

dr hab. inż. Marcin Ziółkowski, prof. ZUT
Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Stosowanej
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, 19 lutego 2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

wykonana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 10 grudnia 2024 r.

Tytuł rozprawy:

Analiza zjawisk fizycznych w układach stykowych i torach prądowych podczas przepływu prądu znamionowego oraz zwarciovowego

Autor rozprawy:

mgr inż. Sebastian Łapczyński

Promotor:

dr hab. inż. Łukasz Kolimas, profesor uczelni

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Aktualnie projektowanie układów elektrycznych i elektromagnetycznych opiera się przede wszystkim na zastosowaniu zaawansowanych programów CAD, które głównie wykorzystują metodę elementów skończonych MES (ang. *Finite Element Method*) oraz metodę elementów brzegowych MEB (ang. *Boundary Element Method*). Dzięki wysokiej wydajności współczesnych komputerów jest obecnie możliwe modelowanie oraz analizowanie bardzo złożonych kształtów układów i aparatów elektrycznych w zagadnieniach obejmujących sprzężone środowiska elektromagnetyczne, mechaniczne i cieplne.

Celem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej było zbudowanie modeli komputerowych wraz ze szczegółową analizą zjawisk fizycznych zachodzących w układach stykowych oraz torach prądowych aparatów elektrycznych oraz urządzeń rozdzielczych w trakcie przepływu prądów znamionowych i zwarciovych. W symulacjach numerycznych uwzględniono m.in. rozkład pola temperaturowego prowadzącego do nagrzewania się elementów aktywnych i pasywnych, a także rozkład pola elektrycznego, ładunku, gęstości prądu i potencjału elektrycznego. Dodatkowo, w niektórych przypadkach przeprowadzono analizy odkształceń mechanicznych. Otrzymane wyniki badań zaprezentowano w jedenastu opublikowanych artykułach naukowych oraz w sześciu patentach włączonych do rozprawy.

Autor rozprawy, na stronie 12, sformułował następujące tezy:

„Istnieje możliwość badania zjawisk fizycznych związanych z przepływem prądu znamionowego i zwarciovowego przez aparaty elektryczne i urządzenia rozdzielcze z wykorzystaniem szczegółowych, wiarygodnych modeli 3D oraz symulacji wykorzystujących metodę elementów skończonych. Istnieje możliwość badania zjawisk fizycznych związanych z techniką łączenia realizowaną przez aparaty elektryczne i urządzenia rozdzielcze na drodze symulacyjnej z dużą zbieżnością wyników”.

Ponadto, Autor zdefiniował tezy szczegółowe odnoszące się do opublikowanych przez Niego artykułów naukowych oraz uzyskanych praw do patentów:

- A. „Istnieje możliwość badania sił elektrodynamicznych w układach stykowych i torach prądowych aparatów elektrycznych i urządzeń rozdzielczych z wykorzystaniem szczegółowych modeli 3D i zaawansowanych symulacji MES (A5, A9, A10, A11, P1). Dotyczy to również przypadków, w których obliczenia analityczne są uproszczone, a pomiary eksperymentalne niemożliwe”.
- B. „Istnieje możliwość badania zjawisk termicznych w torach prądowych aparatów elektrycznych i urządzeń rozdzielczych z dużą zbieżnością wyników już na wstępnym etapie projektowania tychże urządzeń z wykorzystaniem modeli 3D i metody elementów skończonych (A6, A7, A8)”.
- C. „Istnieje możliwość budowania wiarygodnych modeli 3D do analizy zjawisk fizycznych elektromagnetycznych w urządzeniach elektrofizycznych (A2, A4, P2, P3, P4, P6)”.
- D. „Istnieje możliwość budowania wiarygodnych modeli 3D do analizy zjawisk elektromechanicznych i mechanicznych związanych z pracą układów stykowych aparatów elektrycznych na różnych poziomach napięć (A1, A3)”.
- E. „Istnieje możliwość prototypowania wiarygodnych konstrukcji urządzeń elektromechanicznych, elektrycznych oraz elektronicznych na podstawie otrzymanych wyników eksperymentalnych oraz z symulacji wykonanych za pomocą oprogramowania wykorzystującego metodę elementów skończonych (P1–P6)”.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił przegląd literatury dotyczący analizy zjawisk fizycznych w torach prądowych, zestykach aparatów elektrycznych i urządzeniach rozdzielczych podczas przepływu prądu znamionowego i zwarciovego. W przytoczonych cytowaniach bibliograficznych zwrócono uwagę na takie istotne analizy, jak: rozptył prądu elektrycznego w układach, nagrzewanie się elementów układów, rozkład sił elektrodynamicznych oddziaływujących na układ, czy dobór parametrów mechanicznych projektowanego układu stykowego.

