

prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska
Politechnika Poznańska
Instytut Elektroenergetyki
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań
aleksandra.rakowska@put.poznan.pl
tel. kom 693 300 767

Poznań, 2.09.08.2016 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Sławomira Krzewińskiego
pt.: „**Widma emisyjne wyładowań ulotowych generowanych
w modelach linii elektroenergetycznych**”

Recenzja została opracowana na podstawie pisma WE-5002-22/W/16 z dnia 4.07.2016 skierowanego przez Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej – Pana prof. dra hab. inż. Mariana Łukaniszyna. Wykonanie recenzji powierzyła mi Rada Wydziału tej Uczelni uchwałą z dnia 23 czerwca 2016 r.

1. Ogólna charakterystyka tematyki

Występowanie ulotu na przewodach elektroenergetycznych linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć jest zjawiskiem niekorzystnym – nie tylko dla operatorów tych sieci. Dlatego podejmowane są różne działania, aby ograniczyć skutki występowania tego zjawiska, które z punktu widzenia służb eksploatacyjnych stanowią wyładowania niepełne – głównie wokół przewodów linii – i które to wyładowania należy ograniczać ze względu na generowanie dodatkowej straty mocy czynnej oraz wprowadzanie zakłóceń elektromagnetycznych i akustycznych. Oczywiście w niektórych stanach pracy sieci ulot może mieć zadanie pozytywne np. w procesie tłumienia przepięć w sieci. Oceniając warunki powstawania ulotu wokół przewodów czy wielkość strat przez niego generowanych nie wystarczy posługiwać się tylko podstawową formułą opisaną przez Peeka. Wzór sformułowany przez F.W Peeka w roku 1929 jest formułą czysto empiryczną i, jak wykazano w wielu późniejszych pracach naukowych, okazuje się niedostatecznie dokładnym dla celów praktycznych przy rozpatrywaniu zjawisk w liniach najwyższych napięć. Dlatego powstało wiele modyfikacji tego wzoru, ale wiele z nich dotyczy jedynie określonych zakresów parametrów analizowanych warunków pracy przewodów w linii oraz warunków atmosferycznych.

Wydaje się, że ocena ulotu – czyli wyładowań niepełnych w silnym polu elektrycznym o wartości przekraczającej natężenie początkowe jonizacji powietrza w danych warunkach atmosferycznych – od czasu pierwszych prac badawczych do chwili obecnej powinna być już wystarczająco zdefiniowana i ostatecznie opisana. Niestety tak nie jest, o czym świadczy duża liczba prac naukowo-badawczych realizowanych nadal w tej dziedzinie na całym świecie. Wiele prac prowadzonych jest także w Polsce – między innymi rozprawę doktorską p. Rafała Tarko z AGH poświęcono „*Modelowaniu ulotu elektrycznego dla analizy warunków eksploatacyjnych wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych*”. Praca ta dotyczyła przede wszystkim wpływu ulotu na warunki propagacji przepięć atmosferycznych w liniach 400 kV. Jednak nadal problemem otwartym jest możliwość opracowania nowoczesnych i użytecznych metod diagnostycznych do oceny zjawiska ulotu – czyli opracowania narzędzia ułatwiającego eksploatację linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć. Od wielu już lata zespół w Instytucie Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej Politechniki Opolskiej prowadzi bardzo obiecujące prace naukowo-badawcze, mające na celu

opracowywanie i doskonalenie metod diagnostycznych do oceny stanu różnego rodzaju urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Tematyka recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Sławomira Krzewińskiego wpisuje się w zakres tych badań, ponieważ dotyczy badania widm emisyjnych wzn typu ulotowego, generowanych na liniach przesyłowych wysokiego napięcia i możliwości zaproponowania narzędzi diagnostycznych do oceny tego zjawiska. Cel pracy to rozpoznanie zjawiska ulotu wokół przewodów stanowiących model linii elektroenergetycznej wykonanych z różnych materiałów metodami optycznymi. Wyniki uzyskane w rozprawie mogą stanowić materiał do udoskonalenia technicznych metod diagnostyki. Należy podkreślić że tzw. ograniczanie strat technicznych powstających w elementach sieci elektroenergetycznej towarzyszące przesyłowi energii elektrycznej stanowi bardzo poważny problem dla operatorów sieci

