

## Analiza rozkładu strat mocy oraz temperatury w rozdzielniczy niskiego napięcia – analiza sprzężona EM + CFD w oprogramowaniu ANSYS

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę termiczną rozdzielniczy nN zawierającą moduł z wyłącznikiem głównym. Zaprezentowano podejście do analizy sprzężonej składającej się z dwóch etapów tj. wyznaczenia strat przy wykorzystaniu analizy elektromagnetycznej, a następnie przeniesieniu ich do analizy CFD. Obliczone straty ciepła Joule'a (szynoprzewody miedziane, straty indukowane w obudowie) wykorzystano jako dane wejściowe do analizy termicznej, która zawiera rozwiązanie promieniowania oraz konwekcji naturalnej. Wyniki otrzymane w symulacji numerycznej porównano z rzeczywistym testem termicznym wykonanym w laboratorium Rockwell Automation zgodnie z normą IEC 61439-1.

**Abstract.** Paper presents thermal analysis of low voltage motor control center column which contain the main unit with air circuit breaker. Described is two-stage simulation approach which includes electromagnetic and CFD analysis coupled together. The output of electromagnetic simulation is heat loss generated as the results of Joule heating and induction of eddy current on sheet metal parts of the enclosure. Heat loss in an input for further CFD simulation. CFD simulation is used to calculate radiation and natural convection. Results of performed simulation were compared to the real thermal test run in Rockwell Automation laboratory according to IEC 61439-1 standard, (*Analysis of power loss and temperature distribution in low voltage switchgear – coupled analysis EM + CFD in ANSYS software*).

**Słowa kluczowe:** ANSYS, sprzężona, elektromagnetyzm, termika, szynoprzewody, rozdzielnica elektryczna

**Keywords:** ANSYS, electromagnetics, coupled, thermal, busbar, switchgear

### Wstęp

Rozdzielnicze niskiego napięcia przed wdrożeniem na rynek końcowy muszą zostać poddane szeregowi testów. Wynika to z faktu objęcia rozdzielnic dyrektywą elektromaszynową – w szczególności normą IEC 61439. Jednym z najbardziej wymagających testów, które musi spełnić każda rozdzielnica jest weryfikacja obciążenia termicznego, która została szczegółowo opisana w IEC-61439-1 w punkcie 10.10. Punkt ten szczegółowo opisuje sposób obciążania testowanego modułu podając maksymalne dozwolone przyrosty temperatury w krytycznych miejscach z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkownika oraz urządzenia. Według normy producent rozdzielniczy musi objąć testem termicznym wszystkie warianty modułów elektrycznych znajdujących się w ofercie producenta, co sprawia, że testy te są zarówno czasochłonne jak i bardzo kosztowne.

Biorąc pod uwagę obecny postęp technologiczny oraz dynamikę na rynku – producenci aparatury rozdzielniczej zmuszeni są do stałego rozwoju swoich produktów oraz wypuszczania na rynek nowych serii produktów z dużo większą częstotliwością – fakt ten przekłada się bezpośrednio na wzrost kosztów inwestycyjnych w rozwój produktu, którego nieodłączną częścią są kosztowne badania certyfikacyjne.

Symulacja w myśl trwającej czwartej rewolucji przemysłowej (Industry 4.0) staje się zatem nieodłączną częścią procesu projektowego pozwalając na obniżenie kosztów związanych z pracami badawczo-rozwojowymi oraz pozwala na skrócenie czasu potrzebnego od powstania koncepcji do wprowadzenia gotowego produktu na rynek końcowy. Opracowanie szczegółowych modeli numerycznych odzwierciedlających zachowanie się rzeczywistego obiektu podczas pracy może znacząco ograniczyć liczbę budowanych prototypów, a także testów porównawczych wykonywanych na co dzień w laboratorium.