Przegląd ten przyczynił się do wykazania się przez Autora ogólną wiedzą w dyscyplinie naukowej, co – obok rozwiązania problemu naukowego – jest ustawowym wymogiem przypisanym rozprawom doktorskim. Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub artystycznego oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Do przeglądu literaturowego nie mam większych zastrzeżeń merytorycznych. Doktorant niewątpliwie wykazał wysoki poziom wiedzy teoretycznej w zakresie tematyki poruszanej w rozprawie. Należy podkreślić, że Autor przeanalizował źródła literaturowe także w drugim rozdziale rozprawy, przy okazji omawiania publikacji i patentów załączonych do treści rozprawy. Zamieszczona w rozdziale czwartym rozprawy bibliografia zawiera łącznie 110 pozycji. Z dokonanej analizy wynika, iż są to przede wszystkim artykuły naukowe opublikowane w okresie ostatnich dwudziestu pięciu lat.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W rozdziałach nr 2 („Wkład autora rozprawy”) oraz nr 3 („Podsumowanie pracy i wnioski końcowe”) Autor deklaruje, że przedstawione w pracy doktorskiej wyniki badań eksperymentalnych i teoretycznych pokazują poprawność tezy rozprawy. Materiał badawczy odnoszący się do tezy rozprawy jest bardzo obszerny. Doktorant, przygotowując niniejszą rozprawę, przedstawił budowę oraz wybrane konstrukcje aparatów elektrycznych. Omówił szczegółowo zjawiska fizyczne

(elektryczne, termiczne oraz mechaniczne) występujące podczas przepływu prądów znamionowych oraz zwarciovych w układach stykowych oraz torach prądowych. Następnie, Autor opracował modele numeryczne (warunki brzegowe, warunki symulacyjne oraz geometrię) wybranych aparatów elektrycznych, a następnie dokonał ich symulacji w celu otrzymania wyników jak najbliższych rzeczywistym warunkom eksperymentalnym. Finalnie, wykonano porównawcze badania eksperymentalne rzeczywistych aparatów, włączając w to badania zwarciove.

Doktorant rozwiązał postawione zagadnienia, użył właściwej do tego metody, a przyjęte założenia są uzasadnione.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Wkład rozprawy do dziedziny układów i systemów elektroenergetycznych polega na:

- zbudowaniu szczegółowych modeli numerycznych aparatów elektrycznych z reprezentacją graficzną w skali odpowiadającej obiektom rzeczywistym;
- przygotowaniu symulacji numerycznych;
- nowatorskim podejściu do symulowania zjawisk elektrofizycznych ładunku elektrycznego jako cząstki płynu oraz zjawisk konwekcji cieplnej poprzez wykorzystanie modułu mechaniki płynów;
- zaplanowaniu i wykonaniu oryginalnych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem własnoręcznie przygotowanych stanowisk badawczych;
- otrzymaniu wyników symulacyjnych zbieżnych z wynikami eksperymentalnymi;
- propozycji modyfikacji konstrukcji dla wybranych aparatów lub ich elementów oraz doświadczalne określenie sensu tych modyfikacji w celu poprawy parametrów elektrycznych oraz mechanicznych aparatów;
- przedstawieniu sposobu prototypowania oraz projektowania urządzeń, który w przyszłości może znacząco ograniczyć ilość generowanych odpadów, przyspieszyć proces projektowania oraz istotnie zminimalizować koszty produkcyjne i czas wdrożenia danego aparatu elektrycznego.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Poniżej przedstawiam wypunktowane uwagi zasadnicze oraz redakcyjne wraz z odniesieniem się do publikacji oznaczonych w rozprawie jako A1-A11.

(A1) Currents of contact welding in a static layout: A laboratory exercise

Abstract – The purpose of the proposed course is to enhance students' knowledge, engineering skills and understanding in the field of electrical contacts power engineering – the currents of contact welding. The main goal for students is to acquire brief skills concerning measurements of certain parameters using static layout: currents that cause contact welding, clamping force of contacts joints and breaking force. Moreover, students are encouraged to obtain soft skills like confidence in the mentioned field and creativity. Student work during the exercise is evaluated on the basis of report from laboratory work and test. Essential aspect is safety training while working with HV and MV switchgears – that is another obligatory feature which participants will obtain from this course. Course

results were evaluated as significant on the basis of concluded statistical analysis and comparison to previous formula employed during the classes.

Jak wskazano we wstępie, nie jest to typowy artykuł naukowy, ale pewnego rodzaju opis kursu o charakterze dydaktycznym. Dotyczy on poszerzenia wiedzy i umiejętności inżynierskich wśród studentów, związanych z pomiarami niektórych parametrów, np.: prądów powodujących zgrzewanie styków (prądy szczipienia), siły docisku połączeń stykowych czy sił zrywających w układzie stykowym wysokiego napięcia. W wyniku realizacji artykułu opracowano stanowisko do prób eksperymentalnych oraz badań o charakterze dydaktycznym.

Uwagi zasadnicze:

- a) proszę o wskazanie źródła bibliograficznego wzoru (1), ponieważ mam wrażenie, że sprawdzenie jednostek nie daje [A] (biorąc pod uwagę jednostki wielkości przedstawionych w artykule);
- b) do jakich obliczeń w artykule wykorzystywany był wzór (1) (poza wykresem przedstawionym na Fig. 3)?
- c) we wzorze (1) nie ma symbolu ρ , który Doktorant przedstawia w opisie tego wzoru jako rezystancję z jednostką $[\Omega \cdot m]$. We wzorze (1) jest użyty symbol ρ_0 , w dodatku zapisany kursywą;
- d) Fig. 3 – czy wartości prądów przedstawione na wykresie zostały zmierzone lub obliczone przez Doktoranta?

