

Arkadiusz RYFA¹
Jacek SMOLKA²
Zbigniew BULIŃSKI²
Mateusz BĘDKOWSKI²

MODEL NUMERYCZNY SPRZĘŻONYCH PROCESÓW CIEPLNYCH WYSTĘPUJĄCYCH W ZAMKNIĘTYM STACJONARNYM POLU Z GENERACJĄ CIEPŁA

W pracy opisano sprzężony trójwymiarowy model matematyczny wymiany ciepła w szafach elektrycznych. Model obejmuje generację ciepła na skutek przepływu prądu elektrycznego, promieniowanie cieplne (wewnątrz i na zewnątrz szafy), konwekcję naturalną oraz przewodzenie ciepła w elementach przewodzących i konstrukcyjnych wewnątrz szafy. W opisywanym modelu pola elektromagnetyczne i cieplno-przepływowe są dwustronnie sprzężone, co oznacza, że rozwiązywane są iteracyjnie. Takie podejście wymaga wzajemnej wymiany danych między modelami składowymi, ale pozwala na uzyskanie dokładnego rozwiązania. Opracowany model został użyty do symulacji pola temperatury w laboratoryjnej rozdzielniczy elektrycznej zasilanej prądem zmiennym. Model został zwalidowany za pomocą pomiarów temperatury dla różnych poziomów temperatur.

Słowa kluczowe: model sprzężony, promieniowanie cieplne, elektromagnetyzm, rozdzielnica elektryczna

1. Wstęp

Rozdzielnice elektryczne są ważnymi elementami systemów dystrybucji energii. Składają się one z szeregu elementów i umożliwia izolację oraz pomiar parametrów układu. Ich rozwój koncentruje się na zwiększaniu obciążenia prądowego i/lub zmniejszenia ilości miedzi zamontowanej wewnątrz. Przepływ prądu przez przewodniki powoduje straty energii, które zamieniają się w ciepło, przy czym dopuszczalny poziom temperatury wewnątrz szaf jest ściśle określony przez odpowiednie normy. Obudowa rozdzielniczy zbudowana jest ze stali

¹ Autor do korespondencji: Arkadiusz Ryfa, Politechnika Śląska, ul Konarskiego 22/105C, 44-100 Gliwice, Arkadiusz.Ryfa@polsl.pl.

² Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 22/105C, 44-100 Gliwice: Jacek.Smolka@polsl.pl, Zbi-gniew.Bulinski@polsl.pl, Mateusz.Bedkowski@polsl.pl.

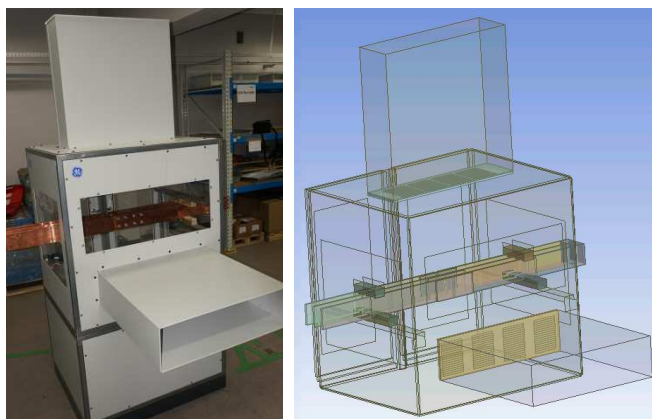
a powierzchnia wlotów i wylotów powietrza jest mała i przymknięta specjalnymi kratkami. To zdecydowanie ogranicza intensywność wymiany ciepła, gdyż mniejsza prędkość oraz strumień powietrza wentylującego wnętrza rozdzielnic. Konwekcja wymuszona jest stosowana tylko okazjonalnie, gdyż priorytetem jest niezawodność jednostki. Nadmierny wzrost temperatury spowodowany niewystarczającym odprowadzaniem ciepła może doprowadzić do uszkodzenia rozdzielnic. Dlatego też wiele wysiłku wkłada się w opracowanie niezawodnego systemu chłodzenia lub zmniejszenie strat energii wewnątrz urządzenia. Zaprojektowanie rozdzielnic wymaga wytworzenia wielu prototypów i przeprowadzenia testów, co sprawia, że jest to długi i kosztowny proces. W związku z tym na etapie projektowania pożądanym jest dokładny model numeryczny, który obrazuje działanie urządzenia. Prezentowany w niniejszej pracy model oparty na dwóch programach pakietu ANSYS: Maxwell oraz Fluent został zweryfikowany na podstawie danych eksperymentalnych dla otwartej oraz zamkniętej rozdzielnic dla różnych poziomów natężenia prądu.

