

## Analiza przepływu gazu w kanałowych reduktorach ciśnienia podczas zwarć łukowych w rozdzielnicach SN

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę obliczania ciśnienia i temperatury gazów podczas zwarcia łukowego wewnątrz przedziału wyłącznika rozdzielnic średniego napięcia z wykorzystaniem modelu termodynamicznego procesów towarzyszących zwarciom łukowym wewnątrz rozdzielnic z izolacją powietrzną. Następnie, w oparciu o mechanikę płynów lepkich, przedstawiono metodę obliczania rozkładu prędkości i ciśnienia gazu w kanałowych reduktorach ciśnienia podczas zwarcia łukowego. W obliczeniach uwzględniono dwa rodzaje kanałów: kanał prosty pionowy, zapewniający wypływ gazu do obszaru znajdującego się nad rozdzielnicą oraz kanał pionowo-poziomy umożliwiający wypływ gazu do przestrzeni znajdującej się z tyłu rozdzielnic. Na podstawie średniej prędkości wypływu na wylocie kanału porównano skuteczność redukcji ciśnienia dla dwóch analizowanych konstrukcji kanałów.

**Abstract.** The following article describes the calculation method of pressure and gas temperature during fault arc inside circuit breaker compartment of medium voltage switchgear. The calculations were made using the thermodynamic model processes, which accompany fault arcs inside air-insulated enclosed switchgears. Subsequently, based on viscous fluid mechanics, the calculation method of velocity and gas pressure distribution in pressure relief duct during fault arc was presented. Performed calculations considered two types of pressure relief ducts: straight vertical duct, which ensures gas exhaust to the area located above the switchgear and vertical-horizontal duct, which ensures gas exhaust to the area located behind the switchgear. The effectiveness of pressure reduction for two types of ducts was compared on the basis of the average exhaust velocity at the outlet of the duct. (The analysis of gas flow through pressure relief ducts during fault arc inside MV switchgears).

**Słowa kluczowe:** rozdzielnice osłonięte, łuk zwarciovowy, ciśnienie gazów, redukcja ciśnienia.

**Keywords:** enclosed assembly of switchgear, fault-arc, gas pressure, pressure reduction.

### Wstęp

Podczas zwarć łukowych wewnątrz rozdzielnic osłoniętych z izolacją powietrzną następuje szybkie nagrzewanie powietrza w przestrzeni dookoła łuku, a w wyniku tego – wzrost ciśnienia i temperatury gazów.

Wzrost ciśnienia może spowodować odkształcenie osłon i drzwi, jak również uszkodzenie ich mocowania. Przez uszkodzone osłony może nastąpić wypływ gorących i zjonizowanych gazów, stwarzając poważne zagrożenie dla osób obsługi oraz pomieszczenia rozdzielnic. Dlatego też rozdzielnice powinny być bezpieczne i maksymalnie ograniczać skutki zwarć łukowych. Powinny charakteryzować się odpowiednią wytrzymałością mechaniczną, a osłony i drzwi oraz ich mocowania nie powinny ulec uszkodzeniu. W tym celu rozdzielnice powinny być wyposażone w reduktory ciśnienia w postaci szczelin lub kanałów wypływowych, gwarantujących wypływ gazów w kierunku bezpiecznym [1]. W zależności od wielkości pomieszczenia, w którym zainstalowano rozdzielnicę, wypływ gazu może być ukierunkowany pionowo lub poziomo. Wypływ w kierunku poziomym dotyczy szczególnie rozdzielnic instalowanych w pomieszczeniach ograniczonych wysokością do sufitu, w których nie ma możliwości kierowania gazów bezpośrednio nad rozdzielnicę.

Ciśnienie i temperatura gazów podczas zwarcia łukowego wewnątrz rozdzielnic zależą od szeregu czynników, takich jak: objętość przedziału (bez wyposażenia), geometria szyn, moc łuku oraz pole przekroju poprzecznego kanału wypływowego [2, 3].