(A2) Low voltage modular circuit breakers: FEM employment for modelling of arc chambers

Abstract – *FEM (finite element method) is an essential and powerful numerical method that can explicitly optimize the design process of electrical devices. In this paper, the employment of FEM tools such as SolidWorks, COMSOL and ANSYS is proposed in order to aid electrical apparatuses engineering and modeling – those are arc chambers of modular circuit breakers. Procured models of arc chambers have been undergoing simulations concerning heating, electric potential distribution, electric charge velocity and traverse paths. The data acquired has been juxtapositioned against experimental data procured in the Short-Circuit Laboratory, Warsaw University of Technology. The reflection of the theoretical approach was clearly noted in the experimental results. Mutual areas of the modeled element expressed the same physical properties and robustness errors when tested under specific conditions – faithfully reflecting those which were experimented with. Moreover, the physical phenomena essential for electrical engineering could be determined.*

MES (metoda elementów skończonych) jest istotną i potężną metodą numeryczną, która może wyraźnie zoptymalizować proces projektowania urządzeń elektrycznych. W niniejszym artykule zaproponowano wykorzystanie narzędzi MES, takich jak SolidWorks, COMSOL i ANSYS, w celu wspomaganie inżynierii i modelowania urządzeń elektrycznych - takich jak komory gaszeniowe wyłącznika nadprądowego niskiego napięcia. Modele komór gaszeniowych wyłącznika zostały poddane symulacjom dotyczącym nagrzewania, rozkładu potencjału elektrycznego, prędkości ładunku elektrycznego i ścieżek przemieszczania. Uzyskane dane zostały zestawione z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi w Laboratorium Zwarciovym Politechniki Warszawskiej. Odzwierciedlenie podejścia teoretycznego zostało wyraźnie odnotowane w wynikach eksperymentalnych. Wzajemne obszary modelowanego elementu wykazywały te same właściwości fizyczne i „błędy odporności” podczas testowania w określonych warunkach - wiernie odzwierciedlając te, które zostały poddane eksperymentowi. Co więcej, zjawiska fizyczne istotne dla inżynierii elektrycznej można było określić już na etapie modelowania. Procedura ta okazała się bardzo cenna podczas prac projektowych / inżynierskich pod względem „ekonomii materiałowej”.

Uwagi zasadnicze:

- a) które wyniki, wykresy, tabele przedstawione w artykule pokazują zbieżność pomiarów z obliczeniami numerycznymi („*The reflection of the theoretical approach was clearly noted in the experimental results*”)?
- b) w jaki sposób informacja o rozkładzie potencjału elektrycznego, prędkości ładunku elektrycznego i dróg ładunku wpływa na decyzję projektanta?
- c) w jaki sposób w modelu MES zawarto informację o zwarciowej zdolności wyłączenia (Breaking capacity: $I_{cu} = 6 \text{ kA}$; RMS value)?
- d) dlaczego nie wykonano obliczeń numerycznych / modeli numerycznych, z którymi można by porównać wykresy pomiarowe zaprezentowane na Fig. 11 artykułu?
- e) które wyniki przedstawione w artykule powstały z wykorzystaniem wzoru (1)?

(A3) Mechanical and Electrical Simulations of the Tulip Contact System

Abstract – *The purpose of this work is to discuss the tulip contact behavior during mechanical and electrical simulations in a Finite Element Method (FEM) environment using ANSYS and COMSOL software. During the simulations, the full contact movement was analyzed. During the contact movement, the individual behavior of the contact components was taken into consideration. The motion simulation was carried out at different velocities and forces acting on the contact. The obtained results were compared to each other and discussed. Relatively, the angles of the contact surfaces to each other were also changed, which meant that we could conduct a more in-depth analysis. The other approach of simulation research was a field analysis of physical phenomena occurring in the tulip contact. This analysis was performed in COMSOL Multiphysics. Parametric analysis allowed an observation of the electric field in the tulip contact at different contact distances with respect to each other. This work is important in terms of the cost effectiveness for design procedures concerning tulip contacts and fault avoidance, which both result from mechanical and electrical conditions throughout contact exploitation and optimization of the working conditions for the tulip contact.*

Celem pracy było omówienie zachowania styku tulipanowego podczas symulacji mechanicznych i elektrycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) przy użyciu oprogramowania ANSYS i COMSOL. Podczas symulacji przeanalizowano pełny ruch styku. Podczas ruchu styku wzięto pod uwagę indywidualne zachowanie elementów styku. Zmieniano również kąty nachylenia powierzchni styku względem siebie, dzięki czemu można było przeprowadzić bardziej dogłębną analizę. Kolejnym podejściem badań symulacyjnych była analiza pola zjawisk fizycznych zachodzących w styku tulipanowym. Analiza ta została przeprowadzona w programie COMSOL Multiphysics. Analiza parametryczna pozwoliła na obserwację pola elektrycznego w styku tulipanowym przy różnych odległościach styku względem siebie. Praca ta jest ważna z punktu widzenia opłacalności projektowania projektowych dotyczących styków tulipanowych i unikania usterek, które wynikają zarówno z mechanicznych, jak i elektrycznych podczas eksploatacji styku i optymalizacji warunków pracy styku tulipanowego.

Uwagi zasadnicze:

- a) które rysunki, wykresy dotyczące obliczeń numerycznych omawiają pełny ruch („*the full contact movement was analyzed*”)?
- b) dlaczego nie wykonano obliczeń numerycznych / modeli numerycznych, z którymi można by porównać wykresy pomiarowe z Fig. 33 i 34?
- c) Cytat z artykułu: “*Unfortunately, the current computing environments do not allow analyses to be carried out as one analysis—analysis of the movement of connections with the applied potentials and material permeabilities. This would reproduce the working environment of the contacts. The official response from ANSYS says that it is currently not possible to combine*

Explicit Dynamics' high-speed analysis module with ANSYS MAXWELL's field analysis", co można przetłumaczyć jako: Niestety, obecne środowiska obliczeniowe nie pozwalają na przeprowadzanie analiz jako jednej analizy - analizy ruchu połączeń z zastosowanymi potencjałami i przenikalnością materiału. Pozwoliłoby to odtworzyć środowisko pracy styków. Oficjalna odpowiedź od firmy ANSYS: „obecnie nie jest możliwe połączenie modułu szybkiej analizy Explicit Dynamics z analizą polową ANSYS MAXWELL.

