekorzystnemu zjawisku wypadania zapłonów, konieczne jest zapewnienie wystarczająco wysokiej rezystywności izolatora ceramicznego w szerokim zakresie zmian temperatury izolatora. W treści artykułu przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu rezystywności materiału ceramicznego izolatora świecy zapłonowej w funkcji temperatury elektrody środkowej.

Metoda badań symulacyjnych rezystywności izolatora świecy zapłonowej

Izolatory świec zapłonowych wykonane są z materiału ceramicznego zawierającego ponad 90% tlenku aluminium, którego rezystywność w temperaturze pokojowej wynosi od $1 \cdot 10^{14}$ do $1 \cdot 10^{16}$ Ω m [5]. Działaniu świec zapłonowych w warunkach tak niskiej temperatury towarzyszy zwykle zanieczyszczenie powierzchni stożka izolatora produktami spalania prowadzące niejednokrotnie

do mostkowania elektrod i wypadania zapłonów. Jest więc pożądanym szybki wzrost temperatury stożka izolatora świecy do około 450°C umożliwiającej wypalenie zanieczyszczeń i samooczyszczenie jego powierzchni. Efektem ubocznym nagrzewania świecy jest jednak spadek rezystywności materiału ceramicznego. W rezultacie maleje rezystancja skrośna izolatora świecy prowadząc do wzrostu natężenia prądu upływu. Uwaga ta dotyczy szczególnie tych fragmentów izolatora, w przypadku których grubość materiału ceramicznego oddzielającego elektrodę środkową od korpusu świecy jest niewielka.

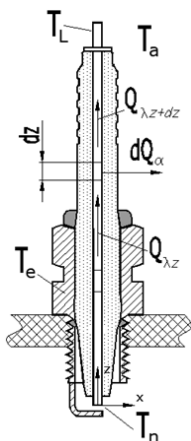
Obliczenia mające na celu przedstawienie wpływu temperatury elektrody środkowej świecy na rezystywność materiału ceramicznego izolatora podzielono na dwa etapy. Pierwszy polegał na określeniu rozkładu temperatury materiału izolatora z uwzględnieniem rozkładu temperatury wzdłuż elektrody środkowej świecy. W ramach etapu drugiego zbudowano model matematyczny ilustrujący zależność rezystywności materiału ceramicznego izolatora od jego temperatury w danym punkcie.

Biorąc pod uwagę umiejscowienie świecy zapłonowej i warunki jej pracy (wysoka temperatura dolnej części elektrody środkowej otoczonej przez stożek izolatora wewnątrz komory spalania), problemem kluczowym jest wyznaczenie rozkładu temperatury wzdłuż elektrody środkowej. Rysunek 1 przedstawia widok świecy i oznaczenia wielkości fizycznych na potrzeby analizy procesu przewodzenia ciepła przez elementy elektrody środkowej.

Bilans cieplny elektrody środkowej, stanowiący punkt wyjścia na drodze wyznaczania rozkładu jej temperatury, należy rozpatrzyć w aspekcie przewodzenia ciepła (prawo Fouriera) oraz jego przenikania do otoczenia (prawo Newtona). Ciepło Q_α przekazywane z elektrody do otaczającego środowiska, zgodnie z prawem Newtona, wyraża zależność:

$$(1) \quad dQ_\alpha = \alpha U (T - T_o) dz$$

gdzie: α – współczynnik wnikania ciepła do otaczającego środowiska, U – obwód elektrody środkowej, T_o – temperatura otoczenia.



Rys.1. Opis mechanizmu przewodzenia ciepła przez elektrodę środkową świecy zapłonowej

Zapisując bilans cieplny elementu elektrody o długości dz w postaci:

$$(2) \quad Q_{\lambda z} = Q_{\lambda z+dz} + dQ_{\alpha}$$

gdzie $Q_{\lambda z}$ – ciepło przewodzone przez elektrodę, Q_{α} – ciepło oddawane do otoczenia, i korzystając z prawa Fouriera oraz wzoru (1), bilans cieplny można wyrazić za pomocą równania Poissona w następującej postaci:

$$(3) \quad \frac{d^2 T}{dz^2} = \frac{\alpha U}{\lambda S} (T - T_o)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału elektrody, S – pole przekroju poprzecznego elektrody.