Przy prądach zwarciovowych do ok. 25 kA i mocach zwarć łukowych w granicach do ok. 40 MW, dla typowych konstrukcji rozdzielnic wyposażonych w reduktory ciśnienia, maksymalne nadciśnienia w rozdzielnicach nie przekraczają 80 kPa.

### Ciśnienie gazu wewnątrz rozdzielnic podczas zwarcia łukowego

Ciśnienie oraz temperaturę gazów w przedziale wyłącznika rozdzielnic obliczono na podstawie układu równań (1), wg [2]

$$(1) \quad \frac{dp}{dt} = \frac{R_i}{cV} \left[ \frac{k_p P_L + (0,094T^2 + 682T_0) C_2}{0,188T - 0,094T_0 + 682} \right]$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R_i T}{cVp} \left[ \frac{k_p P_L - (0,094T + 682)(T - T_0) C_2}{0,188T - 0,094T_0 + 682} \right]$$

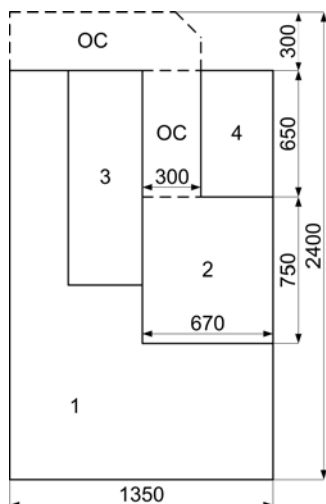
gdzie:  $p$  – ciśnienie,  $t$  – czas,  $c$  – współczynnik objętości,  $R_i$  – uniwersalna stała gazowa,  $R_i = 287 \text{ J/(kgK)}$ ,  $V$  – objętość przedziału,  $k_p$  – współczynnik mocy, określający udział mocy łuku zużytkowanej na podgrzanie powietrza i jego wypływ,  $P_L$  – moc łuku,  $T$  – temperatura,  $T_0$  – temperatura początkowa,  $T_0 = 300 \text{ K}$ . Stała  $C_2$  wyrażona jest zależnością

$$(2) \quad C_2 = \frac{dm}{dt} =$$

$$= -\alpha A p \sqrt{\frac{2\kappa}{R_i T (\kappa - 1)}} \sqrt{\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}$$

przy czym:  $m$  – masa gazu wypływającego z rozdzielnic,  $A$  – pole przekroju poprzecznego kanału wypływowego,  $\alpha$  – współczynnik przekroju kanału wypływowego,  $\kappa$  – stosunek ciepła właściwego powietrza przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości,  $\kappa = 1,4$ ,  $p_0$  – ciśnienie normalne,  $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ . Wartości współczynników  $k_p$ ,  $c$  i  $\alpha$  wyznaczono eksperymentalnie.

Do obliczeń przyjęto następujące wartości: moc łuku  $P_L = 37,5 \text{ MW}$  – wg [2], przy prądzie łuku  $I_L$ , równym prądowi zwarciovemu początkowemu  $I_k''$ , o wartości 25 kA i napięciu łuku  $U_L = 937 \text{ V}$  – wg [2], współczynnik  $k_p = 0,5$ , objętość przedziału wyłącznika  $V = 0,35 \text{ m}^3$ , współczynnik objętości  $c = 0,6$ , pole przekroju poprzecznego kanału wypływowego  $A = 0,21 \text{ m}^2$ , współczynniki  $\alpha$ : dla kanału pionowego (prostego) –  $\alpha = 0,94$ , dla kanału pionowo-poziomego (zakrzywionego) –  $\alpha = 0,86$  [2]. Przykładowy przekrój pola rozdzielnic średniego napięcia przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny dwuczłonowego pola analizowanej rozdzielnicy średniego napięcia: 1 – przedział przyłączeniowo-kablowy, 2 – przedział wyłącznikowy, 3 – przedział szyn zbiorczych, 4 – przedział aparatury sterowniczej, OC – kanałowy reduktor ciśnienia; szerokość pola 700 mm

W tab.1 przedstawiono wyniki obliczeń ciśnienia, temperatury oraz gęstości gazu, niezbędne w analizie przepływu gazu przez reduktor ciśnienia.