Pytanie: czy nadal (aktualnie mamy rok 2025) odpowiedź firmy ANSYS jest taka sama? A jaka jest odpowiedź firmy Comsol odnośnie tego problemu?

- d) Cytat: „*Note that the error value increased at the end of the move. Nevertheless, it was still significantly below the assumed error limit*”.

Pytanie: jaki jest błąd akceptowalny dla Autora? Do jakiej wartości referencyjnej był odniesiony?

Uwagi redakcyjne:

W Abstract i Conclusions artykułu są zdania, które zaczynają się małą literą:

- „the motion simulation was carried out at different velocities and forces acting on the contact”;
- “the obtained results were compared to each other and discussed”;
- “the obtained results confirm the operation and maintenance documents (DTR) regarding the proper servicing and diagnosis of switching devices”;
- “the issue of analyzing the operation of a tulip contact has certainly not been exhausted”;

(A4) Control system and measurements of coil actuators parameters for magnetomotive micropump concept

Abstract – This paper presents an approach to the construction and measurements of electrodynamic and reluctance actuators. Executive elements were used as drives in a novel concept of a magnetomotive micropump. The paper discusses various aspects concerning the designation of parameters, control system, the explanation of physical phenomena, and the optimization of the basic elements for coil units. The conducted work describes the measurement system and the analysis of the derived values. The actuators were compared and the pros/cons of building the conceptual device were highlighted. The best solution to be used in the upcoming work concerning the construction of a magnetomotive micropump was chosen based on measurements, engineering aspects, layout control, and key parameters such as the piston velocity, energy stored in capacitors, and efficiencies.

W artykule przedstawiono podejście do budowy i pomiarów siłowników elektrodynamicznych i reluktancyjnych. Elementy wykonawcze zostały wykorzystane jako napędy w nowatorskiej koncepcji mikropompy magnetomotorycznej. W artykule omówiono różne aspekty dotyczące wyznaczania parametrów, systemu sterowania, wyjaśnienia zjawisk fizycznych oraz optymalizacji podstawowych elementów dla jednostek cewkowych (cewek). W pracy opisano system pomiarowy i analizę uzyskanych wartości. Porównano siłowniki i wskazano wady i zalety budowy koncepcyjnego urządzenia. Najlepsze rozwiązanie, które zostanie wykorzystane w nadchodzących pracach dotyczących budowy mikropompy magnetomotorycznej zostało wybrane na podstawie pomiarów, aspektów inżynierskich, kontroli układu i kluczowych parametrów, takich jak prędkość tłoka, energia zgromadzona w kondensatorach i sprawność.

Zlu

Uwagi zasadnicze:

- a) jaka jest przydatność analizy numerycznej (albo pomiarów), jeśli na podstawie np. tabeli nr 3 względny błąd procentowy pomiędzy wartością zmierzoną (37,53 m/s) a wartością symulowaną (42,12m/s) wynosi ponad 10%?

Uwagi redakcyjne:

- a) dlaczego źródła bibliograficzne wzorów 1-16 nie są cytowane?
- b) brak opisu wielkości λ_1 we wzorze (4);
- c) brak opisu wielkości a_1 i a_2 we wzorach (5) i (6);
- d) brak opisu wielkości φ we wzorze (15);
- e) wzory (1) i (2) nie są poprawnie zapisane, ponieważ do przedstawienia wielkości wektorowej oraz modułu wektora użyto tego samego symbolu (F). Jaki jest cel przedstawiania ogólnie znanego wzoru na siłę Lorentza?

(A5) Calculations of Electrodynamic Forces in Three-Phase Asymmetric Busbar System with the Use of FEM

Abstract – *Proper busbar selection based on analytical calculations is of great importance in terms of power grid functioning and its safe usage. Experimental tests concerning busbars are very expensive and difficult to be executed. Therefore, the great advantage for setting the valid parameters for busbar systems components are analytical calculations supported by FEM (finite element method) modelling and analysis. Determining electrodynamic forces in busbar systems tends to be crucial with regard to subsidiary, dependent parameters. In this paper analytical calculations of asymmetric three-phase busbar system were carried out. Key parameters, like maximal electrodynamic forces value, mechanical strength value, busbar natural frequency, etc., were calculated. Calculations were conducted with an ANSYS model of a parallel asymmetric busbar system, which confirmed the obtained results. Moreover, showing that a model based on finite elements tends to be very helpful in the selection of unusually-shaped busbars in various electrotechnical applications, like switchgear.*

Właściwy dobór szyn zbiorczych na podstawie obliczeń analitycznych ma ogromne znaczenie dla funkcjonowania sieci elektroenergetycznej i jej bezpiecznego użytkowania. Testy eksperymentalne dotyczące szyn zbiorczych są bardzo kosztowne i trudne do przeprowadzenia. W związku z tym dużą zaletą przy ustalaniu prawidłowych parametrów komponentów układów szyn zbiorczych są obliczenia analityczne wspierane przez modelowanie i analizę MES (metoda elementów skończonych). Wyznaczanie sił elektrodynamicznych w systemach szyn zbiorczych ma kluczowe znaczenie w odniesieniu do pomocniczych, zależnych parametrów. W niniejszym artykule przeprowadzono obliczenia analityczne asymetrycznego trójfazowego układu szyn zbiorczych. Obliczono kluczowe parametry, takie jak maksymalna wartość sił elektrodynamicznych, wartość wytrzymałości mechanicznej, częstotliwość drgań własnych szyn zbiorczych itp. Obliczenia przeprowadzono za pomocą modelu ANSYS dla równoległego asymetrycznego układu szyn zbiorczych, co potwierdziło uzyskane wyniki. Co więcej, wykazano, że model oparty na elementach skończonych jest bardzo pomocny w doborze nietypowo ukształtowanych szyn zbiorczych w różnych zastosowaniach elektrotechnicznych, takich jak rozdzielnice.