Celem niniejszej pracy było opracowanie metodologii projektowania rozdzielnic w oparciu o symulację komputerową. W ramach artykułu pokazano podejście do tematu analizy sprzężonej obciążenia termicznego rozdzielniczy niskiego napięcia z wykorzystaniem modułów firmy ANSYS do obliczeń pól elektromagnetycznych

(ANSYS Maxwell) oraz dynamiki płynów (ANSYS Fluent lub ANSYS Icepak). Analizie w oprogramowaniu ANSYS poddany został model rozdzielniczy niskiego napięcia składający się z modułu z wyłącznikiem nadprądowym. Moduł ten dedykowany jest do pracy zarówno w sieciach trójfazowych o częstotliwości 50 jak i 60Hz. Na potrzeby przeprowadzonych prac związanych z opracowaniem metodologii przetestowany został moduł pod obciążeniem prądowym 2000 A (wartość skuteczna prądu RMS) w układzie trójfazowym pracującym z częstotliwością 50Hz. Obudowa testowanego modułu spełnia wymagania stopnia ochrony IP54. Zamierzeniem autorów w niniejszej pracy było ujęcie wszystkich zjawisk fizycznych (elektromagnetycznych i termodynamicznych) zachodzących w badanym obiekcie i mających wpływ na stan termiczny badanego obiektu.

### Model numeryczny

Pierwszym etapem pracy było przygotowanie modelu do wykonania analizy elektromagnetycznej w programie ANSYS Maxwell. ANSYS Maxwell jest komercyjnym programem wykorzystującym metodę elementów skończonych i umożliwiających wykonywanie obliczeń elektromagnetycznych 2D i 3D z uwzględnieniem niezbędnych procesów i zjawisk zachodzących w rozdzielnicach nN.

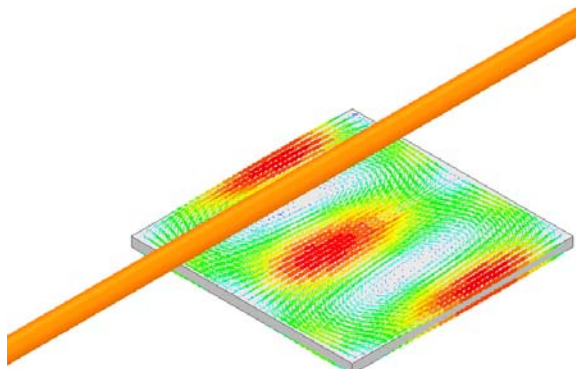
W analizowanym zagadnieniu kluczowe jest wyznaczenie strat ciepła w elementach przewodzących prąd elektryczny (szynoprzewodach) oraz elementach obudowy. Zagadnienie to nie należy do prostych z uwagi na skomplikowany kształt obudowy wewnątrz, rozłożenie przestrzenne szynoprzewodów oraz przemienne pole magnetyczne będące źródłem dodatkowych strat. Oprócz dobrze znanych strat Joule'a (1)

$$(1) \quad P = I^2 \cdot R$$

należy uwzględnić zagadnienia związane z efektem naskórkowości i efektem zbliżenia, które mocno zależą od kształtu badanego obiektu (geometrii) i stanowią istotny udział w całkowitych stratach w rozdzielniczy nN.

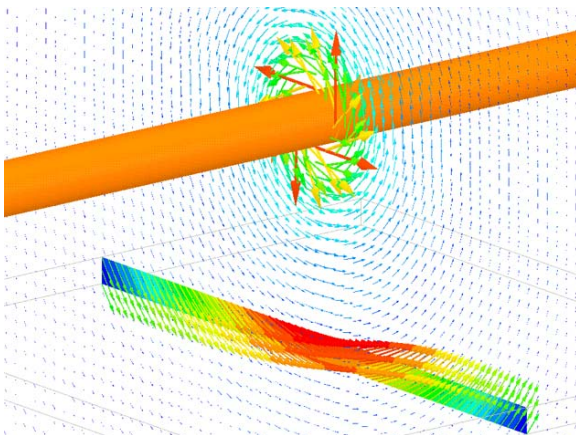
W celu wykonania analizy numerycznej zaimportowano geometrię CAD rozdzielnic bezpośrednio do programu Maxwell – zaimportowana geometria miała wymiary około 0,6m x 0,6m x 2,5m (szerokość / głębokość / wysokość). W kolejnym kroku przypisano własności materiałowe do poszczególnych elementów oraz zadano wymuszenia w poszczególnych szynoprzewodach. Model elektromagnetyczny rozdzielnic składa się z szyn miedzianych, w których ustawiono przepływ prądu przemiennego o wartości skutecznej 2kA, modelu wyłącznika głównego oraz elementów stalowych obudowy.