Tabela 1. Wyniki obliczeń ciśnienia, temperatury oraz gęstości gazu ( $p_{max}$  – maksymalne ciśnienie,  $T_{max}$  – maksymalna temperatura,  $t_{max}$  – czas wystąpienia maksymalnego ciśnienia i temperatury,  $\rho_{pmax}$  – gęstość gazu przy maksymalnym ciśnieniu)

	$p_{max}$ [kPa]	$T_{max}$ [K]	$t_{max}$ [ms]	$\rho_{pmax}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Kanał pionowy	171,8	2046	5,0	0,814
Kanał poziomo-pionowy	179,2	2223	5,4	0,812

### Analiza przepływu gazu przez reduktor ciśnienia

Parametrem decydującym o skuteczności odciążania (redukcji ciśnienia) jest natężenie przepływu gazu, definiowane jako ilość gazu przepływającego przez określoną powierzchnię w jednostce czasu przy danym ciśnieniu i temperaturze gazu. Skuteczność odciążania zależy nie tylko od przekroju wypływu reduktora ciśnienia, ale również od jego geometrii [2].

W analizie przepływów prędkość wypływu może być mniejsza, równa lub większa od lokalnej prędkości dźwięku w gazie i zależy m.in. od jego ciśnienia i temperatury. Z kolei prędkość dźwięku zależy od prędkości przepływu gazu i jest równa zero przy rozprężaniu gazu w próżnię, przy czym prędkość przepływu gazu osiąga wartość maksymalną. Przy zwiększaniu prędkości przepływu od zera do prędkości maksymalnej, prędkość dźwięku zmniejsza się od wartości maksymalnej do zera. Przekrój, w którym prędkość przepływu jest równa miejscowej prędkości dźwięku nazywany jest przekrojem krytycznym, a parametry określające stan gazu w tym przekroju nazywane są parametrami krytycznymi.

W analizie przepływu gazu z rozdzielnicy przez reduktory ciśnienia stosuje się zależności ogólnie przyjęte w analizie przepływu gazu ze zbiornika przez dyszę zbieżną [4,5], przy czym charakter przepływu zależy od stosunku ciśnienia gazu wewnątrz rozdzielnicy  $p$  do ciśnienia normalnego  $p_0$ . Uwzględniając zależności między parametrami przemiany izentropowej ciśnienie krytyczne  $p_{kr}$ , wg [6], wynosi

$$(3) \quad p_{kr} = p \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

gdzie:  $\kappa = c_p c_v^{-1}$ , dla powietrza  $\kappa = 1,4$ . Podstawiając  $\kappa = 1,4$  ciśnienie krytyczne wynosi

$$(4) \quad p_{kr} = 0,53 p$$

W przypadku, gdy  $p_{kr} > p_0$  rozprężanie gazu od ciśnienia krytycznego do ciśnienia otoczenia odbywa się gwałtownie, wywołując falę dźwiękową. W odniesieniu do zależności (4) taki przepływ ma miejsce, gdy  $p > 1,89 p_0$ . Występowanie tak dużych ciśnień wewnątrz rozdzielnic podczas zwarć łukowych mogłoby spowodować uszkodzenie mechaniczne drzwi i osłon [7]. Dlatego też w rozdzielnicach osłoniętych z izolacją powietrzną reduktory ciśnienia są z reguły tak projektowane, aby przepływ gazów odbywał się w warunkach, gdy ciśnienie  $p < p_{kr}$ .

Na podstawie obliczonych wartości temperatury gazu podczas zwarcia w przedziale wyłącznika rozdzielnicy można obliczyć prędkość krytyczną wypływu gazu  $v_{kr}$ , zgodnie z zależnością (5), wg [6]

$$(5) \quad v_{kr} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} R_i T}$$

Wartości prędkości krytycznych  $v_{kr}$  (przy temperaturze  $T_{max}$ ) wynoszą odpowiednio: dla kanału pionowego – 827,7 m/s, dla kanału pionowo-poziomego – 862,8 m/s.