Uwagi zasadnicze:

- b) czy doktorant zdanie: Wyznaczanie sił elektrodynamicznych w systemach szyn zbiorczych ma kluczowe znaczenie w odniesieniu do pomocniczych, zależnych parametrów („*Determining electrodynamic forces in busbar systems tends to be crucial with regard to subsidiary, dependent parameters*”) może poprzeć jakimiś danymi ilościowymi?

- c) w artykule analizowano nietypowo czy typowo ukształtowane szyny zbiorcze? („Moreover, showing that a model based on finite elements tends to be very helpful in the selection of unusually-shaped busbars in various electrotechnical applications, like switchgear”)
- d) jaka jest praktyczna przydatność zaprezentowanych analiz, jeśli w tabeli nr 4 błąd pomiędzy wartością obliczoną analitycznie i numerycznie zmienia się w przedziale od 7,8 do 9,4%? Która wartość jest prawdziwa i na jakiej podstawie można tak stwierdzić?
- e) Jaka jest przydatność praktyczna dla projektanta deformacji pokazanych na Fig. 15? Które deformacje są dopuszczalne, a które niedopuszczalne?

(A6) Transient Thermal Analysis of NH000 gG 100A Fuse Link Employing Finite Element Method

Abstract – *In this paper, a detailed three-dimensional, transient, finite element method of fuse link NH000 gG 100 A is proposed. The thermal properties during the operation of the fuses under nominal (100 A) and custom conditions (110 and 120 A) are the main focus of the analyses that were conducted. The work concerns both the outside elements of the fuse link (ceramic body) and the elements inside (current circuit). Both the distribution of the electric current and its impact on the temperature of the construction parts of the fuses during their operating mode have been described. Temperature distribution, power losses and energy dissipation were measured using a numerical model. In order to verify and validate the model, two independent teams of scientists executed experimental research, during which the temperature was measured on different parts of the device involving the rated current. Finally, the two sets of results were put together and compared with those obtained from the simulation tests. A possible significant correlation between the results of the empirical tests and the simulation work was highlighted.*

W artykule zaproponowano szczegółowy, trójwymiarowy, przejściowy model wkładki bezpiecznikowej NH000 gG 100A wykonany za pomocą metody elementów skończonych. Głównym przedmiotem przeprowadzonych analiz są właściwości termiczne podczas pracy bezpieczników w warunkach nominalnych (100 A) i w warunkach niestandardowych (110 i 120 A). Prace dotyczą zarówno elementów zewnętrznych wkładki bezpiecznikowej (korpus ceramiczny), jak i elementów wewnętrznych (obwód prądowy). Opisano zarówno rozkład prądu elektrycznego, jak i jego wpływ na temperaturę elementów konstrukcyjnych bezpieczników w trakcie ich pracy. Przy użyciu modelu numerycznego zmierzono rozkład temperatury, straty mocy i rozpraszanie energii. W celu weryfikacji i walidacji modelu, dwa niezależne zespoły naukowców przeprowadziły badania eksperymentalne, podczas których mierzono temperaturę na różnych częściach urządzenia przy prądzie znamionowym. Na koniec oba zestawy wyników zostały zestawione i porównane z wynikami uzyskanymi z testów symulacyjnych. Podkreślono możliwą i znaczącą korelację między wynikami testów empirycznych i prac symulacyjnych.

Uwagi zasadnicze:

- a) Cytat: „All calculations related to the current flow in the fuse links are possible using the following Maxwell equations”. Jakie równanie jest rozwiązywane w programach Ansys Maxwell i Comsol wykorzystujących metodę elementów skończonych w celu wyznaczenia przepływu prądu w układzie elektromagnetycznym?

Uwagi redakcyjne:

- a) Niefortunny zwrot („Temperature distribution, power losses and energy dissipation were measured using a numerical model.”), ponieważ za pomocą modelu numerycznego niczego nie można zmierzyć;

(A7) Transient Thermal Analysis of the Circuit Breaker Current Path with the Use of FEA Simulation

Abstract – *The finite element analysis (FEA) is an essential and powerful numerical method that can explicitly optimize the design process of electrical devices. In this paper, the employment of the finite element method (FEM) as ANSYS is proposed in order to aid electrical apparatus engineering and modeling of low voltage modular circuit breakers. The procured detailed model of a miniature circuit breaker (MCB) was undergoing transient thermal simulations of the current path. Acquired data were juxtapositioned with experimental data procured in the laboratory. The reflection of the simulation approach was clearly noted in the experimental results. Mutual areas of the modeled element expressed similar physical properties and robustness errors while tested in the specific conditions—faithfully reflecting those that were experimented with. Moreover, the physical phenomena essential for electrical engineering could be determined on the model stage. These types of 3D models can be used to analyze the thermal behavior of the current path during the current flowing condition.*

