

Wpływ składowej tętniącej prądu na nagrzewanie elementów mocujących przewody elektryczne

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań procesu nagrzewania wpustów kablowych, wykonanych z materiałów ferromagnetycznych oraz diamagnetycznych, będących elementami mocującymi przewody elektryczne przewodzące prąd stały ze składową tętniącą wynikającą z pracy przekształtnika energoelektronicznego. Ocena wpływu składowej tętniącej na proces nagrzewania stanowi istotny problem zarówno dla konstruktorów urządzeń elektrycznych (zwłaszcza wyposażonych w przekształtniki energoelektroniczne) przy wyborze odpowiednich elementów montażowych, jak również dla jednostek badawczych przy określaniu właściwej metodyki badań procesów nagrzewania. Wyniki badań pokazują potrzebę uwzględnienia specyfiki zasilania podczas badań procesu nagrzewania. Przeprowadzone badania uzupełniono analizą połową strat mocy potwierdzającą słuszność tezy związanej z powstawaniem prądów wirowych we wpustach kablowych.

Abstract. The paper presents results of warming up process of cable glands made of ferromagnetic and diamagnetic materials. The cable glands are used for fixing the electrical cables that conduct the DC current component with additional AC ripple current component that is caused by operation of power electronic converters. The analysis of influence of the AC ripple current component on warming up process is important for both constructors of electrical devices during selection of fixing elements (especially for devices equipped in power electronic converters) and for research institution during developing the procedure for testing this devices as well. Presented results show that it is necessary to take into account the specificity of supply conditions during warming up process. The additional analysis based on FEM method has been carried out that proves that AC ripple current components effects the eddy currents in cable glands. (The influence of AC ripple current component on warming up process of fixing cable elements).

Słowa kluczowe: nagrzewanie, składowa wysokoczęstotliwościowa prądu, materiał ferromagnetyczny, materiał diamagnetyczny.

Keywords: heating, high frequency current component, ferromagnetic material, diamagnetic material.

Wstęp

Badania procesu nagrzewania urządzeń elektrycznych są jednym z podstawowych wyznaczników decydujących o poprawności funkcjonalnej. Stanowią również podstawowe kryterium do dopuszczania ww. urządzeń do pracy w warunkach przemysłowych, szczególnie gdy mają one pracować w warunkach trudnych. Temperatura eksploatowanych urządzeń elektrycznych ma szczególne znaczenie wtedy, gdy jej nadmierny wzrost może doprowadzić do zagrożenia życia lub zdrowia przebywających w pobliżu ludzi. Jako przykład można wymienić pracę urządzeń elektrycznych w strefach zagrożonych wybuchem gazu lub pyłu np. w zakładach chemicznych lub podziemnych wyrobiskach górniczych, w których obecny jest metan lub pył węglowy.

Przykładowo, wytyczne dotyczące badań nagrzewania urządzeń elektrycznych pracujących w strefach zagrożonych wybuchem określają jedynie ogólne warunki zasilania i obciążenia jakie przyjmuje się w trakcie badań [1]. Doświadczenia uzyskane podczas wykonywania tego typu badań wskazują jednak na konieczność zwrócenia uwagi na inne czynniki, mogące mieć wpływ na ostateczne wyniki badań nagrzewania. Można tutaj wymienić między innymi temperaturę jaka panuje w bezpośrednim otoczeniu badanego urządzenia oraz prawidłowe rozmieszczenie czujników temperatury. Szczególnie istotne jest zapewnienie właściwego rodzaju wymuszenia prądowego zasilającego badane urządzenie, np. prąd stały DC lub prąd przemienny AC [2]. Przeprowadzone eksperymenty [2] wykazały, że rodzaj wymuszenia prądowego ma silny wpływ na nagrzewanie elementów mocujących przewody elektryczne. Doświadczenia badawcze opisane w [2] wykazały, że materiały ferromagnetyczne, z których wykonane są elementy mocujące przewody elektryczne wykazują silne nagrzewanie wywołane stratami histerezowymi powstałymi na skutek przepływu prądu przemiennego. Dla wymuszenia w postaci prądu stałego problem ten nie występuje. Badania obejmowały dwa rodzaje wymuszenia prądowego (stałe oraz zmienne o częstotliwości sieci 50 Hz), pozostawiając bez odpowiedzi

wpływ składowej tętniącej prądu wysokiej częstotliwości, wynikającej z pracy przyrządów energoelektronicznych, na nagrzewanie elementów mocujących przewody elektryczne. Sytuacja taka występuje w przemysłowych rozwiązaniach przekształtników energoelektronicznych dużej mocy niskiego lub średniego napięcia, o rozproszonych obwodach napięcia pośredniczącego DC (jest to charakterystyczne np. dla przekształtników wielopoziomowych). Innym przykładem może być przekształtnik prądu stałego, dla którego prąd wyjściowy może zawierać składową tętniącą wynikającą z przełączeń tranzystorów / tyrystorów. W obu przypadkach, gdy przewody są mocowane przy użyciu elementów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych, może dojść do ich nagrzewania wynikającego z podobnych zjawisk jak dla prądu zmiennego sinusoidalnego (50 Hz) [2].

Niniejsza publikacja prezentuje wyniki badań i analizę wpływu składowej tętniącej prądu, która razem ze składową stałą przepływają przez przewody elektryczne, co wywołuje generowanie się strat mocy w elementach mocujących przewody elektryczne wykonane z materiałów ferromagnetycznych oraz diamagnetycznych.