W świetle powyższego stwierdzam, że tematyka rozprawy i jej cel – czyli określenie możliwości wykorzystania pomiarów widm emisyjnych towarzyszących ulotowi na przewodach linii napowietrznych do opracowania narzędzia diagnostycznego obejmuje problemy aktualne i wymagające naukowego wyjaśnienia Uważam więc, że podjęcie przez Doktoranta powyższej tematyki jest trafne i uzasadnione – zarówno z naukowego, jak też i technicznego punktu widzenia.

2. Zakres i najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 107 stron, plus 8 stron spisu literatury oraz 25 stron załącznika nr 1 w którym pokazano wyniki pomiarów uzyskanych metodą spektrofotometrii i ich interpretację. Do pracy załączono w wersji elektronicznej także załącznik nr 2, który zawiera zestawienie w postaci graficznej wszystkich uzyskanych wyników pomiarów oraz analiz wraz z listingami programów prowadzonymi w środowisku MATLAB. Praca składa się z ośmiu rozdziałów i rozdziału dziewiątego zawierającego podsumowanie. Spis literatury obejmuje 109 pozycji, a w tym 81 pozycji literatury zagranicznej oraz 17 pozycji – których autorem lub współautorem jest Promotor – dr hab. inż. Paweł Frącz prof. PO. Nie znalazłam niestety w spisie literatury powołania na jakąś publikację Doktoranta.

We wprowadzeniu Doktorant scharakteryzował krajowy system elektroenergetyczny oraz ogólnie opisał co to jest linia napowietrzna, jakie elementy ją tworzą oraz jakie normy dotyczą projektowania linii napowietrznych. W dalszej części rozprawy skupiono na jednym elemencie linii napowietrznej – czyli na przewodach roboczych i występującym na nich zjawisku ulotu.

W rozdziale 2 tym zawarto cel, tezę oraz zakres rozprawy. Sformułowana teza brzmi następująco: **„Widma emisyjne, szczególnie w zakresie UV, związane z wyładowaniami typu ulotowego mogą stanowić bardziej czuły i precyzyjny symptom występowania takich wyładowań, niż stosowane do tej pory miary elektryczne (U_0 i U_s). Znajomość widm wzn charakterystycznych dla materiału z jakiego są wykonane przewody linii elektroenergetycznej może być użyteczna technicznie w bardziej skutecznej diagnostyce linii elektroenergetycznych”**.

W rozdziale 3 przedstawiono charakterystyki wyładowań ulotowych, parametry określające to zjawisko oraz techniczne i ekonomiczne skutki rozwoju ulotu w liniach napowietrznych, a także stosowane metody ich ograniczania.

Rozdział 4 Doktorant poświęcił przeglądowi literatury dotyczącej wyników prac naukowo-badawczych oraz rozważań teoretyczno-technicznych na temat możliwości detekcji i lokalizacji uszkodzeń elementów linii napowietrznych przy pomocy oceny zjawiska ulotu i pomiarów jego intensywności.

Od rozdziału 5 rozpoczyna się opis pracy własnej Doktoranta. Rozdział ten poświęcono omówieniu możliwości detekcji towarzyszących ulotowi widm emisyjnych przy pomocy spektrofotometru i kamery UV, a także wskazano jakie ograniczenia metrologiczne i techniczne towarzyszą tym badaniom wymienionymi narzędziami.

Rozdział 6 to omówienie zastosowanego układu probierczego przez Doktoranta oraz metodyki prowadzenia badań i ich zakresu, a także omówienie wielkości, które charakteryzują uzyskiwane widma emisyjne wyładowań ulotowych podczas pomiarów spektrofotometrem i kamerą.