Analiza metodą elementów skończonych (MES) jest istotną i potężną metodą numeryczną, która może wyraźnie zoptymalizować proces projektowania urządzeń elektrycznych. W artykule zaproponowano zastosowanie metody elementów skończonych (MES) ANSYS w celu wspomagania inżynierii aparatury elektrycznej i modelowania modułowych wyłączników niskiego napięcia. Uzyskany dokładny model miniaturowego wyłącznika automatycznego (MCB) został poddany symulacjom termicznym toru prądowego w stanie przejściowym. Uzyskane dane zostały zestawione z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi w laboratorium. Odzwierciedlenie podejścia symulacyjnego zostało wyraźnie zauważone w wynikach eksperymentalnych. Wzajemne obszary modelowanego elementu wykazywały podobne właściwości fizyczne i błędy odporności podczas testowania w określonych warunkach - wiernie odzwierciedlając te, które zostały poddane eksperymentowi. Co więcej, zjawiska fizyczne istotne dla inżynierii elektrycznej można było określić na etapie modelowania. Tego typu modele 3D mogą być wykorzystane do analizy termicznej ścieżki prądowej podczas przepływu prądu.

Uwagi zasadnicze:

- a) na jakiej podstawie Doktorant stwierdza, że zbieżność obliczeń poniżej 1% jest wynikiem zadowalającym („*The simulation calculation error can be related to the error described as “energy error”, which in ANSYS Maxwell is reduced during the automatic compaction of the mesh during subsequent computational iterations by the function—“adaptive mesh refinement”—in areas where fields are of interest or the field gradients are high. The obtained convergence of calculations below 1% is a satisfactory result for this type of simulation*”)?
- b) Jak zdefiniowany jest wskaźnik “energy error” i co z niego wynika?
- c) w którym miejscu artykułu w sposób bezpośredni i ilościowy przedstawiono porównanie symulacji z pomiarami?

(A8) Thermal Analysis of Heat Distribution in Busbars during Rated Current Flow in Low-Voltage Industrial Switchgear

Abstract – *The manuscript presents advanced coupled analysis: Maxwell 3D, Transient Thermal and Fluent CFD, at the time of a rated current occurring on the main busbars in the low-voltage switchgear. The simulations were procured in order to aid the design process of such enclosures. The analysis presented the rated current flow in the switchgear busbars, which allowed determining their temperature values. The main assumption of the simulation was measurements of temperature rise during rated current conditions. Simulating such conditions is a valuable asset in order to design better solutions for energy distribution gear. The simulation model was a precise representation of the actual prototype of the switchgear. Simulations results were validated by experimental research. The heat dissipation in busbars and switchgear housing through air convection was presented. The temperature*

distribution for the insulators in the rail bridge made of fireproof material was considered: halogen-free polyester. The results obtained during the simulation allowed for a detailed analysis of switchgear design and proper conclusions in practical and theoretical aspects. That helped in introducing structural changes in the prepared prototype of the switchgear at the design and construction stages. Deep analysis of the simulation results allowed for the development concerning the final prototype of the switchgear, which could be subjected to the full type tests. Additionally, short-circuit current simulations were procured and presented.

Manuskrypt przedstawia zaawansowaną analizę sprzężoną: Maxwell 3D, Transient Thermal i Fluent CFD, w momencie wystąpienia prądu znamionowego na głównych szynach zbiorczych w rozdzielnic niskiego napięcia. Symulacje zostały przeprowadzone w celu wspomagania procesu projektowania takich obudów. Analiza przedstawiała przepływ prądu znamionowego w szynach rozdzielnic, co pozwoliło na wyznaczenie ich wartości temperaturowych. Głównym założeniem symulacji były pomiary przyrostu temperatury w warunkach prądu znamionowego. Symulacja takich warunków jest cenna w celu projektowania lepszych rozwiązań dla rozdzielnic energetycznych. Model symulacyjny był dokładnym odwzorowaniem rzeczywistego prototypu rozdzielnic. Wyniki symulacji zostały potwierdzone badaniami eksperymentalnymi. Przedstawiono rozpraszanie ciepła w szynach zbiorczych i obudowie rozdzielnic poprzez konwekcję powietrza. Uwzględniono rozkład temperatury dla izolatorów w moście szynowym wykonanym z materiału ognioodpornego: poliestru bezhalogenowego. Wyniki uzyskane podczas symulacji pozwoliły na szczegółową analizę konstrukcji rozdzielnic i wyciągnięcie odpowiednich wniosków w aspekcie praktycznym i teoretycznym. Pomogło to we wprowadzeniu zmian konstrukcyjnych w przygotowanym prototypie rozdzielnic na etapie projektowania i budowy. Dogłębna analiza wyników symulacji pozwoliła na opracowanie ostatecznego prototypu rozdzielnic, który mógł zostać poddany pełnym badaniom. Dodatkowo przeprowadzono i zaprezentowano symulacje prądów zwarciovych.

Uwagi zasadnicze:

- a) jaki błąd dotyczący rozwiązania popełniono ograniczając się w analizie numerycznej do przestrzeni dwuwymiarowej („*In the analyzed case, it was decided to use the Fluent CFD 2D solver*”) zamiast pełnej przestrzeni trójwymiarowej?
- b) w artykule napisano: po wygenerowaniu wysokiej jakości siatki obliczeniowej do solwera dodano parametry konwekcji (współczynnik konwekcji i temperaturę otoczenia) oraz promieniowania (emisyjność i temperaturę otoczenia) dla miedzianych szyn zbiorczych. Jak należy rozumieć „wysoką jakość siatki obliczeniowej” i skąd wzięto wartość współczynnika konwekcji oraz emisyjności? (“*After making a high-quality computational grid, the parameters for convection (film coefficient and ambient temperature) and radiation (emissivity and ambient temperature) for copper busbars were added to the solver.*”)
- c) co wynika z rysunków widocznych na Fig. 11? Czy na ich podstawie można sformułować wytyczne dla projektanta?