2. Model matematyczny

Wyznaczenie strat ciepła generowanych wewnątrz przewodu, przez który płynie prąd przemienny nie jest trywialne. Oprócz ujęcia dobrze znanych strat Joule'a należy uwzględnić efekty związane ze zmiennym polem magnetycznym. Efekty naskórkowości oraz bliskości prowadzą bowiem do istotnego wzrostu strat w przewodniku. Ponadto istotna jest wartość skuteczna napięcia oraz prądu zdeterminowane przez przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem i natężeniem determinujące moc bierną. Straty ciepła bowiem generuje wyłącznie moc czynna. W modelu sprzężonym przepływ powietrza oraz wymiana ciepła między szynami a powietrzem rozwiązywana była w kodzie numerycznej mechaniki płynów ANSYS Fluent. Druga część symulacji tj. straty energii w materiale przewodzącym zostały obliczone w modelu elektromagnetycznym zbudowanym w programie ANSYS Maxwell.

Geometrię modelu przedstawiono na Rysunku 1. Model rozdzielnic przecinają trzy przewody fazowe (L1-L3) wykonane z miedzi. Każdy przewód ma przekrój 100 mm x 10 mm i jest podzielony na dwie części: lewą i prawą. Części te połączone są śrubami przez trzeci przewód miedziany, co jest typowym złączem używanym w szafach elektrycznych. Model ma wymiary 1 m (szerokość) x 0,6 m (głębokość) x 1 m (wysokość) i jest wykonany z płyt stalowych na stelażu. Część ścian jest wyposażona w okna rewizyjne wykonane z pleksi. Okna wlotowe i wylotowe powietrza są przysłonięte płytami wyposażonymi w specjalnie kształtowane przegrody mające na celu minimalizację ilości zanieczyszczeń dostających się do środka. Do wlotu i wylotu zamontowane są kanały o długości 0,5 m, co stabilizuje przepływ powietrza. Model obejmuje różne zjawiska fizyczne tj. elektromagnetyzm i przepływ płynu. Zatem geometria jest

przygotowana pod te dwa modele, co pozwala na uzyskanie dokładnego rozwiązania obu pól i wymiany danych pomiędzy nimi. Ze względu na złożony charakter przepływu oraz dystrybucję strat mocy rozdzielnica musi być traktowana jako pełny model. Trzeba też zauważyć, że elementy geometryczne, które



Rys. 1. Rozdzielnica laboratoryjna (po lewej) i model geometryczny (po prawej)

Fig. 1. Laboratory switchgear (left) and geometrical model (right)

miały mniejsze znaczenie dla modelu EMAG są kluczowe w modelu przepływowym (CFD). Ponieważ oba modele mają różne wymagania dyskretyzacja w modelu EMAG została stworzona w algorytmie adaptacyjnym, które wykorzystuje zasadę zachowania energii. Siatka jest zagęszczana do momentu aż bilans energii nie zostanie spełniony. Finalna siatka ma około 0,5 mln elementów czworościennych, co gwarantuje poprawność uzyskanego rozwiązania. Model ten obejmuje oporność miedzi zależną od temperatury oraz opór kontaktowy złącza. Rezystancja zestykowa obarcza model sporą niepewnością, gdyż ma na nią wpływ szereg parametrów, które są trudne, bądź nawet niemożliwe do określenia. W niniejszym modelu opór kontaktowy określony został przy pomocy uproszczonego wielkoskalowego modelu, którego opis zawarty jest w [1]. W przypadku modelu CFD siatka jest typu cut-cell i składa się z 3 mln elementów. Gęstość siatki została zwiększona w pobliżu szyn, ścian rozdzielnic oraz wlotów i wylotów powietrza. Zarówno na wlocie oraz wylocie powietrza przypisano warunek brzegowy ciśnieniowy. W obliczeniach przepływowych zastosowano model turbulencji k- ϵ RNG oraz radiacji Discrete Ordinates. Spory wpływ na radiacyjne straty ciepła z szyny ma jej emisyjność. Warto zauważyć, że miedź stosowana w rozdzielnicach ma niską wartość emisyjności (0,05-0,2) i w czasie eksploatacji ulega ona zmianie np. podczas przegrzania się szyn. W modelu przyjęto wartość emisyjności 0,07, co odpowiada średniej wartości określonej eksperymentalnie.