Doświadczenia uzyskane w trakcie realizacji badań pozwalają na usystematyzowanie podejścia w zakresie właściwego doboru materiałów, z których wykonywane są elementy mocujące przewody elektryczne oraz pokazują potrzebę uwzględnienia nagrzewania tych elementów dla prądów o charakterze tętniącym.

Metoda badań nagrzewania

Badania nagrzewania przeprowadzono dla dwóch typowych wpustów kablowych, przeznaczonych do użytkowania w strefach zagrożonych wybuchem (rysunek 1 i 2). Pierwszy (oznaczony jako W1) wykonany był z materiału ferromagnetycznego (staliwo L I 450 oraz stali węglowej E295), natomiast drugi (oznaczony jako W2) z materiału diamagnetycznego (mosiądzu MO58 i MO59) [2, 3, 4]. Oba wpusty kablowe zamocowano na przewodzie jednożyłowym o przekroju 95 mm² oraz 10 zwojach przewodu jednożyłowego o przekroju 2,5 mm².



Rys.1. Wpust kablowy W1 – materiał ferromagnetyczny



Rys.2. Wpust kablowy W2 – materiał diamagnetyczny

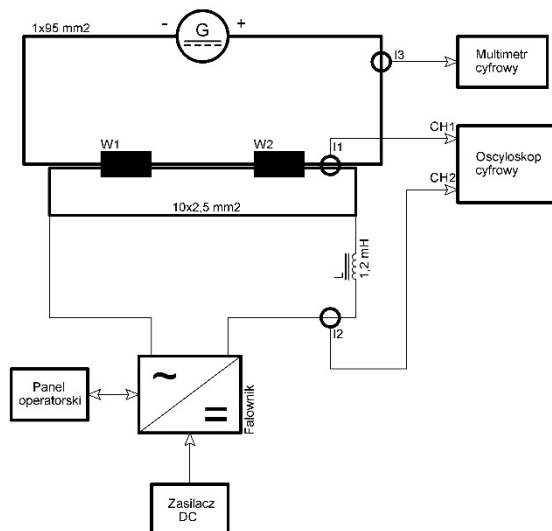
Wpusty umieszczono w odległości 1 m od siebie tak, aby wyeliminować ich wzajemne oddziaływanie termiczne. Przewód o przekroju 95 mm^2 podłączono do zacisków wyjściowych generatora prądu stałego, napędzanego silnikiem hamowni, co pozwoliło na uzyskanie składowej stałej prądu wynoszącej 200 A. Przewód o przekroju $2,5 \text{ mm}^2$, przewodzący składową tętniącą prądu przewinięto dziesięciokrotnie przez oba wpusty. Przewód ten był podłączony szeregowo poprzez dławik o indukcyjności 1,2 mH do wyjścia jednofazowego falownika mostkowego o maksymalnym prądzie 50 A. Dzięki odpowiedniej liczbie zwojów przewiniętych przez wpusty, możliwe było zwiększenie w ich wnętrzu siły magnetomotorycznej, co ze strony wpustu równoważne było dziesięciokrotnemu zwiększeniu składowej tętniącej prądu. Na rysunku 3 przedstawiono schemat układu pomiarowego, a na rysunku 4, fotografię wpustów kablowych zamocowanych na zespole przewodów ze składową stałą i tętniącą, natomiast na rysunku 5 widok stanowiska badawczego.

Nagrzewanie wpustów kablowych przeprowadzono przy natężeniu prądu stałego wynoszącego 200 A, płynącego w przewodzie o przekroju 95 mm^2 . Natężenie prądu stałego wymuszono za pomocą generatora napędzanego silnikiem hamowni (prędkość obrotowa wału prądnicy 1300 obr/min). Regulację natężenia prądu stałego realizowano poprzez nastawę prądu wzbudzenia generatora. Składową tętniącą prądu wymuszano w przewodzie $2,5 \text{ mm}^2$. Składowe tętniące miały przebieg trójkątny, o trzech wartościach międzyszczytowych, wynoszących odpowiednio: 100 A ($10 \times 10 \text{ A}$), 200 A ($10 \times 20 \text{ A}$) i 300 A ($10 \times 30 \text{ A}$) oraz trzech częstotliwościach 1,5 kHz, 3,0 kHz oraz 4,5 kHz. Wartości prądów w nawiasach odpowiadały rzeczywistej wartości międzyszczytowej prądu przepływającego przez przewód $2,5 \text{ mm}^2$. Utrzymanie odpowiednich wartości międzyszczytowych prądu tętniącego przy różnych częstotliwościach wiązało się z zasilaniem falownika mostkowego różnymi wartościami napięcia z zasilacza DC. Prądy w układzie pomiarowym mierzono za pomocą trzech sond prądowych (I_1 – zastępczy prąd przepływający przez badane wpusty kablowe, I_2 – prąd falownika oraz I_3 – prąd

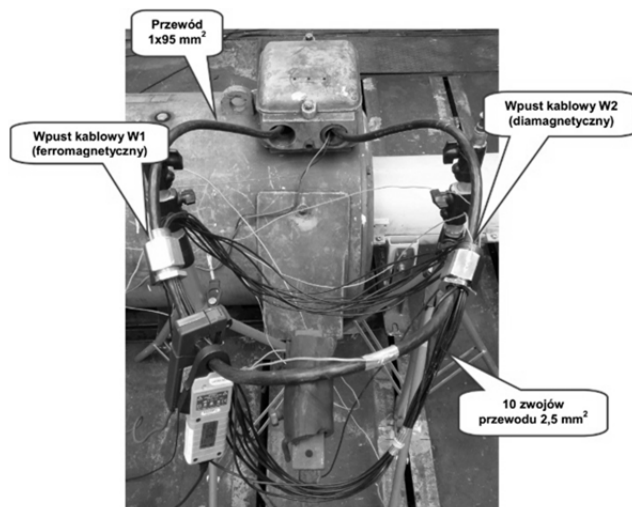
generatora) połączonych z multimetrem oraz oscyloskopem.