Wg [8] ogólne zasady formułowania zadań dynamiki płynów niutonowskich polegają na określeniu pól: prędkości  $v(x, y, z, t)$ , ciśnienia  $p(x, y, z, t)$ , gęstości  $\rho(x, y, z, t)$  i temperatury  $T(x, y, z, t)$ . Stan gazu może być opisany równaniami gazodynamiki:

- ciągłości (równanie zachowania masy)

$$(6) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

- zachowania pędu (równanie Naviera-Stokes'a)

$$(7) \quad \frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \mathbf{F}_{jm} - \nabla(p + \mu_D \nabla \cdot \mathbf{v}) + \mu_D \nabla^2 \cdot \mathbf{v} + \frac{\mu_D}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- zachowania energii

$$(8) \quad \rho c_v \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + \dot{D} + \dot{w}$$

- stanu

$$(9) \quad f(p, \rho, T) = 0$$

gdzie:  $\mathbf{v}$  – wektor prędkości gazu,  $\mathbf{F}_{jm}$  – wektor siły masowej,  $\mu_D$  – współczynnik lepkości dynamicznej,  $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła,  $\dot{D}$  – intensywność dyssypacji energii kinetycznej,  $\dot{w}$  – intensywność wewnętrznych źródeł ciepła.

W równaniu (6) dywergencja prędkości określa szybkość zmiany objętości (właściwej) gazu podczas jego przepływu przez kanał [8]

$$(10) \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}$$

i przy stałej gęstości gazu jest równa zero.

Przyjęto dalsze założenia upraszczające:

- gaz nie zawiera wewnętrznych źródeł ciepła i jest nie przewodzący (nie oddaje ani nie pobiera ciepła),  $\dot{w} = 0$  [2],
- rozpraszanie energii kinetycznej nie występuje. Przyjęto  $\dot{D} = 0$  uwzględniając fakt, iż podczas przepływu, ze względu

na bardzo małe wartości współczynnika lepkości kinematycznej oraz stosunkowo małe prędkości przepływu, między innymi energia tarcia jest pomijalnie mała [8],  
 - siły masowe, najczęściej związane z siłą ciężkości, podczas przepływu gazu przy prędkościach podkrytycznych mogą być pominięte i dlatego przyjęto  $F_{jm} = 0$  [9],  
 - współczynnik lepkości kinematycznej przyjęto jako stały [9],  
 - podczas przepływu nie następuje zmiana energii wewnętrznej; dla przepływu adiabatycznego energia całkowita wzdłuż kanału jest niezmienna [10],  
 - pomija się wpływ warstwy przyściennej na przepływ oraz pomija się analizę przepływu w warstwie przyściennej.

Na skutek lepkości naprężenia styczne, równoległe do kierunku przepływu, wpływają na obniżenie prędkości przepływu. O prędkości wewnątrz kanału wypływowego decyduje lepkość kinematyczna oraz turbulencje pochodzące od składowej prędkości, prostopadłej do kierunku przepływu.

Uwzględniając przyjęte założenia równanie Naviera-Stokes'a upraszcza się do równania (11), wg [11]

$$(11) \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu_K \nabla^2 v$$

gdzie:  $\nu_K$  – współczynnik lepkości kinematycznej.

Przy rozwiązywaniu zagadnień dynamiki płynów ciśnienie  $p$  należy obliczać z równania (12), wg [8, 9]

$$(12) \quad \nabla^2 p + \rho \frac{\partial}{\partial x} \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial y} \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \frac{\nu_K \rho}{L^2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = 0$$

gdzie:  $L$  – średnia długość drogi przepływu.

W analizie przepływów przez kanały wypływowe uwzględniono przestrzeń dwuwymiarową zakładając, że rozkład prędkości i ciśnienia gazu na całej szerokości kanału jest zbliżony [2].

Przy rozwiązywaniu równań (7) i (12) uwzględniono warunki brzegowe.