Kolejny rozdział – rozdział 7 – rozprawy doktorskiej to wyniki i analiza wyników pomiarów widm emisyjnych uzyskanych metodą spektrofotometrii, a rozdział 8 to (w analogiczny sposób zaprezentowane) wyniki i analiza widm emisji świetlnej zarejestrowanych kamerą UV. Każdy z tych dwóch rozdziałów zakończony jest podrozdziałem zawierającym interpretacje uzyskanych wyników i sformułowaniem wniosków dotyczących badań prowadzących z użyciem obu narzędzi.

W rozdziale 9 rozprawy zawarto podsumowanie wyrażone w dość kompaktowy sposób bo zajmuje ono 1,5 strony. W posumowaniu odesłano do poprzednich rozdziałów, w których zawarto wnioski cząstkowe z analizy rezultatów przeprowadzonych przez mgra inż. Sławomira Krzewińskiego. W podsumowaniu wypunktowano także oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy, które zrealizowano podczas jej wykonywania. Stwierdzono również, że: „...otrzymane rezultaty pracy naukowo-badawczej mogą posłużyć do lepszej diagnostyki linii elektroenergetycznych (przewodów), a szczególnie wpływu korozji na intensywność wyładowań niezupełnych”.

Jak wspomniano poprzednio, praca zawiera dodatkowo dwa załączniki – w wersji papierowej załącznik nr 1 to zestawienie wyników uzyskanych metodą spektrofotometrii i ich interpretacja. Natomiast załącznik nr 2 został dołączony do rozprawy w wersji elektronicznej i zawiera obszernie zestawienie wszystkich wyników pomiarów (jako osobne pliki) oraz analiz – również tych prowadzonych w środowisku MATLAB.

Podsumowując stwierdzam, że Autor recenzowanej rozprawy osiągnął założony cel i rozwiązał określone w zakresie pracy zadania. Wnikliwe i szerokie badania eksperymentalne oraz analiza tych wyników z wykorzystaniem autorskich metod pomiarowych i analiz numerycznych widm emisyjnych – zakończone interpretacją uzyskanych rezultatów stanowią poszerzenie wiedzy o prawidłowej lokalizacji źródła wyładowań niezupełnych przy wykorzystaniu zaproponowanych przez Doktoranta narzędzi. Zaproponowana przez Doktoranta metoda oceny intensywności zjawiska ulotu może przybliżyć znacząco wykorzystywanie zaproponowanych metod badawczych w praktyce, a w przyszłości może także pozwolić opracować kompletne, nowoczesne narzędzie diagnostyczne, które byłoby bardzo przydatne dla służb eksploatacyjnych operatorów sieci przesyłowej.

3. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Uwagi dyskusyjne i szczegółowe przedstawiono poniżej.

1. Analizując podstawowy wzór Peeka można stwierdzić, że wartość napięcia krytycznego zależy od napięcia początkowego ulotu, od rodzaju napięcia, konfiguracji przewodów, warunków pogodowych oraz także od stanu powierzchni (przewód jednodrutowy, linka) i czy powierzchnia przewodu jest gładka czy chropowata. We wzorze Peeka nie ujmuje się wpływu materiału zastosowanego na przewody. Wiemy także że np. przewody wiązkowe zmniejszają natężenie pola elektrycznego wokół przewodu, co powoduje wzrost napięcia krytycznego ulotu, a więc ograniczenie strat wywoływanych zjawiskiem ulotu. Pytanie – czy rozważano także ocenę stanu powierzchni przewodów w – jak Doktorant określa – modelu linii? Czy zadaniem Doktoranta byłoby słuszne takie badanie wykonywane przed i po działaniu napięcia probierczego w przyszłych pracach badawczych?
2. Na stronie 4 i stronie 44 (oznaczenie stron odnoszę do wersji papierowej rozprawy) podano informację o zastosowanych przewodach w modelu linii. Przyznaję, że zabrakło mi trochę szerszego opisu tych przewodów (albo nie potrafiłam tego odszukać) – wiemy, że chociażby są różne konstrukcje przewodów – tak popularnie nazywanych obecnie przewodami wysokotemperaturowymi i małoszysowymi (w warstwach zewnętrznych druty o kształcie trapezowym lub w kształcie litery Z). Proszę o informację w jakich liniach elektroenergetycznych są stosowane przewody oznaczone jako FeCu oraz MIG308LSi czy były to materiały przykładowe.
3. W zakończeniu rozdziału 5.3 napisano, że zmierzoną intensywność wnz można porównać do wzorca i na tej podstawie określić czy wyładowania te są groźne dla przewodu. Proszę o