Przyjęto założenie, że górny koniec elektrody środkowej o temperaturze T_L nie jest izolowany termicznie (obowiązuje wartość α_L współczynnika wnikania ciepła do powietrza otaczającego górną część izolatora świecy), co oznacza konieczność wprowadzenia warunku brzegowego Robina:

$$(4) \quad -\lambda S \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=L} = S \alpha_L (T_L - T_o)$$

Rozwiązanie równania (3) uwzględniające warunek brzegowy (4) pozwala wyznaczyć rozkład temperatury elektrody środkowej o średnicy d wzdłuż osi z zgodnie z następującą zależnością:

$$(5) \quad T(z) = (T_n - T_o) \frac{\cos h(m(L-z)) + \frac{\alpha_L}{m\lambda} \sin h(m(L-z))}{\cos h(mL) + \frac{\alpha_L}{m\lambda} \sin h(mL)} + T_o$$

gdzie: T_n – temperatura stożka izolatora równa temperaturze dolnej części elektrody środkowej znajdującej się w obrębie komory spalania, oraz:

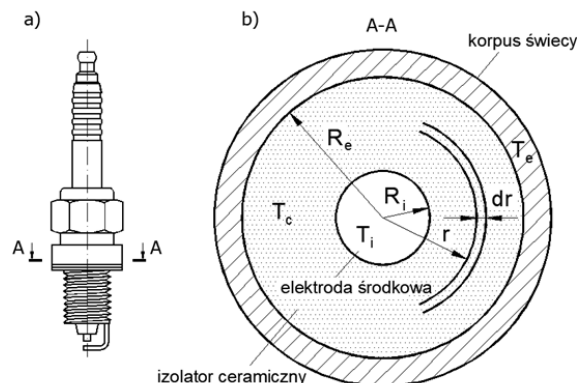
$$(6) \quad m = \sqrt{\frac{4\alpha}{d \cdot \lambda}}$$

Temperatura otoczenia, przyjęta do obliczeń, zależy od współrzędnej z i będzie równa odpowiednio temperaturze stożka izolatora T_n dla dolnej części elektrody środkowej, temperaturze silnika T_e w obszarze wewnątrz metalowego korpusu świecy oraz temperaturze powietrza T_a otaczającego górną część izolatora.

Celem dalszych rozważań jest przedstawienie rozkładu rezystywności izolatora ceramicznego z uwzględnieniem temperatury wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni izolatora. Punktem wyjścia jest otrzymanie rozkładu temperatury materiału ceramicznego T_c na podstawie równania przewodzenia ciepła, które w przypadku ciał stałych, pozbawionych wewnętrznych źródeł ciepła, sprowadza się do równania Laplace'a [6]:

$$(7) \quad \nabla^2 T_c = 0$$

Przyjmując następujące założenia: górna część izolatora ponad stożkiem ma kształt walca, temperatura wewnętrznej powierzchni izolatora T_i jest równa temperaturze elektrody środkowej, a temperatura zewnętrznej powierzchni izolatora otoczonej przez korpus świecy – temperaturze silnika T_e , rozkład temperatury izolatora dogodnie jest analizować i przedstawić w płaszczyźnie jego przekroju poprzecznego jak na rysunku 2. Jako przykład wybrano przekrój świecy zapłonowej w miejscu oznaczonym jako A-A na rysunku 2a.



Rys.2. Przekrój poprzeczny świecy zapłonowej w aspekcie analizy rozkładu temperatury izolatora

Uwzględniając oznaczenia z rysunku 2b, rozwiązanie równania (7), pozwalające określić rozkład temperatury wewnątrz izolatora, ma następującą postać [7]:

$$(8) \quad T_c(r) = \frac{T_i - T_e}{\ln R_i - \ln R_e} \cdot \ln r + \frac{T_e \cdot \ln R_i - T_i \cdot \ln R_e}{\ln R_i - \ln R_e}$$

Z kolei zależność rezystywności izolatora od temperatury wyraża równanie:

$$(9) \quad (T) = \rho_0 \cdot e^{-\alpha_T (T_c - T_{ref})}$$

gdzie T_{ref} oznacza temperaturę równą 300 K, a α_T jest współczynnikiem temperaturowym rezystywności tlenku aluminium równym 0,02 1/K [8].