#### 1. Ciśnienie $p$ :

- na wlocie kanału wypływowego ciśnienie  $p = p_{max}$ ,
- na wylocie  $p = p_0$ , przy czym  $p_0$  – ciśnienie normalne,
- na ściankach kanału warunki brzegowe są określone równaniem [9]

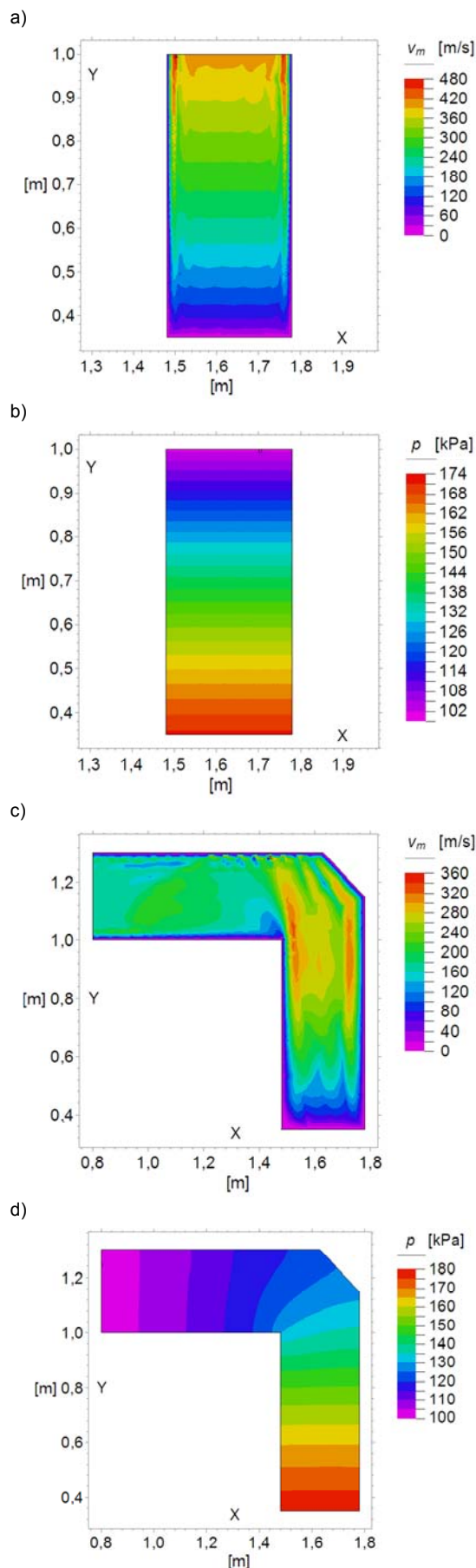
$$(13) \quad \frac{\partial p}{\partial n} = \nu_K \rho \left[ n_x \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + n_y \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) \right] - \rho \left[ n_x \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + n_y \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right]$$

gdzie:  $n_x, n_y$  – wektory składowe jednostkowe normalne.

#### 2. Prędkość :

- na wlocie kanału i na wszystkich ściankach przyjęto składowe prędkości  $v_x = 0$  i  $v_y = 0$  [2],
- na wylocie wg równania (14) na podstawie [9]

$$(14) \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0$$



Rys. 2. Rozkład prędkości oraz ciśnienia przepływającego gazu w reduktorach ciśnienia przy maksymalnym ciśnieniu gazu wewnątrz przedziału wyłącznika; a), b) – kanał pionowy, c), d) – kanał pionowo-poziomy

W analizie dynamiki przepływów przez kanały wypływowe niezbędna jest znajomość wartości ciśnienia oraz gęstości gazu na wlocie kanału wypływowego. Przyjęto wartości gęstości gazu dla maksymalnych wartości ciśnienia wg tab.1. Przy maksymalnym ciśnieniu prędkość przepływu przez kanał wypływowy osiąga również wartość maksymalną.

W wyniku obliczeń, na podstawie równań (11) i (12), otrzymano rozkłady prędkości i ciśnienia wewnątrz analizowanych kanałów wypływowych, które przedstawiono na rys. 2.