informację, jak należy ustalać wzorzec i czy na podstawie wszystkich wyników badań uzyskanych podczas realizacji doktoratu można by było pokusić się, już na tym etapie, o określenie kryteriów oceny zagrożenia stanu przewodów z powodu oddziaływania zjawiska ulotu.

4. W rozdziale 6.2 stwierdzono, że aby wyeliminować z widm rejestrowanych przy użyciu spektrofotometru oddziaływania tła czyli szumów własnych spektrofotometru – wykonywano pomiar przy wyłączonych transformatorach. Proszę o informację czy używane w eksperymencie transformatory były wolne od wyładowań niezupełnych i czy możliwe wyładowania niezupełne w układzie probierczym mogły w jakiś sposób zakłócać widmo tła.
5. W rozdziale 7.5 napisano: „... Z uwagi na stochastyczny charakter występowania zjawiska ulotu i uwzględniając jego wpływ na zmianę lokalnych warunków fizyko-chemicznych ośrodka występowania”. Proszę o informację jakie warunki fizyko-chemiczne miał Doktorant na myśli.
6. W rozdziale 8.3 zatytułowanym „Zależność liczby zliczeń punktów emisyjnych od napięcia generacji dla różnych odległości między liniami (oczywiście chodzi o przewody) wykonanymi z różnych materiałów” opisano i analizowano część wyników badania widm emisyjnych zarejestrowanych kamerą UV. Proszę o wskazanie, jaką Doktorant by przekazał praktyczną wskazówkę projektantom linii napowietrznych WN w oparciu o te wyniki.

Niestety zauważyłam pewne błędy redakcyjne. Przykładowe z nich przedstawiam poniżej:

- w rozprawie przyjęto, że obiektem badań był model linii napowietrznej, a tak naprawdę obiektem badań były trzy przewody w konfiguracji trójkątnej – przewody wykonane z kilku rodzajów materiałów. Taki sam skrót myślowy zastosowano także w przeglądzie literatury na stronie 27 (środek strony) pisząc: ... *celem jest zbadanie wpływu na wyładowania ulotowe chropowatości powierzchni linii*” a dotyczyło to powierzchni przewodów. Wyniknęły z tego też sformułowania takie jak: „*liniami wykonanymi z różnych materiałów*” (str. 52 i dalej) a np. już w rozdziale 8. określano prawidłowo: „*przewodów linii*”; „*chropowatości linii*” (str. 27), linii wykonanej z aluminium, aluminiowej linii itp.;
- na stronie 4 w wykazie ważniejszych skrótów i oznaczeń napisano:
 U_{fkr} - wartość skuteczna napięcia krytycznego (napięcie początkowe ulotu) [kV],
 U_o - napięcie początkowe ulotu [kV/cm], zależne od rodzaju napięcia, konfiguracji przewodów i warunków pogodowych;
- proponuję słowo „odbiorców” w miejsce słowa „dostawców” na str. 5 w tekście 8 wiersz od góry;
- brak odstępu pomiędzy cyfrą/liczbą a jednostką (m.in. str.5, 6 w od dołu, str. 7 – środek strony, rys. 1.8, rys. 1.11, str. 21 wiersz 3 od dołu, str. 33 i dalsze); najczęściej zastosowany zapis to 36cm – zamiast 36 cm;
- proponuję słowo „przekrój” (przewodu) w miejsce słowa „grubość” (str. 7, od dołu 4 wiersz);
- preferowałabym określenie „wielkości elektryczne/parametry elektryczne” w miejsce „miary elektryczne” (str.9 - teza pracy);
- na stronie 10 użyto słowo „izolator”, które częściej interpretuje się jako: *przedmiot do łączenia i jednocześnie izolowania części będących względem siebie pod napięciem*, w technice wysokonapięciowej raczej określa się to jako: materiał izolacyjny/dielektryk, izolacja;
- na stronie 15 wiersz 11 od góry – użyto wyrażenia „*dystrybucja pól elektrycznych*” powinno raczej być rozkład pól elektrycznych – ponieważ „dystrybucja” to głównie rozprowadzanie jakiś towarów i usług;
- zamiana kolejności rozdziału 3.3 i 3.4 byłaby bardziej logiczna – najpierw by opisano parametry charakteryzujące ulot, a potem metody ograniczania możliwości występowania tego zjawiska i