Temperaturę mierzono w następujących punktach pomiarowych:

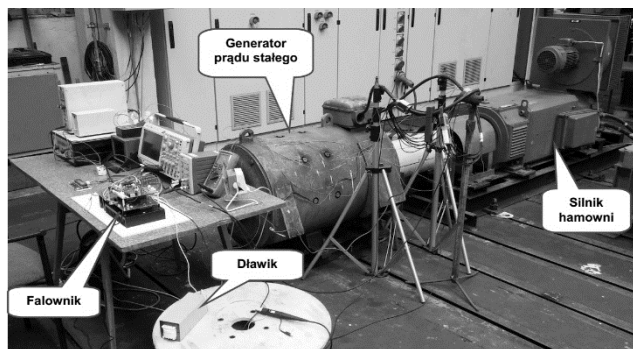
- elastomer wpustu kablowego W1,
- powierzchnia zewnętrzna wpustu kablowego W1,
- elastomer wpustu kablowego W2,
- powierzchnia zewnętrzna wpustu kablowego W2,
- powierzchnia izolacji przewodów prądu stałego,
- powierzchnia izolacji przewodów składowej tętniącej,
- otoczenie.



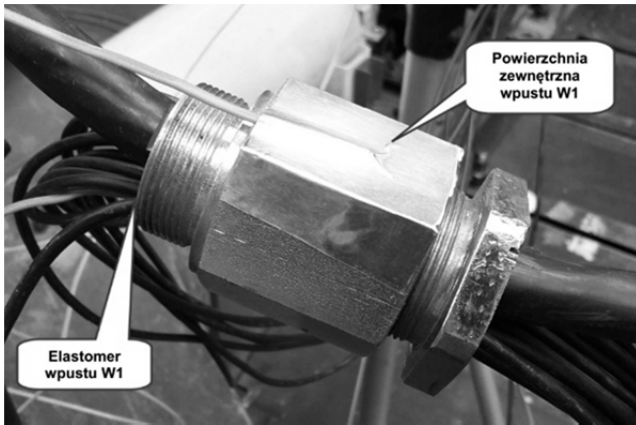
Rys.3. Schemat układu pomiarowego [4]



Rys.4. Wpusty kablowe zamocowane na zespole przewodów [4]



Rys.5. Stanowisko do badania nagrzewania wpustów kablowych [4]



Rys. 6. Rozmieszczenie przetworników temperatury na powierzchni wpustu kablowego W1

Rozmieszczenie przetworników temperatury na powierzchni wpustu kablowego W1 przedstawiono na rysunku 6 (dla wpustu W2 rozmieszczenie było identyczne). Warunek stabilizacji temperatury przyjęto zgodnie z wymaganiem punktu 26.5 normy PN-EN 60079-0:2013-03 [1]. Dla danego natężenia prądu każda próba trwała do czasu ustabilizowania się temperatury, tak by zmiana temperatury w każdym z mierzonych punktów przez ostatnią godzinę nie przekraczała 2°C.

Tabela 1. Temperatury wybranych powierzchni wpustów kablowych podczas nagrzewania składową stałą prądu $I_3 = 200$ A oraz składową wysokoczęstotliwościową (p-p): $10I_2 = 100$ A (10 x 10 A)

| Punkt pomiaru temperatury | Temperatura [°C] | | |
|--|------------------|-----------------|-----------------|
| | $f = 1,5$ [kHz] | $f = 3,0$ [kHz] | $f = 4,5$ [kHz] |
| Elastomer wpustu W1 | 25,0 | 25,8 | 26,1 |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W1 | 23,6 | 24,8 | 25,4 |
| Elastomer wpustu W2 | 22,9 | 23,3 | 23,4 |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W2 | 22,0 | 22,5 | 22,6 |
| Powierzchnia izolacji przewodu wiodącego prąd stały | 28,2 | 28,6 | 28,6 |
| Rozwidlenie przewodów wiodących składowe wysokoczęstotliwościowe | 20,5 | 20,9 | 21,0 |

Tabela 2. Temperatury wybranych powierzchni wpustów kablowych podczas nagrzewania składową stałą prądu $I_3 = 200$ A oraz składową wysokoczęstotliwościową (p-p): $10I_2 = 200$ A (10 x 20 A)

| Punkt pomiaru temperatury | Temperatura [°C] | | |
|--|------------------|-----------------|-----------------|
| | $f = 1,5$ [kHz] | $f = 3,0$ [kHz] | $f = 4,5$ [kHz] |
| Elastomer wpustu W1 | 30,2 | 32,2 | 33,9 |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W1 | 31,8 | 35,7 | 38,9 |
| Elastomer wpustu W2 | 24,7 | 24,8 | 25,2 |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W2 | 23,0 | 23,3 | 23,9 |
| Powierzchnia izolacji przewodu wiodącego prąd stały | 28,7 | 28,7 | 29,3 |
| Rozwidlenie przewodów wiodących składowe wysokoczęstotliwościowe | 22,9 | 23,4 | 24,0 |