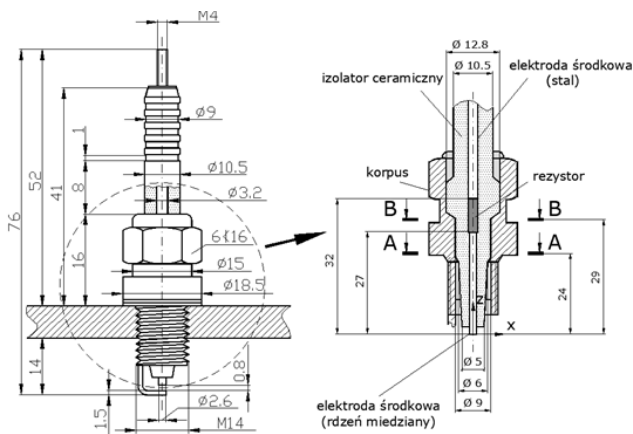
Po podstawieniu równania (8) do równania (9) i dokonaniu szeregu przekształceń algebraicznych równanie rozkładu rezystywności izolatora można zapisać w następującej formie:

$$(10) \quad \rho(r) = \left(\frac{r}{R_e} \right)^{\alpha_T \frac{T_i - T_e}{\ln \frac{R_e}{R_i}}} \cdot \rho_0 e^{-\alpha_T (T_e - T_{ref})}$$

Równanie (10) wykorzystano jako model matematyczny pozwalający na wyznaczenie rozkładu rezystywności izolatora w funkcji temperatury elektrody środkowej w ustalonym stanie cieplnym.

Wyniki badań symulacyjnych rozkładu temperatury i rezystywności izolatora

Przedmiotem badań symulacyjnych był model świecy zapłonowej, której kształt i wymiary przedstawiono na rysunku 3. Obliczenia rozkładu temperatury elektrody środkowej przeprowadzono dla przypadku świecy z rezystorem przeciwzakłóceniovym i w wersji bez rezystora. Z kolei na potrzeby badań rozkładu rezystywności izolatora wybrano dwa miejsca oznaczone za pomocą przekrojów A-A i B-B. Przekrój A-A dotyczy dolnej części elektrody środkowej, która składa się z rdzenia miedzianego ostioniętego cienką warstwą wykonaną ze stopu niklu. Przekrój B-B obejmuje rezystor przeciwzakłóceniovym ze szkła borokrzemowego.



Rys.3. Model świecy zapłonowej wykorzystany w badaniach symulacyjnych

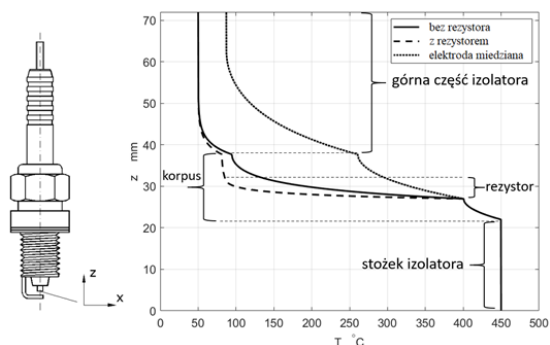
Lokalizacja przekrojów A-A i B-B dotyczy miejsc, w których grubość ścianki cylindrycznej izolatora oddzielającego elektrodę środkową od korpusu świecy jest najmniejsza.

W tabeli 1 zestawiono stałe materiałowe wykorzystane na potrzeby obliczeń [2, 5, 7, 8].

Tabela 1. Stałe materiałowe wykorzystane do obliczeń rozkładu rezystywności izolatora w funkcji temperatury

stała materiałowa	Wartość	Jednostka
przewodność cieplna miedzi, $T = 300 \text{ K}$	401	W/mK
przewodność cieplna miedzi, $T = 600 \text{ K}$	383	W/mK
przewodność cieplna miedzi, $T = 1200 \text{ K}$	339	W/mK
przewodność cieplna stali (NiCrFe) $T = 300 \text{ K}$	30	W/mK
przewodność cieplna szkła borokrzemowego, $T = 573 \text{ K}$	1,37	W/mK
współczynnik wnikania ciepła do nieruchomego powietrza	4,5	W/m ² K
współczynnik wnikania ciepła metal - materiał ceramiczny	3000	W/m ² K
współczynnik wnikania ciepła szkło - materiał ceramiczny	1000	W/m ² K
rezystywność Al_2O_3 , $T = 300 \text{ K}$	$1 \cdot 10^{12}$	Ωm

W celu zbadania zmian rezystywności izolatora spośród wielu możliwych wybrano trzy następujące przypadki: działanie świecy przy temperaturze stożka izolatora 100°C krótko po uruchomieniu zimnego silnika, którego temperatura wynosi 0°C , osiągnięcie temperatury samooczyszczania stożka izolatora 450°C w warunkach ustalonej temperatury silnika równej 80°C , oraz wpływ efektu przegrzania świecy zapłonowej (temperatura stożka izolatora 950°C). Obliczenia przeprowadzono przy pomocy oprogramowania MATLAB 2020a.