Wynikiem analizy elektromagnetycznej (EM) są rozkłady pól magnetycznych, gęstości prądów oraz wartości strat ciepła wynikające z grzania rezystancyjnego w szynoprzewodach oraz prądów wirowych, które indukują się w elementach konstrukcyjnych obudowy. Aby lepiej zobrazować zjawisko indukowania się prądów wirowych w obudowie poniżej przedstawiono prosty model składający się z szynoprzewodu umieszczonego nad stalową płytą.



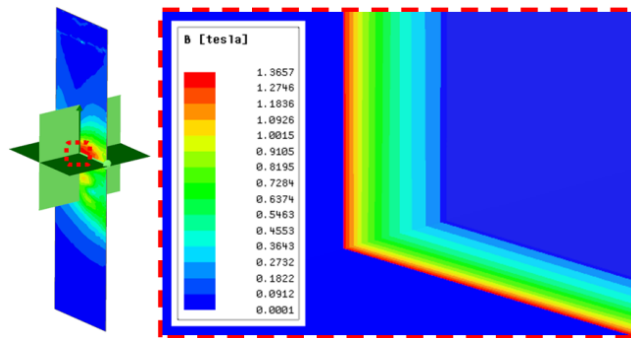
Rys.1. Wektory gęstości prądu w elemencie stalowym

Na rysunku 1 możemy zobaczyć wektory gęstości prądu indukowanego w elemencie stalowym na skutek działania przemiennego pola magnetycznego. Rysunek 2 pokazuje wektory pola indukcji magnetycznej B w pobliżu przewodnika z prądem oraz jego wnikanie w element stalowy.



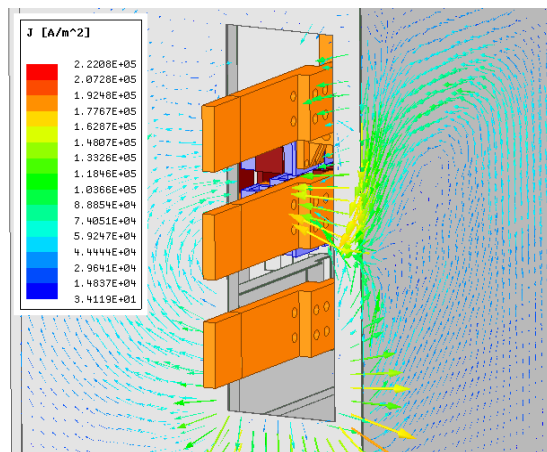
Rys.2. Wektory indukcji magnetycznej B (przyjęto różne skale dla powietrza i elementu stalowego)

Głębokość wnikania pola magnetycznego zależy między innymi od parametrów przenikalności magnetycznej i konduktywności materiału, przenikalności magnetycznej ośrodka i częstotliwości prądu płynącego w przewodniku. Zjawisko to wykorzystywane jest m.in. w kuchenkach indukcyjnych, piecach do wytopu metali, procesach lutowania czy hartowania materiału – w przypadku rozdzielnic nN zjawisko to jest niepożądane i jest źródłem dodatkowych strat i ciepła. Na rysunku 3 przedstawiono wnikanie pola magnetycznego w przekroju tylnej ściany obudowy rozdzielnic.

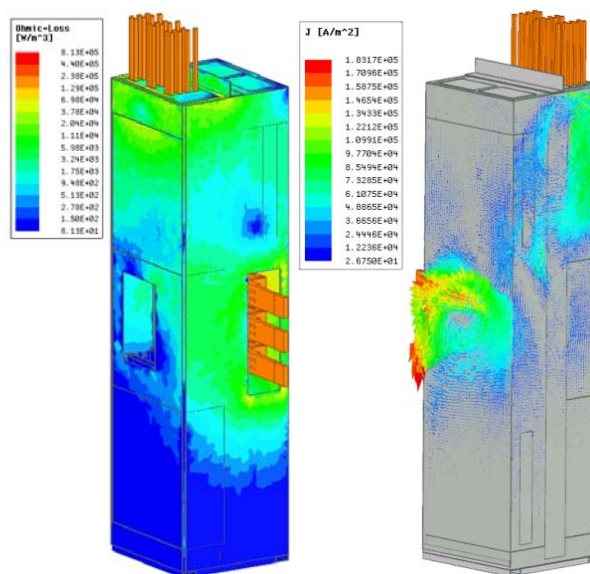


Rys.3. Pole magnetyczne indukowane w elemencie obudowy rozdzielnic (tylnej ścianie obudowy)

Symulacja z wykorzystaniem metody elementów skończonych uwzględnia również inne zjawiska występujące w rzeczywistym obiekcie takie jak efekt zbliżenia czy zjawisko naskórkowości. Na kolejnych rysunkach zaprezentowano zrzuty ekranu z analizy elektromagnetycznej prezentującej gęstości prądów wirowych indukowanych w obudowie rozdzielnic w  $A/m^2$ , a także wartości strat w obudowie  $W/m^3$ .