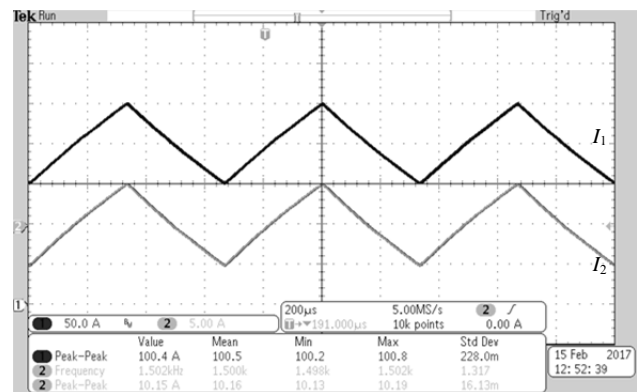
Tabela 3. Temperatury wybranych powierzchni wpustów kablowych podczas nagrzewania składową stałą prądu $I_3 = 200$ A oraz składową wysokoczęstotliwościową (p-p): $10I_2 = 300$ A (10 x 30 A)

| Punkt pomiaru temperatury | Temperatura [°C] | | |
|--|------------------|-----------------|-----------------|
| | $f = 1,5$ [kHz] | $f = 3,0$ [kHz] | $f = 4,5$ [kHz] |
| Elastomer wpustu W1 | 40,2 | 45,1 | 48,9 |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W1 | 47,6 | 57,9 | 65,3 |
| Elastomer wpustu W2 | 28,6 | 29,4 | 29,5 |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W2 | 25,3 | 26,5 | 27,0 |
| Powierzchnia izolacji przewodu wiodącego prąd stały | 30,2 | 31,0 | 31,4 |
| Rozwidlenie przewodów wiodących składowe wysokoczęstotliwościowe | 27,5 | 29,7 | 30,1 |

Wyniki badań

Badania nagrzewania wpustów kablowych przeprowadzono dla trzech wartości międzyszczytowej składowej tętniącej prądu (100 A, 200 A i 300 A) gdzie mierzono temperatury wybranych powierzchni wpustów kablowych. Pomiary te wykonywano dla trzech częstotliwości składowej tętniącej (1,5 kHz, 3 kHz i 4,5 kHz). Uzyskane podczas badań temperatury zmierzone w stanie ustalonym zamieszczono w tabelach 1 - 3.

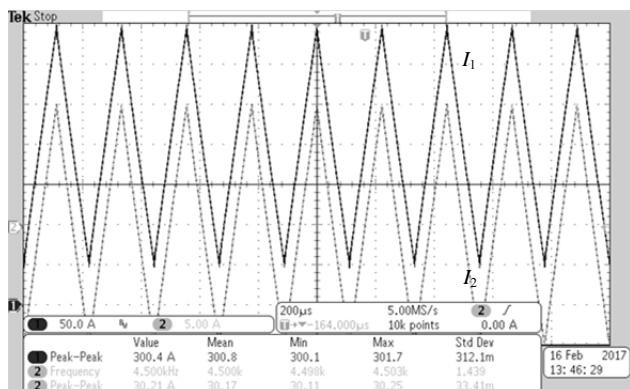
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów I_1 i I_2 zarejestrowane podczas badań. Prąd I_1 jest prądem sumarycznym składającym się ze składowej stałej I_3 oraz składowej tętniącej $10I_2$. Prąd I_2 zarejestrowany oscyloskopem stanowi prąd pojedynczej żyły przewodu 2,5 mm² przewodzącego składową tętniącą.



Rys. 7. Przebiegi prądów I_1 i I_2 podczas nagrzewania (200 A DC + 100 A (10 x 10A) AC_{pp}, $f = 1,5$ kHz)

Porównując wartości temperatur zmierzonych na powierzchni wpustu kablowego wykonanego z materiału ferromagnetycznego można stwierdzić, że wzrost temperatury następował wraz ze wzrostem amplitudy składowej zmiennej natężenia prądu i jej częstotliwości. Te same wartości składowej tętniącej prądu w przypadku wpustu z materiału diamagnetycznego nie wywoływały tak znaczącego wzrostu temperatury powierzchni wpustu jak w przypadku materiału ferromagnetycznego. Porównując wartości temperatury elastomerów obu przepustów można stwierdzić, że podstawowym źródłem strat mocy jest zjawisko generowania prądów wirowych wokół linii pola magnetycznego zamykających się wewnątrz przepustów, (zjawisko to występowało głównie w przepuście wykonanym z ferromagnetyka). Temperatura elastomerów była silnie

zależna od temperatury przewodu przewodzącego prąd stały 200 A oraz przewodów przewodzących składową tętniącą. W związku z tym, dalszą analizę wyników badań przeprowadzono dla powierzchni zewnętrznych wpustów.



Rys.8. Przebiegi prądów I_1 i I_2 podczas nagrzewania (200 A DC +300 A ($10 \times 30A$) AC_{pp} , $f = 4,5$ kHz)

Celem zobrazowania przyrostu temperatury powierzchni wpustów wykonanych z materiału ferromagnetycznego oraz diamagnetycznego wyznaczono przyrosty ΔT , wyrażone zależnością (1):

$$(1) \quad \Delta T = T - T_{OTSR}$$

gdzie: T – temperatura zmierzona na powierzchni wpustu kablowego, T_{OTSR} – średnia wartość temperatury otoczenia zarejestrowana podczas badań, $T_{OTSR} = 20,5^\circ C$.