(A9) Increasing Magnetic Blow-Out Force by Using Ferromagnetic Side Plates inside MCB

Abstract – *The paper presents a modern method of computer modeling, concerning the low-voltage extinguishing chambers employed in modular apparatuses. The focus was put on presenting the phenomenon of increasing the blow-out, through the use of ferromagnetic plates, dividing the electric arc inside the electrical apparatus. The use of ferromagnetic material for the production of extinguishing chambers results in the distortion of the magnetic field generated by the electric arc. This creates a magnetic force that draws the arc towards the plate area of the extinguishing chamber. The authors presented a modern tool for the analysis of physical phenomena inside the extinguishing*

chamber. The presented material makes it possible to examine the influence of changes in the geometry and materials of the mentioned components on the process of switching off the current. The applied approach can be used to analyze physical phenomena in devices, not only for alternating current, but also for direct current. Moreover, the model is scaled to the various parameters of these devices.

W artykule przedstawiono nowoczesną metodę modelowania komputerowego niskonapięciowych komór gaszeniowych stosowanych w aparatach modułowych. Skupiono się na przedstawieniu zjawiska zwiększenia wydmuchu, poprzez zastosowanie płyt ferromagnetycznych, rozdzielających łuk elektryczny wewnątrz aparatu elektrycznego. Zastosowanie materiału ferromagnetycznego do produkcji komór gaszeniowych powoduje zniekształcenie pola magnetycznego generowanego przez łuk elektryczny. Powoduje to powstanie siły magnetycznej, która przyciąga łuk elektryczny w stronę obszaru płytek komory gaszeniowej. Autorzy przedstawili nowoczesne narzędzie do analizy zjawisk fizycznych wewnątrz komory gaszeniowej. Zaprezentowany materiał umożliwi badanie wpływu zmian geometrii i materiałów wymienionych elementów na proces wyłączenia prądu. Zastosowane podejście może być wykorzystane do analizy zjawisk fizycznych w urządzeniach, nie tylko dla prądu przemiennego, ale również dla prądu stałego. Co więcej, model jest skalowany do różnych parametrów tych urządzeń.

Uwagi zasadnicze:

- a) cytat: przeprowadzona w ten sposób symulacja obliczeniowa stanowiła podstawę do przeprowadzenia walidacji eksperymentalnej polegającej na określeniu ścieżki przemieszczania się łuku elektrycznego wewnątrz komory gaszenia i pomiędzy jej płytami, z uwzględnieniem wpływu sił elektrodynamicznych na łuk (*"The computational simulation, performed in this way, was the basis for conducting the experimental validation of determining the electric arc displacement path inside the extinguishing chamber and between its plates, including the impact of electrodynamic forces on the arc."*) W jaki sposób symulacja numeryczna przedstawiająca na Fig. 10-12 rozkład indukcji elektromagnetycznej może przełożyć się na walidację eksperymentalną przedstawioną na Fig. 15 dotyczącą zarejestrowanego prądu zwarciovego, a na dodatek ani w modelu numerycznym, ani w eksperymencie nie obliczano, nie mierzono i nie porównywano wspomnianych sił elektrodynamicznych?

(A10) Electrodynamic Forces in a High Voltage Circuit Breakers With Tulip Contact System FEM Simulations

Abstract – *Paper concerns the effects of electrodynamic forces that act on the contacts of the tulip contact system that is often implemented in high voltage circuit breakers. The high voltage circuit breaker often consists of two such systems. One of the systems is treated as an arcing one - made of tungsten coated elements. Capable of implementing the phenomenon of thermal-expansion. The second is made of one or two crown laces. The first system consists of a single piece of large mass, cut in such a way as to obtain the effect of increasing the contact surface. The second is a system, often of several dozen contacts, so as to increase the contact area and reduce the transition resistance. The main problem of actual validation through dynamic measurements (electrodynamic forces) is the specificity of the circuit breaker operation. The contact system is located directly in the switch chamber filled with CO₂ or SF₆ gas. Hence, tests under normal working conditions are very difficult - even impossible. Therefore, the authors proposed employment of FEM (Finite Element Method) in order to obtain values of electrodynamic forces acting on the contact system by executing the detailed 3D coupled simulation. The analysis of the results brought interesting conclusions that concerned operation of such contact layouts in short circuit conditions.*

Alu

Artykuł dotyczy wpływu sił elektrodynamicznych działających na styki układu tulipanowego, który jest często stosowany w wyłącznikach wysokiego napięcia. Wyłącznik wysokiego napięcia często składa się z dwóch takich układów. Jeden z układów jest traktowany jako łukowy - wykonany z elementów pokrytych wolframem. Zdolny do realizacji zjawiska rozszerzalności cieplnej. Drugi jest wykonany z jednej lub dwóch koronek. Pierwszy układ składa się z pojedynczego elementu o dużej masie, przyciętego w taki sposób, aby uzyskać efekt zwiększenia powierzchni styku. Drugi to system, często składający się z kilkadziesiątu styków, tak aby zwiększyć powierzchnię styku i zmniejszyć opór przejścia. Głównym problemem rzeczywistej walidacji poprzez pomiary dynamiczne (sił elektrodynamicznych) jest specyfika pracy wyłącznika. Układ styków znajduje się bezpośrednio w komorze wyłącznika wypełnionej gazem CO₂ lub SF₆. Dlatego testy w normalnych warunkach pracy są bardzo trudne, a nawet niemożliwe. W związku z tym autorzy zaproponowali zastosowanie MES (metody elementów skończonych) w celu uzyskania wartości sił elektrodynamicznych działających na układ stykowy poprzez wykonanie szczegółowej symulacji sprzężonej 3D. Analiza wyników przyniosła interesujące wnioski dotyczące działania takich układów stykowych w warunkach zwarciovych.