Rys.4. Prądy wirowe w elementach konstrukcyjnych obudowy rozdzielnic nN



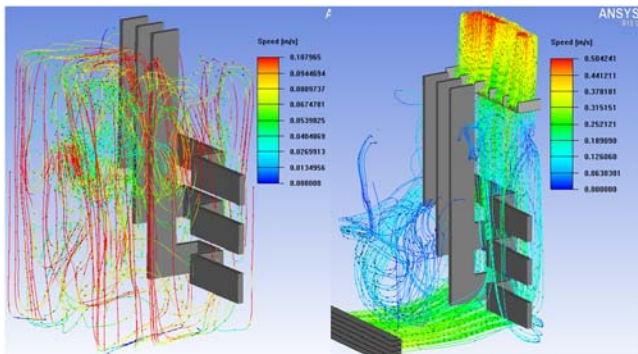
Rys.5. Straty w  $W/m^3$  (skala logarymiczna) w elementach rozdzielnic (lewy) oraz wektory gęstości prądów w obudowie (prawy)

Drugi etap symulacji obejmuje przeniesienie obliczonych strat ciepła w module elektromagnetycznym i użycie ich jako dane wejściowe (źródła ciepła) do analizy termicznej uwzględniającej dynamikę płynów, czyli analizy CFD (Computational Fluid Dynamics). W analizie CFD rozwiązywane jest przewodzenie, konwekcja naturalna oraz promieniowanie.

Analiza przepływowa została wykonana przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS Icepak. Program Icepak bazuje na solverze innego popularnego programu CFD – ANSYS Fluent. Podstawą działania programów CFD jest numeryczne rozwiązywanie równań transportu (zachowania). W zdyskretyzowanej domenie rozwiązywane są w przybliżeniu równania ciągłości strugi, równania Naviera-Stokesa, czy równania zachowania energii cieplnej.

Model przepływowy w odróżnieniu od modelu elektromagnetycznego uwzględnia pełną geometrię wewnątrz rozdzielnic – oprócz elementów stalowych obecnych w modelu EM uwzględniono również elementy izolacyjne oraz przegrody perforowane. Dodatkowe elementy wprowadzone w analizie termicznej stanowią przeszkodę dla przepływającego powietrza oraz mają duży wpływ na temperatury wewnątrz rozdzielnic.

Elementy perforowane (przegrody z otworami, siatki itp.) zostały uwzględnione w analizie w formie odpowiedniego warunku brzegowego. Warunek ten generuje opór dla powietrza odwrotnie proporcjonalny do procentowego udziału powierzchni otworów w płycie w stosunku do jej całkowitej powierzchni. Rozdzielnicę obudowano również otoczeniem powietrza, aby w analizie dokładnie rozwiązać konwekcję wkoło niej. Na rysunku 6 pokazano wpływ otworów w obudowie modelu testowego na cyrkulację powietrza wewnątrz.



Rys.6. Wpływ otworów w obudowie na cyrkulację powietrza wewnątrz

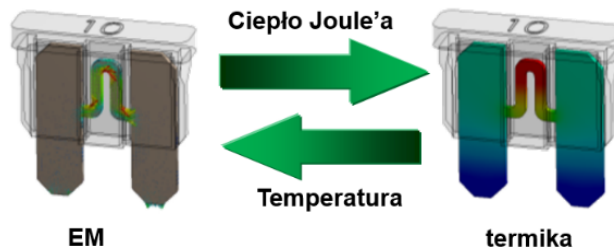
Aby otrzymać dokładniejsze wartości wyników strat i temperatury zdecydowano się w analizie elektromagnetycznej na wprowadzenie parametrów materiałowych miedzi uwzględniających zmianę kondukcyjności od temperatury według wzoru (2)