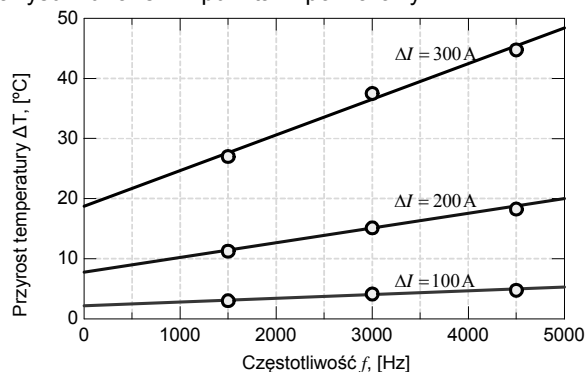
W tabeli 4 zestawiono przyrosty temperatury powierzchni zewnętrznych badanych wpustów, obliczone za pomocą wzoru (1) i wartości zaprezentowanych w tabelach 1 - 3. Wzrost natężenia składowej tętniącej prądu płynącego przez przewody skutkowało przyrostem temperatury wpustu wykonanego z materiału ferromagnetycznego, który dla częstotliwości 4,5 kHz i wartości międzyszczytowej 300 A wyniósł $44,8^\circ C$. Przyrosty temperatury dla wpustu diamagnetycznego nie były tak znaczne i maksymalnie wynosiły $6,5^\circ C$. Niemniej zauważyć można, że przyrost temperatury zależał zarówno od wartości międzyszczytowej składowej tętniącej prądu, jak i od jej częstotliwości. Obserwacja temperatury elastomeru oraz przewodów wiodących prąd wykazała, że źródłem ciepła był metalowy korpus wpustu, a nie przewody wewnątrz wpustów.

Tabela 4. Zestawienie przyrostów temperatury powierzchni zewnętrznych wpustów kablowych [5]

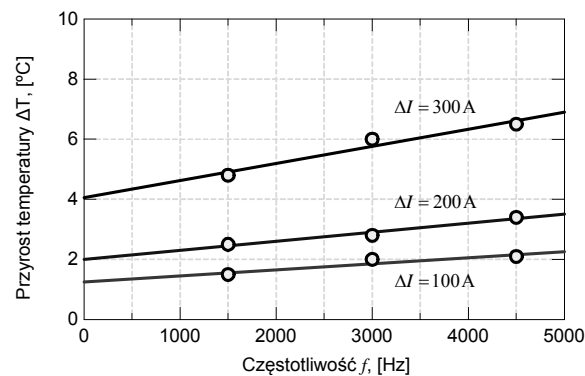
| Punkt pomiaru temperatury | $10I_2$ [A _{pp}] | Przyrost temperatury [$^\circ C$] | | |
|---|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | $f = 1,5$ [kHz] | $f = 3,0$ [kHz] | $f = 4,5$ [kHz] |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W1 (ferromagnetyk) | 100 | 3,1 | 4,3 | 4,9 |
| | 200 | 11,3 | 15,2 | 18,4 |
| | 300 | 27,1 | 37,4 | 44,8 |
| Powierzchnia zewnętrzna wpustu W2 (diamagnetyk) | 100 | 1,5 | 2,0 | 2,1 |
| | 200 | 2,5 | 2,8 | 3,4 |
| | 300 | 4,8 | 6,0 | 6,5 |

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono osobno przyrosty temperatury ΔT powierzchni zewnętrznych dla wpustu ferromagnetycznego i diamagnetycznego, w funkcji częstotliwości składowej tętniącej prądu. Charakterystyki przyrostów temperatury aproksymowano charakterystykami liniowymi jako funkcje częstotliwości składowej tętniącej f .

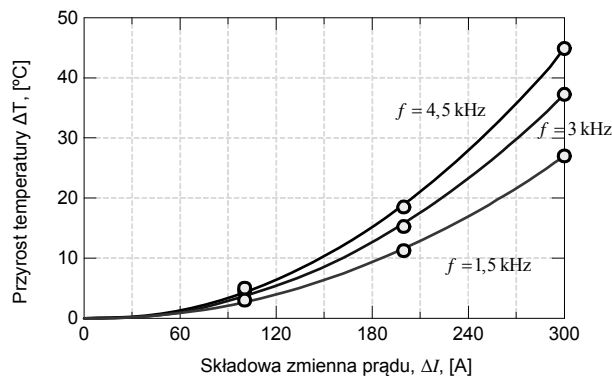
Na rysunku 11 przedstawiono charakterystyki przyrostów temperatury powierzchni tylko dla wpustu ferromagnetycznego ΔT jako funkcje wartości międzyszczytowej składowej tętniącej prądu $10I_2$, dla trzech wartości częstotliwości f . Charakterystyki te aproksymowano funkcjami kwadratowymi przedstawionymi na rysunku razem z punktami pomiarowymi.