3. Eksperyment

Pomiar przeprowadzono dla dwóch wariantów szafy: otwartej i zamkniętej. Pierwszy jest częściej stosowany, ale w szczególnych przypadkach, gdy wymagana jest dodatkowa ochrona, drugi wariant jest wykorzystywany. Temperatura szyn była mierzona termoparami przytwierdzonymi do ich powierzchni. Dla każdej z trzech szyn, temperatura mierzona była w czterech punktach każdego z czterech przekrojów (C1-C4). Dwa położone były w sąsiedztwie obu ścian, a pozostałe w pobliżu połączenia. W połączeniu temperaturę mierzono trzema lub sześcioma termoparami w 6 różnych przekrojach (Con1-Con6). Temperatura powietrza została zmierzona na czterech wysokościach: 0,05 m poniżej sufitu (P4), 0,05 m powyżej (P3) i poniżej szyn (P3) i 0,05 m nad dnem (P1). Na każdej wysokości dziewięć czujników równo rozłożono w trzech rzędach po trzy (jeden w środku, a pozostałe 0,05 m od ścian). W celu określenia strat ciepła ze ścian obudowy pole temperatury zostało określone przy pomocy kamery termowizyjnej (IR). Badanie przeprowadzone przed pomiarem ujawniło, że emisyjność ścian skrzyni wynosi około 0,98, co gwarantuje wiarygodne pomiary termowizyjne. Dodatkowo pomiar IR został potwierdzony termometrem kontaktowym. Temperatury zarejestrowane dla prądu 1800 A dla otwartej szafy pokazane zostały w Tabeli 1, a dla zamkniętej w Tabeli 2.

Tabela 1. Temperatury szyn oraz powietrza dla otwartej szafy

Table 1. Temperature of bus-bars and air for open switchgear

	L1				L2				L3			
C1	88,0	87,7	86,8	86,1	89,6	89,4	88,0	88,1	89,2	88,7	87,5	88,0
C2	82,7	81,4	81,8	81,2	83,1	82,7	82,1	82,4	83,0	82,5	81,8	82,6
C3	71,4	70,9	70,7	71,2	73,8	73,3	72,9	73,5	75,6	75,2	75,1	75,3
C4	67,1	67,0	66,0	66,8	69,3	69,5	69,3	69,7	73,7	73,2	73,2	72,9
	L2 szyna			L2 połączenie			L3 szyna			L3 połączenie		
Con1	79,1	78,8	78,8				79,2	78,8	78,8			
Con2	78,4	78,3	78,0	78,5	78,5	77,7	78,5	78,5	77,9	78,7	78,5	78,1
Con3	78,3	77,7	76,4	78,2	77,9	77,8	78,5	78,1	77,8	78,5	78,0	78,5
Con4	77,3	77,4	76,8	77,3	77,2	76,6	78,0	77,9	77,1	78,0	78,5	78,0
Con5	77,1	76,8	76,7	77,1	77,4	76,8	77,9	77,5	77,1	78,0	77,7	77,5
Con6	76,8	76,5	76,5				77,7	77,2	76,5			
Powietrze												
P1	36,3	33,0	32,9	P3	23,2	23,2	23,5	C1,...,C4 – przekroje przewodnika Con1,...,Con4 – przekroje połączenia P1,...,P2 – poziomy powietrza				
	40,8	37,4	38,7		45,8	23,2	37,3					
	32,6	32,3	33,0		22,4	23,1	22,5					
P2	30,8	30,4	30,6	P4	21,2	21,5	22,6					
	44,0	36,8	46,1		21,3	21,5	22,0					
	30,3	31,2	30,4		21,5	22,8	22,6					