(2)

$$\sigma = \frac{1}{(1 + 0,039 \cdot (T - 20))}$$

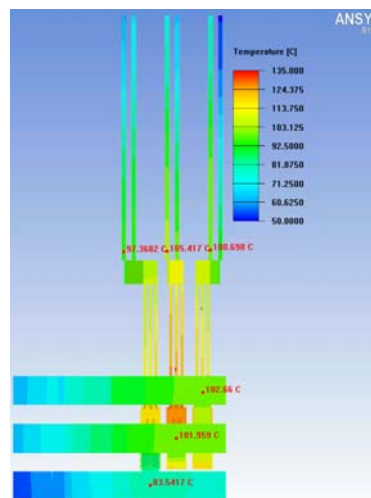
Wprowadzenie zależności kondukcyjności od temperatury w Maxwellu w połączeniu z analizą CFD w Icepaku pozwala na wykonanie tzw. sprzężenia dwustronnego, czyli obliczone w analizie elektromagnetycznej straty ciepła przekazywane są do Icepaka, gdzie na podstawie wartości obciążeń (zaimportowanych strat ciepła), własności materiałowych oraz termicznych warunków brzegowych otrzymujemy

temperaturę dla poszczególnych komponentów wewnątrz rozdzielnic.



Rys.7. Schemat analizy sprzężonej EM – CFD

Kolejny etap to przeniesienie wyliczonych w Icepaku wartości temperatur do Maxwella, gdzie program na podstawie rozkładu temperatury w obiekcie zmienia wartości kondukcyjności w poszczególnych elementach obiektu. Ideę analizy sprzężonej dwustronnej zilustrowano na rysunku 7. Iteracje pomiędzy modułami wykonywane są w sposób automatyczny do momentu ustalenia się temperatur. Należy podkreślić, że wartości strat tylko w elementach konstrukcyjnych stanowią blisko 10% całkowitych strat w związku z czym nie mogą być one pominięte. Na rysunkach 8 i 9 pokazano rozkłady temperatur będących wynikiem analizy sprzężonej w oprogramowaniu ANSYS. Temperatury na zewnętrznej obudowie rozdzielnic znajdują się w przedziale od 25 do 75°C – przy czym najwyższe temperatury występują na bocznych ściankach rozdzielnic m.in. w pobliżu miejsca przechodzenia szynoprzewodów przez obudowę, co wynika z faktu indukowania się prądów wirowych w obudowie oraz bezpośredniego oddawania ciepła do obudowy przez szynoprzewody.

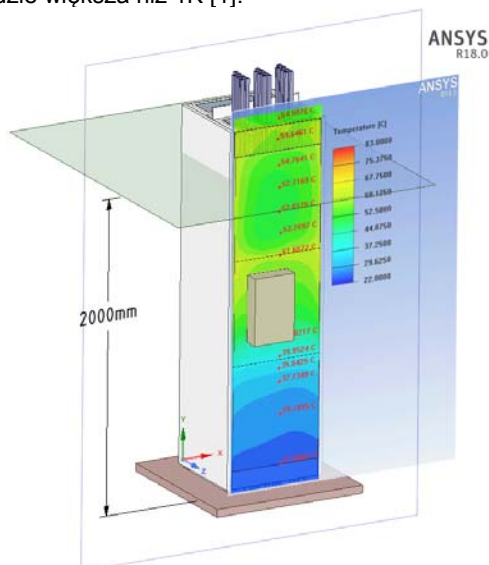


Rys.8. Rozkład temperatury na szynoprzewodach wewnątrz rozdzielnic nN uzyskany w oprogramowaniu ANSYS

### Test termiczny

Weryfikacja modelu numerycznego została wykonana na podstawie testu termicznego według standardowej procedury opisanej w normie IEC 61439-1. Norma ta szczegółowo definiuje maksymalne przyrosty temperatur w określonych miejscach testowanego modułu podczas obciążenia prądem znamionowym. Typowe miejsca pomiarowe to między innymi terminale przyłączy klienta, szyny miedziane, elementy izolacyjne, elementy obudowy, czy też terminale urządzeń elektrycznych, których warunki pracy określone są przez producenta. Rysunek 10

przedstawia termoparę mierzącą temperaturę w miejscu przyłączy klienta. Wartości przyrostów temperatury podczas testu muszą być odniesione do średniej temperatury otoczenia mierzonej po obu stronach badanej kolumny. Sam test powinien być przeprowadzony w stanie ustalonym tj. do momentu, w którym w przeciągu jednej godziny zmiana temperatury we wszystkich punktach pomiarowych nie będzie większa niż 1K [1].