Rys.9. Przyrosty temperatury na powierzchni zewnętrznej wpustu kablowego W1 (materiał ferromagnetyczny)



Rys.10. Przyrosty temperatury na powierzchni zewnętrznej wpustu kablowego W2 (materiał diamagnetyczny)

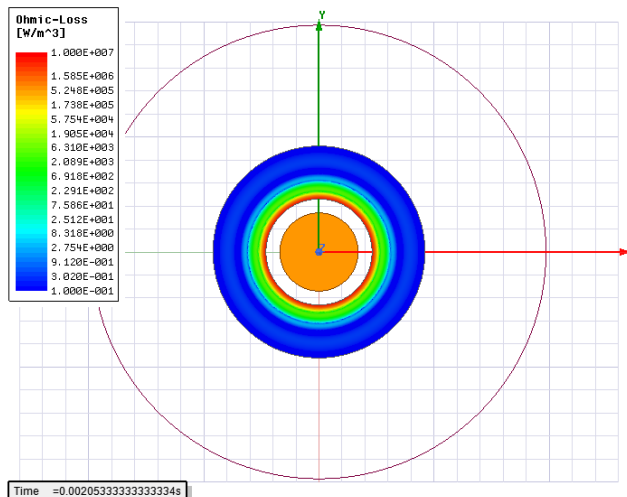


Rys.11. Przyrosty temperatury na powierzchni zewnętrznej wpustu kablowego W1 w funkcji składowej tętniącej prądu

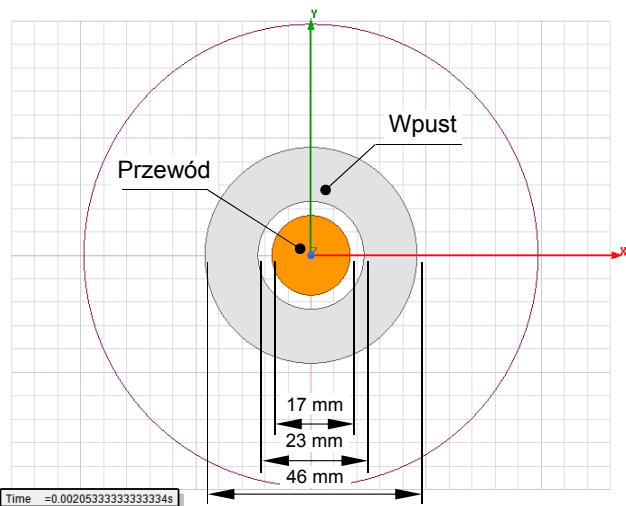
Z analizy przyrostów temperatury wynika, że zależą one liniowo od częstotliwości składowej tętniącej i są funkcją kwadratową wartości międzyszczytowej prądu tej składowej. Autorzy założyli, że mechanizmem odpowiedzialnym za generowanie strat mocy wewnątrz wpustu ferromagnetycznego są głównie powstające we wpuscie prądy wirowe [6]. W celu weryfikacji tej tezy wykonano analizę polową, odwzorowującą badany wpust kablowy razem z przewodem przewodzącym prąd. Analizę polową wykonano w programie Maxwell 2D i dotyczyła ona pomiaru średnich strat mocy generowanych we wpusie kablowym.

Analiza polowa strat mocy w programie Maxwell 2D

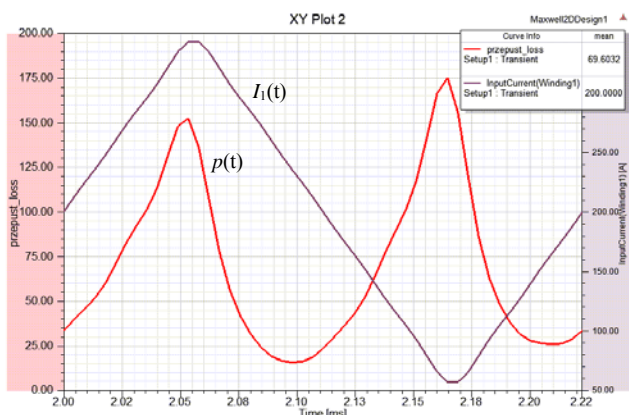
W analizie polowej przyjęto jedną geometrię wpustu kablowego, zamodelowanego jako cylinder o średnicy wewnętrznej równej 23 mm i zewnętrznej wynoszącej 46 mm. Długość tak zamodelowanego wpustu wynosiła 75 mm i odpowiadała rzeczywistej długości wpustu W1. Na rysunku 12 przedstawiono zamodelowaną geometrię wpustu kablowego, przy czym dla tego modelu przyjęto, że materiałem wpustu będzie stal magnetyczna 1008 (W1) lub mosiądz (W2). W modelu przyjęto, że sumaryczny prąd I_1 płynie przez jeden przewód miedziany o średnicy 17 mm (zjawiska zachodzące w przewodzie zostały pominięte). Przykładowy przebieg prądu I_1 dla przypadku, gdy $\Delta I = 300$ A, a częstotliwość $f = 4,5$ kHz przedstawiono na rysunku 13. Przedstawiono na nim również przebieg mocy chwilowej strat generowanych wewnątrz wpustu. Straty te były całkowitymi stratami generowanymi w całej objętości wpustu, których gęstość dla chwili $t = 2,05$ ms pokazano na rysunku 14. Na podstawie przebiegu chwilowych strat mocy można stwierdzić, że w jednym okresie składowej tętniącej prądu występują dwa maksima. Oznacza to, że tylko składowa tętniąca prądu generuje straty we wpuście, za co są odpowiedzialne prądy wirowe.