Dla wszystkich szyn w obrębie każdego przekroju poprzecznego (C1-C4, Con1-Con6) temperatura zmienia się o 0,5-2 K. Można również zauważyć, że temperatura spada wraz z oddalaniem się od zwory (patrz przekroje w Tabeli 1: C1-C2-Con1-Con6-C3-C4). Dla otwartej skrzynki spadek ten wynosi około 20 K. Ponadto temperatura powietrza wzrasta wraz z wysokością, co jest typowe dla naturalnej konwekcji. Na najniższym poziomie (P4) temperatura jest niemal jednorodna. Zróżnicowanie przestrzenne temperatury można zaobserwować wyżej. Na poziomie P3 oraz P2 dwie termopary umieszczone pod i nad szyną środkową pokazują temperaturę wyższą od pozostałych. Na poziomie P1 pole temperatury staje się bardziej jednolite, co jest wynikiem mieszania się powietrza.

Dla zamkniętej szafy pole temperatury zachowuje się podobnie jak poprzednio. Temperatura w przekroju przewodnika zmienia się o 0,5-2 K i spada w oddaleniu od zwory o około 20 K, przy czym poziom temperatury szyn jest wyższy o 5 K. Jest to spowodowane brakiem świeżego powietrza przepływającego przez komorę, co redukuje intensywność konwekcji. W tym przypadku temperatura powietrza wewnątrz pola jest większa niż w otwartej o 10 K i wzrasta wraz z wysokością.

Tabela 2. Temperatury szyn oraz powietrza dla zamkniętej szafy

Table 2. Temperature of bus-bars and air for closed switchbox

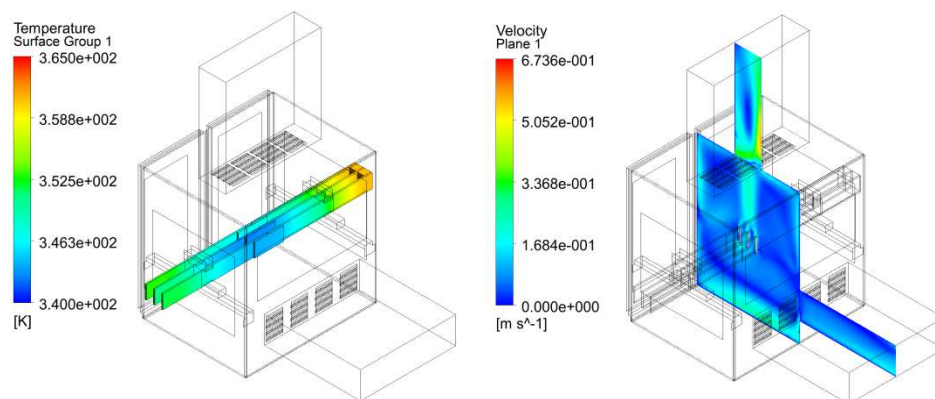
	L1				L2				L3			
C1	93,8	93,3	92,6	91,5	95,3	94,8	93,5	93,3	95,3	94,1	93,9	93,8
C2	90,8	89,6	90,1	89,5	91,2	91,0	90,5	90,6	91,6	91,3	90,6	91,3
C3	79,2	78,8	78,6	79,1	81,9	81,5	81,3	81,7	84,4	83,9	83,9	84,1
C4	71,8	71,6	70,6	71,4	75,0	74,7	74,4	75,3	79,8	78,9	79,1	78,5
	L2 szyna			L2 połączenie			L3 szyna			L3 połączenie		
Con1	88,1	87,7	87,7				89,0	88,5	88,4			
Con2	87,6	87,5	87,1	87,7	87,6	86,4	88,2	88,1	87,3	88,3	88,1	87,8
Con3	87,5	86,9	85,7	87,4	87,2	86,9	88,3	87,8	87,4	88,1	87,5	88,2
Con4	86,6	86,4	86,0	86,5	86,3	85,7	87,7	87,6	86,6	87,7	88,1	87,8
Con5	86,3	86,0	85,8	86,4	86,5	85,7	87,6	87,2	86,9	87,8	87,5	87,2
Con6	85,7	85,5	85,6				87,5	86,8	86,0			
Powietrze												
P1	47,2	45,0	42,2	P3	37,0	34,3	38,9	C1,...,C4 – przekroje przewodnika Con1,...,Con4 – przekroje połączenia P1,...,P2 – poziomy powietrza				
	50,7	48,0	48,8		56,3	34,6	52,6					
	41,8	45,1	42,3		36,7	36,6	38,8					
P2	43,8	43,8	41,9	P4	25,5	26,8	27,2					
	57,8	53,4	53,7		25,2	27,8	27,0					
	42,7	42,7	41,9		25,5	27,1	26,5					