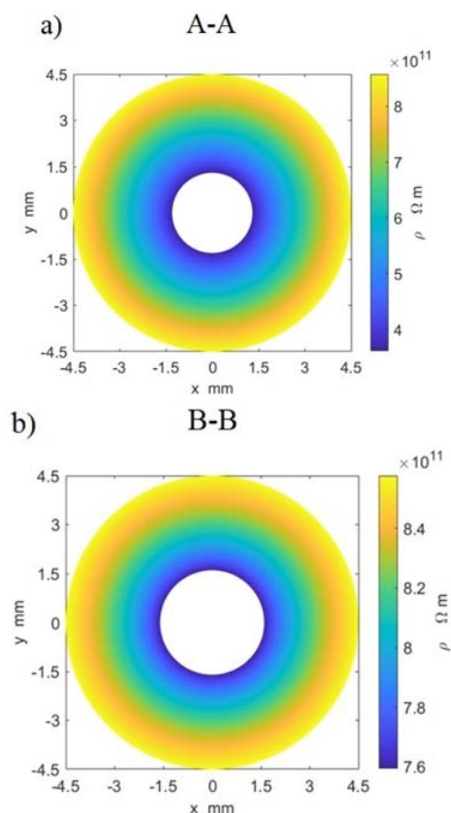


Rys.4. Rozkład temperatury wzdłuż elektrody środkowej świecy zapłonowej

Na rys. 4 przedstawiono wyniki symulacji rozkładu temperatury wzdłuż elektrody środkowej świecy zapłonowej. Przyjęto temperaturę stożka izolatora równą 450°C .

Obliczenia przeprowadzono dla trzech przypadków – świecy z rezystorem i dolną częścią elektrody środkowej zawierającą rdzeń miedziany oraz górną częścią ze stali, świecy w wersji bez rezystora, ale o podobnej konstrukcji zespołu elektrody środkowej, oraz świecy, której elektroda środkowa jest w całości miedziana. Aby górna część elektrody środkowej miała większą wytrzymałość, jest ona wykonana ze stali, której przewodność cieplna jest znacznie niższa niż miedzi (tab. 1). Obecność rezystora przeciwnieutrudnia dodatkowo przepływ ciepła wzdłuż elektrody środkowej. Dzięki temu temperatura zacisku elektrody środkowej jest na poziomie temperatury otaczającego powietrza (około 50°C). Gdyby elektroda środkowa była wykonana w całości z miedzi, temperatura jej zacisku przekroczyłaby 80°C .

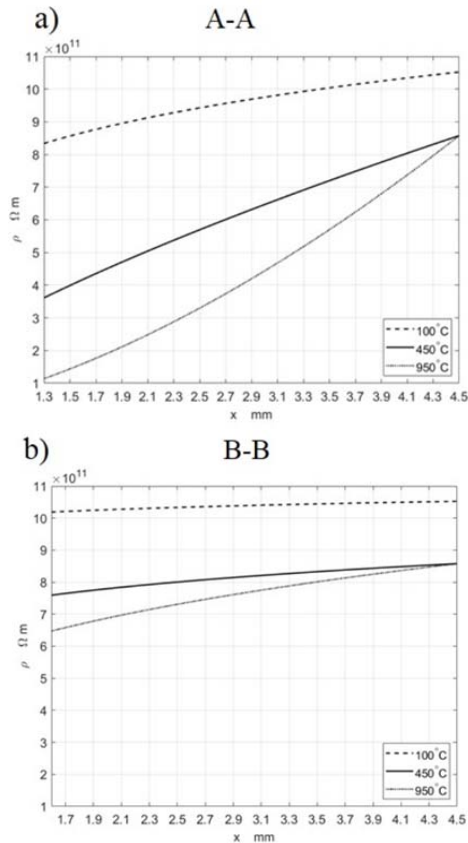
Korzystając z równania (10) dokonano symulacji rozkładu rezystywności izolatora świecy zapłonowej w warunkach temperatury samooczyszczania stożka równej 450°C . Podobnie jak w pracy [9], poświęconej badaniom właściwości materiałów izolacyjnych przewodów wysokiego napięcia, na potrzeby prezentacji rezultatów obliczeń posłużono się metodą przekrojów poprzecznych. Wyniki odpowiadające temperaturze elektrody środkowej, wyznaczonej przy pomocy równania (5) w miejscach oznaczonych jako przekroje A-A i B-B, przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Rozkład rezystywności izolatora świecy zapłonowej przy temperaturze stożka równej 450°C