Rys.14. Gęstość chwilowych strat mocy wewnątrz wpustu kablowego dla czasu $t = 2,05$ ms



Rys.12. Geometria zamodelowanego w programie Maxwell 2D wpustu kablowego

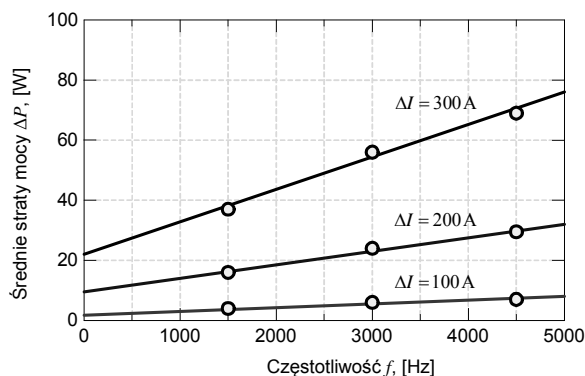


Rys.13. Przebiegi prądu w przewodzie wewnątrz badanego wpustu oraz chwilowych strat mocy generowanych we wpuście

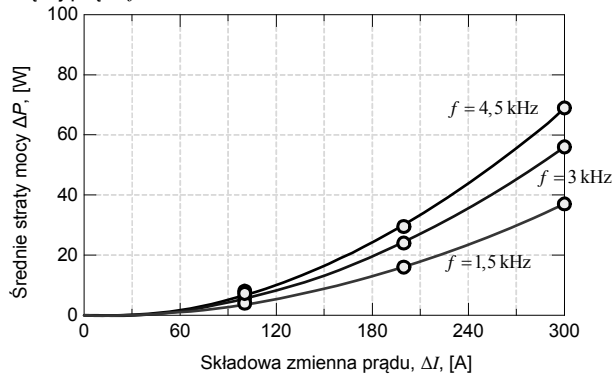
Przebieg chwilowych strat mocy (rysunek 13), pokazuje, że większe straty mocy we wpuście występują w chwili, gdy prąd I_1 jest minimalny ($t = 2,17$ ms), niż maksymalny ($t = 2,05$ ms). Było to spowodowane częściowym nasyceniem się ferromagnetyka, gdzie dla małych prądów I_1 przenikalność magnetyczna materiału wpustu była większa niż dla większych wartości I_1 .

Tabela 5. Zestawienie średnich strat mocy we wpuściach kablowych

| Rodzaj wpustu | ΔI [A] | Średnie straty mocy [W] | | |
|--------------------------|----------------|-------------------------|---------------|---------------|
| | | $f = 1,5$ kHz | $f = 3,0$ kHz | $f = 4,5$ kHz |
| Wpust W1 (ferromagnetyk) | 100 | 3,95 | 5,93 | 7,29 |
| | 200 | 16,06 | 24,11 | 29,66 |
| | 300 | 37,19 | 56,02 | 69,60 |
| Wpust W2 (diamagnetyk) | 100 | 0,19 | 0,28 | 0,36 |
| | 200 | 0,78 | 1,14 | 1,42 |
| | 300 | 1,75 | 2,56 | 3,20 |



Rys.15. Straty mocy generowane wewnątrz wpustu kablowego W1 (materiał ferromagnetyczny) w funkcji częstotliwości składowej tętniącej prądu f



Rys.16. Straty mocy generowane wewnątrz wpustu kablowego W1 w funkcji składowej tętniącej prądu ΔI

Przy użyciu modelu polowego 2D wykonano analizę wszystkich przypadków jakim poddano wpusty kablowe podczas badań laboratoryjnych. Dla tych przypadków zmierzono wartości średnie strat mocy generowanych we wpustach W1 i W2. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 5. Na podstawie wyników strat mocy we wpustach, które zaprezentowano w tabeli 5, można przedstawić charakterystyki tych strat w funkcji częstotliwości składowej tętniącej f (rysunek 15) oraz w funkcji wartości międzyszczytowej składowej tętniącej prądu (rysunek 16).

Najistotniejszą cechą charakterystyk strat mocy przedstawionych na rysunkach 15 i 16 jest to, że są to odpowiednio charakterystyki liniowe i kwadratowe, podobnie jak charakterystyki przyrostów temperatury na powierzchni wpustów, zmierzone podczas badań laboratoryjnych. Z uwagi na fakt, że zmiany temperatury wpustu nie przekraczają 50°C oraz, że wpusty były metalowe, można założyć, że ciepło oddawane było do otoczenia przez zjawiska konwekcji i przewodzenia, co oznacza, że przyrosty temperatury na powierzchni wpustów były proporcjonalne do generowanych strat mocy. Ponieważ w trakcie pomiarów nie było możliwości określenia strat mocy we wpustach, do weryfikacji zgodności pomiarów i obliczeń wykorzystano metodę pośrednią, bazującą na wyznaczeniu zastępczych rezystancji termicznych zgodnie z zależnością (2).