Wymiana ciepła między szafą a otoczeniem następuje na drodze konwekcji i radiacji. W celu oszacowania tego wpływu dokonano pomiaru temperatury zewnętrznej powierzchni rozdzielnic. Ze względu na fakt, że emisyjność ścian

jest wysoka pomiar ten jest obarczony małą niepewnością. Dla szafy otwartej temperatura wzrastała wraz z wysokością od $19,7^{\circ}\text{C}$ u dołu do $26,8^{\circ}\text{C}$ w górnej strefie szafy. W związku z tym do modelu numerycznego zaimplementowano temperatura ścian jako liniową funkcję wysokości. Podobnie wygląda sprawa dla szafy zamkniętej, gdzie temperatura zmienia się od $22,7^{\circ}\text{C}$ do $29,6^{\circ}\text{C}$. Widać, że dla obydwu przypadków gradient temperatury jest niemal identyczny, z tym, że poziom temperatury dla zamkniętej rozdzielnicy jest o 3 K wyższy.

4. Wyniki

Temperaturę szyn oraz pole prędkości dla otwartej szafy pokazano na Rysunku 2. Model numeryczny pokazuje najwyższą temperaturę w zworze. Temperatura szyn maleje wraz z oddalaniem się od zwory, ale najniższa temperatura raportowana jest w miejscu połączenia. Szczegółowa analiza pokazuje, że średnia temperatura szyny w modelu numerycznym jest o 5°C niższa a jej odchylenie standardowe względem pomiarów wynosi 5°C .



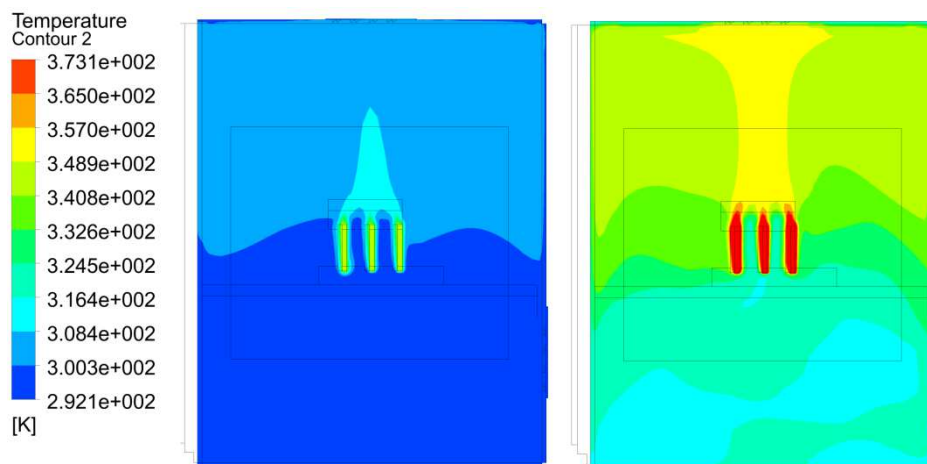
Rysunek 2. Pole temperatury w K (po lewej) oraz prędkości (po prawej) dla szafy otwartej

Figure 2. Temperature in K (left) and velocity in m/s (right) fields for the open box

Analiza pola prędkości pokazuje istnienie wirów w kanale wlotowym, co oznacza, że powietrze jest zasysane przez jego dolną część i na skutek niewielkich otworów wlotowych do szafy część jest zawracana i wylatuje górną częścią kanału wlotowego. W przekroju wylotowym przepływ jest jeszcze bardziej skomplikowany.