Obecność rezystora ze szkła borokrzemowego utrudnia przepływ ciepła, czego efektem jest widoczna na rysunku 5b wyższa rezystywność izolatora ceramicznego w stosunku do wyników odpowiadających otoczeniu części elektrody środkowej z rdzeniem miedzianym (przekrój A-A). Wyniki symulacji rozkładu rezystywności materiału ceramicznego w miejscach oznaczonych jako przekroje A-A

i B-B dla przypadków temperatury stożka izolatora równej 100°C, 450°C i 950°C przedstawiono na rysunku 6. Temperatura elektrody środkowej dla współrzędnej $z = 24$ (przekrój A-A na rys. 3) wynosiła odpowiednio: 91°C, 418°C i 869°C. Z kolei dla $z = 29$ i przekroju B-B temperatura rezystora była równa odpowiednio: 12,7°C, 127,6°C i 190°C. Symulację rozkładu rezystywności przy temperaturze stożka izolatora równej 100°C przeprowadzono przy założeniu, że temperatura płynu chłodzącego wynosi 0°C, co odpowiada warunkom tuż po uruchomieniu zimnego silnika.



Rys.6. Rozkład rezystywności izolatora przy zróżnicowanej temperaturze jego stożka

Wysoka rezystywność izolatora przy temperaturze stożka izolatora równej 100°C, znacznie przekraczająca $8 \cdot 10^{11} \Omega \cdot m$, wskazuje na dobre właściwości izolacyjne materiału ceramicznego, co jest istotne z uwagi na fakt, że stożek świecy nie osiągnął jeszcze temperatury samooczyszczania. Wyniki otrzymane dla temperatury stożka 450°C i 950°C dotyczą temperatury nagrzanego silnika równej 80°C. Temperatura stożka izolatora 950°C wskazuje na przegrzanie świecy zapłonowej, którego przyczyną może być jej niewłaściwa wartość cieplna.

Podsumowanie

Ponad trzykrotnie niższa rezystywność materiału ceramicznego w obrębie dolnej części elektrody środkowej zawierającej rdzeń miedziany wskutek przegrzania świecy przy temperaturze 950°C w stosunku do rezystywności przy temperaturze stożka 450°C oznacza znaczące pogorszenie właściwości izolacyjnych materiału ceramicznego. Obniżona rezystywność izolatora prowadzi do wzrostu wartości składowej skrośnej natężenia prądu upływu. Wzrost natężenia tej składowej prądu upływu w powiązaniu z nasileniem oddziaływania innych czynników mających wpływ na obniżenie energii wyładowania między elektrodami świecy może prowadzić do zjawiska sporadycznego lub ciągłego wypadania zapłonów. Symulację rozkładu rezystywności przeprowadzono uwzględniając ogólnie dostępne stałe materiałowe miedzi, stali, szkła borokrzemowego i tlenku aluminium. Dokładne dane dotyczące materiałów użytych do produkcji poszczególnych komponentów świec zapłonowych z reguły nie są publikowane przez producentów i mogą różnić się od przyjętych do obliczeń.

Autor: dr inż. Bernard Fryśkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno - Pomiarowych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: bernard.fryskowski@ee.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Qi Y., Wang B., Wang Z., Impact Resistance of Spark Plug's Ceramic Insulator During Ultra-high-Pressure Combustion under Detonant Conditions, *Automotive Innovation*, 2 (2019), 137-145
- [2] Carter C., Norton M., *Ceramic Materials*, Springer, New York, 2016
- [3] Goodnight N., VanGelder K., *Automotive Engine Performance*, Jones & Bartlett Learning, Burlington, 2019
- [4] Javan S., Hosseini S. V., Alaviyoun S. S., An Experimental Investigation of Spark Plug Temperature in Bi-fuel Engine and Its Effect on Electrode Erosion, *International Journal of Automotive Engineering*, 2 (2012), 21-29
- [5] Auerkari P., Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics, *VTT Technical Research Centre of Finland, Research Notes*, 1792, Espoo, 1996
- [6] Böckh P., Wetzel T., *Heat Transfer. Basics and Practice*, Springer, Berlin, 2012
- [7] Lienhard J. H., *A Heat Transfer Handbook*, J. H. Lienhard V, Massachusetts, USA, 2001
- [8] Shackelford J. F., Alexander W., *Materials Science and Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, 2001
- [9] Yang L., Qiu W., Huang J., Hao Y., Fu M., Hou S., Li L., Comparison of Conductor-Temperature Calculations Based on Different Radial-Position-Temperature Detections for High-Voltage Power Cable, *Energies*, 11 (2018), 1-17