Rys.9. Rozkład temperatury na obudowie rozdzielnic podczas pracy, symulacja komputerowa – stan ustalony

Na rysunku 11 zamieszczono zdjęcie stanowiska badawczego w Rockwell Automation składającego się z układu zasilającego – panelu sterowania, trzech autotransformatorów, rozdzielnic, układu pomiarowego (termopary, przetworniki analogowo-cyfrowe, komputera z oprogramowaniem do zapisu i analizy danych).



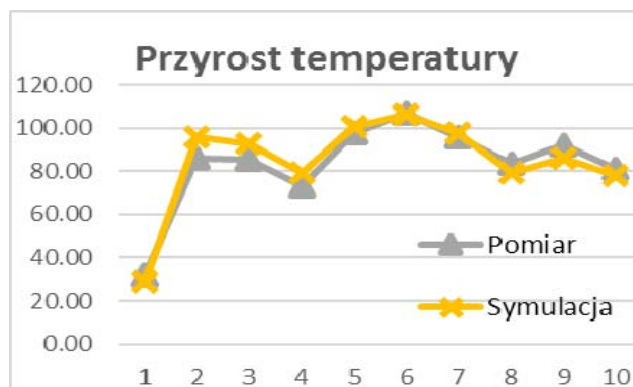
Rys.10. Termopara umieszczona na środkowej fazie przyłączy klienta



Rys.11. Stanowisko pomiarowe w laboratorium Rockwell Automation

## Podsumowanie i wnioski

Wyniki uzyskane z symulacji komputerowej mają dobrą korelację z wynikami eksperymentu - różnice w wartościach mogą wynikać z niedoskonałej siatki numerycznej, uproszczeń geometrii lub niedokładnych modeli materiałowych. Celem niniejszej pracy było otrzymanie identycznego trendu temperatur, który obserwowany jest podczas badań laboratoryjnych – założenie to zostało spełnione. Zgodność przyrostów temperatury w krytycznych lokalizacjach wskazanych w normie (przyłącza klienta oraz elementy wyłącznika) kształtują się na poziomie 95%. Porównanie wartości przyrostów temperatur otrzymanych w symulacji komputerowej z wartościami pomiarów przedstawiono na rysunku 12. Opracowany w ramach współpracy model numeryczny rozdzielnic daje dobrą podstawę do prowadzenia dalszych prac badawczo-rozwojowych, a przedstawione w artykule rezultaty pozwalają nie tylko na zastąpienie testów porównawczych symulacją komputerową, ale dają również podstawę do tego, aby w przyszłości myśleć o zastąpieniu części testów weryfikacyjnych – co wiąże się z jeszcze lepszym odzwierciedleniem modelu rzeczywistego rozdzielnic w modelu komputerowym.



Rys.12. Przyrosty temperatur w poszczególnych punktach pomiarowych oraz symulacji komputerowej

Wykorzystanie symulacji numerycznej w procesie projektowym pozwala m.in. na optymalizację istniejących konstrukcji rozdzielnic w celu zwiększenia oddawania ciepła do otoczenia, czy też wyeliminowaniu miejsc w których mamy do czynienia ze stagnacją powietrza. Symulacja komputerowa pozwala również na znaczącą redukcję kosztów, skrócenie czasu projektowania oraz wpisuje się idealnie w czwartą rewolucję przemysłową.

## Autorzy:

mgr inż. Tomasz Kądziołka, mgr inż. Maciej Kryś, MESco Sp. z o.o.  
E-mail: info@mesco.com.pl., mgr inż. Artur Wiertek, Rockwell Automation

## LITERATURA

- [1] IEC 61439-1 *Low-voltage switchgear and control assemblies – part 1: General rules*
- [2] ANSYS *Documentation*, ANSYS Inc.
- [3] Materiały szkoleniowe: *Obliczenia pól elektromagnetycznych w ANSYS Maxwell*, MESco Sp. z o.o.
- [4] Kądziołka T., Kryś M., Wiertek A., Analiza rozkładu strat mocy oraz temperatury w rozdzielnicach niskiego napięcia – analiza sprzężona z wykorzystaniem MES (EM+CFD) w programie ANSYS Maxwell i Icepak, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 02 (2017), 129-133