(A11) Examination of Electrodynamic Forces in High Voltage Disconnecter Related to the Short-Circuit Current Using the Digital Twin Technology

Abstract – *Paper concerns the novel modelling technology called digital twin in aspect of physical phenomenon simulation analysis. Digital twin model concerning electrodynamic forces in three-phase high voltage disconnecter was presented, validated and discussed. Experiences related to laboratory work and measurement of electrodynamic forces clearly showed that often, despite the use of modern computing machines, the research process is hard, very expensive and values of electrodynamic forces are almost impossible to measure in real scale conditions. Hence the idea to use very advanced field models minimized to a reduced order model (ROM), using the digital twin technology seemed valid and rendered possibilities for advancements concerning this type of research.*

Due to the large weight of devices (chokes, transformers, disconnectors) on high-voltage networks it is often time-consuming or even impossible to perform the entire simulation. Proposed modelling approach helps to obtain results from very complex models also for long-term thermal tests. The reduced order model can be used not only by researchers, but also in the development departments of enterprises. Digital twin model results were compared and validated with values derived from short-circuit tests made in Institute of Power Engineering, Research Institute.

Artykuł dotyczy nowej technologii modelowania zwanej cyfrowym bliźniakiem w aspekcie analizy symulacji zjawisk fizycznych. Przedstawiono i omówiono model bliźniaka dotyczący sił elektrodynamicznych w trójfazowym rozłączniku wysokiego napięcia. w trójfazowym odłączniku wysokiego napięcia. Doświadczenia związane z pracami laboratoryjnymi i pomiarem sił elektrodynamicznych wyraźnie pokazały, że często pomimo zastosowania nowoczesnych maszyn obliczeniowych, proces badawczy jest trudny, bardzo kosztowny, a wartości sił elektrodynamicznych są prawie niemożliwe do zmierzenia w warunkach rzeczywistych. Stąd pomysł wykorzystania bardzo zaawansowanych modeli polowych zminimalizowanych do modelu zredukowanego rzędu (ROM) z wykorzystaniem technologii cyfrowego bliźniaka wydawał się zasadny i dawał możliwości na postęp w tego typu badaniach. Ze względu na dużą masę urządzeń (dławiki, transformatory, odłączniki) w sieciach wysokiego napięcia wykonanie całej symulacji często jest czasochłonne lub nawet niemożliwe. Proponowane podejście do modelowania pomaga uzyskać wyniki z bardzo złożonych modeli również dla długoterminowych testów termicznych. Model zredukowany może być wykorzystywany nie tylko przez naukowców, ale także w działach rozwoju przedsiębiorstw. Wyniki modelu cyfrowego bliźniaka zostały porównane i zweryfikowane z wartościami z testów zwarciovych przeprowadzonych w Instytucie Energetyki.

Inne uwagi zasadnicze dotyczące treści rozprawy:

- strona nr 33: „Ogromną zaletą tej metody jest możliwość sprawdzenia skomplikowanych scenariuszy, w których stosuje się różne warunki brzegowe” – jakie warunki brzegowe Doktorant ma na myśli?

Inne uwagi redakcyjne dotyczące treści rozprawy:

- strona nr: 7 „Dlatego powinny być projektowane, konstruowane i eksploatowane w taki sposób, aby dopuszczalne ograniczenia ich parametrów technicznych, wynikające z odpowiednich przepisów i norm były nieprzekroczone” – brak w zdaniu podmiotu;
- strona nr 14: „opracowaniu koncepcji artykułu” – brak przecinka na końcu;
- strona nr 15: „przygotowaniu symulacji” – brak przecinka na końcu;
- strona nr 31: błędnie napisany wyraz „Ponad to” (drugi wiersz od dołu);
- strona nr 39: niefortunnie sformułowane zdanie: „Zaproponowano również oryginalne, nowe sposoby modelowania zjawisk fizycznych zaproponowano oryginalne, nowe sposoby modelowania zjawisk fizycznych w torach wieloprądowych.”;
- strona nr 40: „Dodatkowo wykonano i zaprezentowano badani dla prądu zwarciovego”;

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Rozprawa dotyczy zagadnienia o bardzo dużym znaczeniu, zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Praca może być materiałem źródłowym dla badaczy zajmujących się projektowaniem układów elektromagnetycznych, a ściślej aparatów elektrycznych oraz energoelektrycznych.

PODSUMOWANIE

Uważam, że Autor rozprawy wniósł istotny wkład do teorii i praktyki badanego zagadnienia. Wykazał przy tym, że posiada dużą wiedzę ogólną oraz uzdolnienia do pracy naukowo-badawczej. Wreszcie – co szczególnie ważne w naukach technicznych – skonfrontował rozważania teoretyczne i obliczenia numeryczne z wynikami eksperymentów.

Rozprawa spełnia wymagania i warunki określone w art. 187 ust. 1-2 *Ustawy* i w związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie jej przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony. Równocześnie oczekuję, że podczas publicznej obrony mgr inż. Sebastian Łapczyński odniesie się do moich załączonych uwag.



(Marcin Ziółkowski)