$$(2) \quad R_{th,i,j} = \frac{\Delta T_{i,j}}{\Delta P_{i,j}}; \quad i = 1, \dots, 3, \quad j = 1, \dots, 3$$

gdzie: $\Delta T_{i,j}$ – jest uzyskanym podczas badań przyrostem temperatury zmierzonym na powierzchni wpustu kablowego, dla warunków $\Delta I = i \cdot 100$ A oraz $f = j \cdot 1,5$ kHz, $\Delta P_{i,j}$ – jest wartością średnią strat mocy dla tych samych warunków, ale uzyskanych podczas przeprowadzonej analizy polowej, $R_{th,i,j}$ – jest współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy przyrostem $\Delta T_{i,j}$ a stratami mocy $\Delta P_{i,j}$, który można uznać za współczynnik rezystancji cieplnej układu. Poziom zbieżności wyznaczonej wartości $R_{th,i,j}$, dla różnych warunków nagrzewania, niesie informację na temat zgodności między pomiarami a obliczeniami polowymi. Wyznaczone na podstawie (2) wartości współczynnika $R_{th,i,j}$ dla obu przepustów przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Współczynnik rezystancji cieplnej wpustów kablowych

| Rodzaj wpustu | ΔI [A] | Współczynnik rezystancji cieplnej [K/W] | | |
|-----------------------------|-------------------|--|--------------------|--------------------|
| | | $f = 1,5$ [kHz] | $f = 3,0$ [kHz] | $f = 4,5$ [kHz] |
| Wpust W1 (ferromagnetyk) | 100 | 0,784 | 0,725 | 0,672 |
| | 200 | 0,704 | 0,630 | 0,620 |
| | 300 | 0,729 | 0,668 | 0,644 |
| Wpust W2 (diamagnetyk) | 100 | 7,728 | 7,035 | 5,915 |
| | 200 | 3,220 | 2,462 | 2,394 |
| | 300 | 2,748 | 2,345 | 2,034 |

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 6 można zauważyć, że dla wpustu W1 średnia wartość rezystancji cieplnej, dla wszystkich przypadków wynosiła 0,686 K/W, a dla każdego z pomiarów rozbieżność w wartości rezystancji cieplnej była niewielka. Dla wpustu W2 średnia wartość rezystancji cieplnej wynosiła 3,987 K/W, przy czym poszczególne wartości rezystancji charakteryzowały się dużą rozbieżnością. Wynika to z faktu, że za nagrzewanie wpustów odpowiadał również mechanizm przewodzenia ciepła z przewodu, jednak ciepło to w porównaniu do

generowanego ciepła we wpuscie W1 było stosunkowo małe, a duże w przypadku wpustu W2.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań nagrzewania wpustów kablowych wykonanych z materiału ferromagnetycznego i diamagnetycznego w przypadku, gdy przez kabel przepływała składowa stała prądu oraz składowa tętniąca o relatywnie wysokiej częstotliwości. Jak pokazano w przypadku wykonania wpustu z materiału ferromagnetycznego można zauważyć znaczący wpływ składowej tętniącej prądu, przy czym źródłem ciepła staje się nie przewód przewodzący prąd tylko wpust kablowy. Jak pokazano w badaniach, przyrost temperatury wpustu zależał zarówno od wartości międzyszczytowej składowej tętniącej prądu, jak i od jej częstotliwości. W pomiarach uzyskano największy przyrost wynoszący około 45°C dla składowej tętniącej prądu 300 A i częstotliwości 4,5 kHz. Zauważyć można, że przyrost temperatury zmienił się liniowo z częstotliwością prądu i był funkcją kwadratową wartości międzyszczytowej prądu. Przyczyną powstawania strat mocy we wpuscie były prądy wirowe, przy czym znaczący był ich udział w materiale ferromagnetycznym, a minimalny w materiale diamagnetycznym. W celu weryfikacji uzyskanych wyników badań przeprowadzono analizę polową 2D strat mocy, która wykazała, że straty mocy były proporcjonalne odpowiednio liniowo do częstotliwości i kwadratowo do wartości międzyszczytowej składowej tętniącej prądu. Na podstawie analizy wykazano, że wartość rezystancji cieplnej dla wpustu wykonanego z ferromagnetyka była praktycznie stała, natomiast dla wpustu wykonanego z materiału diamagnetycznego charakteryzowała się dużym rozrzutem, czego przyczyną był fakt, że w drugim przypadku znaczący był również mechanizm przewodzenia ciepła z przewodu.

Autorzy: dr inż. Andrzej Niedworok, Laboratorium Badań Stosowanych, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice, E-mail: aniedworok@komag.eu; dr inż. Jarosław Michalak, Politechnika Śląska, KENER, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: jaroslaw.michalak@polsl.pl; dr inż. Marcin Zygmantowski, Politechnika Śląska, KENER, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: marcin.zygmantowski@polsl.pl

LITERATURA

- [1] PN-EN 60079-0:2013-03 - Atmosfery wybuchowe - Część 0: Urządzenia - Podstawowe wymagania, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, (2013)
- [2] Niedworok A., Impact of static and alternating magnetic field on warming up of components fixing the electric wires, Przegląd Elektrotechniczny, 93 (2017), nr.7, 60-63
- [3] Dobrzański L., Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, (2004)
- [4] Niedworok A., Budowa stanowiska oraz badania nagrzewania elementów mocujących przewody elektryczne wiodące wysokoczęstotliwościowe składowe natężenia prądu, Praca statutowa (materiały niepublikowane), Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice (2017)
- [5] Niedworok A., Analiza wyników badań pod kątem wpływu wysokoczęstotliwościowych składowych natężeń prądu na nagrzewanie elementów mocujących przewody elektryczne, Praca statutowa (materiały niepublikowane), Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice (2017)
- [6] Hurley W.G., Wolffe W.H., Transformers and Inductors for Power Electronics, Theory, Design and Applications, John Wiley & Sons Ltd, UK, (2014)