jego skutków – wówczas w pierwszym zdaniu rozdziału 3.3 byłoby wskazane dopisanie ... *zależne od napięcia znamionowego pracującej linii* ... i przekroju przewodów (co jest w dalszej części tego rozdziału wyraźnie powiązane);

- na stronie 18 w 9 wierszu od dołu użyto słowo „kalkulacji” w miejsce słowa: obliczenia/wyznaczenia;
- na początku rozdziału 4 Doktorant powołuje się na pozycję [2] literatury – ten artykuł dotyczy kabli wysokiego napięcia a nie jak napisano: *izolacji przewodów WN*;
- na stronie 20 na górze użyto sformułowania: „... *na linii pojedynczego i podwójnego obiegu*” – mając na myśli „linię jedno i dwutorową”;
- str. 23 – środek strony – wyrażenie ...*kształt fali propagującej po linii* – brzmi trochę sztucznie;
- str.27 w 12 wierszu od dołu – chyba chodziło o „ulot” a nie przepięcia;
- str. 45 i 46 było 35 czy 30 pomiarów – czy do dalszej analizy usunięto wyniki z 5 pomiarów?
- na str. 109 w pozycji literatury [2] chodzi o Panią Danutę Dymek a nie Danutę D. – i nie ma potrzeby zastosowania kapitalików w każdym z wyrazów tytułu.

Powyższe uwagi edycyjne i redakcyjne w najmniejszym stopniu nie umniejszają mojej pozytywnej oceny, a zostały sformułowane jedynie w celu, aby przy prowadzeniu dalszych prac naukowo-badawczych lub publikowaniu wartościowych dokonań Doktoranta ewentualnie zaakceptować powyższe sugestie i poprawić niektóre elementy tekstu.

Podkreślam, przedstawione uwagi dyskusyjne i redakcyjne nie zmieniają w najmniejszym stopniu mojej pozytywnej oceny całości pracy. W przedłożonej rozprawie Pan mgr inż. Sławomir Krzewiński przedstawił, logicznie usystematyzowany, samodzielny dorobek naukowy. Realizacja rozprawy pokazała, że Doktorant potrafi samodzielnie realizować badania naukowe, opracować metodologię prowadzenia badań, posługiwać się nowoczesnymi metodami badawczymi i wykorzystywać analizę numeryczną do interpretacji wyników i samodzielnie oceniać rezultaty badań. Udowodnił więc w pełni, że potrafi poprawnie rozwiązywać problemy naukowe i logicznie przedstawiać wyniki swoich badań.

4. Wniosek końcowy

Uważam, że cel rozprawy został osiągnięty, a w trakcie realizacji pracy mgr inż. Sławomir Krzewiński wykazał się znacznym zasobem wiedzy w wymaganym zakresie. Doktorant wykazał się także umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych.

Uważam, że przedłożona rozprawa doktorska mgra inż. Sławomira Krzewińskiego pt. „*Widma emisyjne wyładowań ulotowych generowanych w modelach linii elektroenergetycznych*” spełnia w pełni wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o *Stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. Nr 65 poz 595, z późniejszymi zmianami) i w pełni uzasadnia wniosek Doktoranta o nadanie tytułu doktora nauk technicznych w specjalności Elektrotechnika. Wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