Średnie prędkości wypływu gazu na zewnątrz wynoszą odpowiednio:

- dla kanału pionowego:  $v_{śrmax} = 391,0$  m/s,
- dla kanału pionowo-poziomego:  $v_{śrmax} = 172,6$  m/s.

Z obliczeń wynika, że przy ciśnieniach dopuszczalnych w rozdzielnicach podczas zwarcia łukowych wypływ gazu odbywa się zawsze przy prędkościach podkrytycznych. Dlatego też nie występują zjawiska falowe, jednak podczas przepływu w reduktorze ciśnienia mogą powstawać turbulencje.

Nawiązując do wyników obliczeń można stwierdzić, iż: maksymalna średnia prędkość  $v_{śrmax}$  wypływu gazu z kanałowego reduktora ciśnienia (rys. 1), przy tych samych mocach łuku, zależy od pola przekroju poprzecznego kanału oraz jego geometrii. Dla kanału pionowo-poziomego, o większej długości, średnia prędkość wypływu jest mniejsza o ok. 56% w porównaniu do średniej prędkości wypływu gazu z kanału pionowego (krótszego). Wynika to ze znacznego wydłużenia drogi wypływu gazów z przedziału objętego zwarciami oraz turbulencji. W obu przypadkach prędkości te są znacznie mniejsze od prędkości krytycznych.

#### Podsumowanie

W analizowanej rozdzielniczy, przy mocy zwarcia łukowego równej 37,5 MW, maksymalne nadciśnienie gazu wewnątrz przedziału wyłącznika nie przekracza wartości 78 kPa. Wtedy też zagwarantowana jest wytrzymałość mechaniczna drzwi i osłon rozdzielnic.

Na podstawie wyników obliczeń ciśnienia i temperatury gazu podczas zwarcia łukowych wewnątrz rozdzielnic osłoniętych SN można analizować rozkład prędkości i ciśnienia gazu podczas jego przepływu przez reduktory, a

tym samym - skuteczność redukcji ciśnienia zastosowanych reduktorów.

Przedstawione metody obliczeń umożliwiają (w dalszym etapie) wystarczająco dokładnie analizowanie problemów wytrzymałości mechanicznej rozdzielnic osłoniętych, zapewniając tym samym ich bezpieczną eksploatację.

#### LITERATURA

- [1] EN 62271-200:2012 High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV
- [2] Partyka R.: Badanie skutków zwarcia łukowych w rozdzielnicach osłoniętych, Monografie 70, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, (2006), ISBN 83-7348-148-6
- [3] Partyka R., Kowalak D.: Skutki zwarcia łukowych w średnionapięciowych rozdzielnicach okrętowych z izolacją powietrzną, *Przeгляд Elektrotechniczny* (2013), nr 8, 290-293
- [4] Desborough M., Klaus D. W., Crawley D.: Internal faults in distribution switchgear – modelling, implementation and testing of new switchgear designs *CIPRED 97*, Conference Publication (1997), No. 438
- [5] Friberg G., Pietsch G.: Calculation of pressure rise due to arcing faults. *IEEE Transactions on Power Delivery* (1999), Vol. 14, No. 2
- [6] Wiśniewski S.: Termodynamika techniczna, Warszawa: WNT, (1987)
- [7] Partyka R.: Calculation and measurements of deflection of doors from pressure during fault arc inside M. V. switchgears, *Pomiary Automatyka Kontrola* (2003), nr. 12, 77-79
- [8] Gryboś R.: Podstawy mechaniki płynów, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, (1998)
- [9] Backstrom G.: Fields of physics on the PC by Finite Element Analysis, Lund: Chartwell-Bratt, (1994)
- [10] Puzyrewski R., Sawicki J.: Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN (2000)
- [11] Mitosek M.: Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska, Warszawa, PWN (2001)

---

**Autorzy:** dr hab. inż. Roman Partyka, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: [r.partyka@ely.pg.gda.pl](mailto:r.partyka@ely.pg.gda.pl)  
dr inż. Daniel Kowalak, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: [d.kowalak@ely.pg.gda.pl](mailto:d.kowalak@ely.pg.gda.pl)