Dla szafy zamkniętej sytuacja jest podobna, z tym że model numeryczny pokazuje wyższą temperaturę szyny niż pomiary o około 4 K z odchyleniem standardowym 6 K. Temperatury powietrza na płaszczyźnie przechodzącej przez środek rozdzielnicy dla omawianych przypadków pokazano na Rysunku

3. Zgodnie z przewidywaniami temperatura powietrza jest wyższa dla zamkniętej szafy o około 10-20 K. W tym przypadku temperatura z modelu numerycznego jest o około 5 K wyższa niż zmierzona. Taki poziom rozbieżności odpowiada dokładności modelu. W modelu numerycznym widać również wyraźny wzrost temperatury w okolicy szyny L2, co było widoczne w pomiarach. Różnica w wynikach dla obydwu wariantów polega na znacznie wyraźniej zarysowanym kominie konwekcyjnym dla zamkniętej rozdzielnicy.



Rysunek 3. Pole temperatury dla otwartej (po lewej) oraz zamkniętej (po prawej) szafy

Figure 3. Temperature field in K for open (left) and closed (right) switchgear

5. Wnioski

Opracowany model numeryczny obejmuje dwukierunkowe sprzężenie między modelem elektromagnetycznym oraz cieplno przepływowym. Takie ujęcie pozwala na dokładne oszacowanie strat ciepła, a tym samym temperatury szyn przewodzących w rozdzielnicy. W przypadku sprzężenia jednokierunkowego, założenie stałej temperatury szyn powoduje dużą niepewność szacowanych strat ciepła. To z kolei przekłada się na źle wyznaczaną temperaturę szyn, która jest najważniejszym parametrem analizy. Trzeba jednak zauważyć, że model dwukierunkowo sprzężony jest najbardziej kosztowny obliczeniowo (zbiegnięcie się modelu wymaga około 3 iteracji obydwu modeli cząstkowych). Z drugiej strony taki model jest niezależny w odniesieniu do założonej początkowej temperatury szyn. W ten sposób oferuje bardziej wiarygodne wyniki przy symulacji nowej jednostki lub istniejących modeli z nieznanym poziomem temperatury. Trzeba przyznać, że model może być tylko tak dokładny jak dane do niego wprowadzone, dlatego też dalsze badania są wymagane w celu lepszego określenia mocy czynnej, rezystancji zestykowej czy emisyjności szyn. Pomimo

to należy stwierdzić, że uzyskane pole temperatury wykazało dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Ponadto tendencja zmiany temperatury w zamkniętej oraz otwartej szafka została dobrze określona.

Literatura

- [1] Jackson, R.L., et al., A simplified model of multiscale electrical contact resistance and comparison to existing closed form models, Proc. 55th IEEE Holm Conf. Electrical Contacts, 2009.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/D/ST8/04171.

NUMERICAL MODEL OF COUPLED THERMAL PROCESSES EXISTED IN ENCLOSED STATIONARY FIELD WITH HEAT GENERATION

S u m m a r y

The paper deals with a coupled 3-D mathematical model of heat transfer in an electrical switchbox. The model encompasses heat generation due to electric current flow, radiation (internal and external), natural convection and thermal conduction in conductive and constructional elements inside the switchbox. In the developed model, the electromagnetic and thermal-fluid fields are bilateral coupled. It means that solution is iterative. Such an approach requires both the electromagnetic and fluid flow model to be solved iteratively because of the data transfer between them. The proposed model was used for the simulation of the temperature field in the electric switchbox powered with an alternative current. the model was validated using temperature measurements for several temperature values.

Keywords: coupled model, heat radiation, electromagnetism, electric switchgear.

DOI: 10.7862/rm.2014.48

Otrzymano/received: 25.05.2014

Zaakceptowano/accepted: 28.06.2014