

## Światłowodowy czujnik do detekcji wyładowań niezupełnych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono możliwości zastosowania optycznego czujnika do detekcji wyładowań niezupełnych występujących w systemach przesyłu energii elektrycznej np. rozdzielnicach. Czujnik wykorzystuje zjawisko fluorescencji wzbudzonej w kowalencyjnie modyfikowanym światłowodzie silikonowym światłem, którego emisja jest jednym z efektów wyładowania niezupełnego w materiale.

**Abstract.** The paper presents the possibility of using an optical sensor to detect partial discharges occurring in power transmission systems such as switchgear. The sensor uses the phenomenon of fluorescence excited in a covalently modified silicon optical fiber by light, the emission of which is one of the effects of the partial discharge in the material. (**Fiber optic sensor for partial discharge detection**)

**Słowa kluczowe:** wyładowanie niezupełne, czujnik optyczny, rozdzielnica energetyczna, światłowód fluorescencyjny.

**Keywords:** partial discharge, optical sensor, switchgear, fluorescent optical fiber.

### Wstęp

Wyładowania niezupełne (WZN) występujące w materiałach izolacyjnych są od dawna znanym zjawiskiem, zwłaszcza dla osób zajmujących się instalacjami elektrycznymi średniego i wysokiego napięcia. Pojawianie się wyładowań niezupełnych w urządzeniach elektroenergetycznych jest jedną z pierwszych oznak degradacji lub uszkodzeń materiałów izolacyjnych, które mogą prowadzić do powstawania pożarów, przeciążeń oraz awarii infrastruktury, co bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo personelu obsługującego stacje elektroenergetyczne np. rozdzielnice napięcia, bezpieczeństwo infrastruktury oraz ciągłość dostaw energii elektrycznej. Stąd wynika konieczność ciągłego (obecnie w większości przypadków są to badania okresowe) nadzoru najbardziej wrażliwych elementów systemu związanych z produkcją i dystrybucją energii elektrycznej. Wczesne wykrycie pojawiających się wyładowań niezupełnych pozwala na wczesną interwencję odpowiednich służb serwisowych, a tym samym zapobieżenie znacznie poważniejszym skutkom awarii, co przekłada się na dużo większe skutki również i finansowe.

Na rynku dostępnych jest wiele komercyjnych urządzeń zarówno przenośnych, jak i stacjonarnych służących do wykrywania tych niepożądanych zjawisk. Różnią się one (oczywiście oprócz parametrów technicznych/technologicznych) metodami detekcji związanymi z różnymi zjawiskami fizyko-chemicznymi towarzyszącymi zjawisku wyładowań niezupełnych. Zarówno w ofertach dostawców gotowych rozwiązań, jak i w literaturze naukowej można zauważyć podstawowy podział tych urządzeń: związane ze zjawiskami elektrycznymi oraz nieelektrycznymi [1-5]. Do pierwszej grupy można zaliczyć:

1. Metodę UHF (Ultra High Frequency) opartą o pomiar emisji fali elektromagnetycznej w zakresie częstotliwości radiowych.

2. Metodę HFCT (High Frequency Current Transformer) wykorzystującą pomiar impulsów prądowych (odpowiadających wyładowaniom) na przewodzie ochronnym PE.

Druga grupa (nieelektryczna) obejmuje:

1. Metodę akustyczną – opartą o pomiar fali akustycznej (dźwięki słyszalne oraz ultradźwięki) generowanej przez zjawisko wyładowania niezupełnego.

2. Metodę termiczną związaną ze zmianą temperatury materiału w wyniku wyładowań niezupełnych.

3. Detekcję gazów w przypadku wyładowań powierzchniowych.

4. Metodę optyczną opartą o detekcję światła emitowanego przez zjawisko wyładowania niezupełnego.

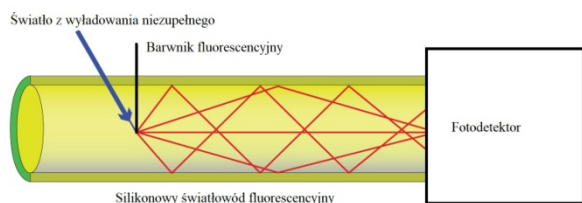
Jednym z głównych ograniczeń związanych z zastosowaniem optycznych metod detekcji jest bardzo niski poziom natężenia światła emitowanego w wyniku wyładowania niezupełnego. Co więcej miejsce wystąpienia zjawiska jest niejednoznaczne do określenia, choć wcześniejsze badania i obserwacje związane z eksploatacją systemów elektroenergetycznych mogą pomóc w określeniu tzw. słabych punktów, w których zazwyczaj zaczyna się proces degradacji materiału. Doświadczenie to nie przewiduje natomiast sytuacji „losowych” związanych z wadami materiałowymi elementów z danej serii produkcyjnej, czy z niestarannym zachowaniem służb serwisowych przeprowadzających montaż lub serwis w sposób niezgodny z procedurami.

Dlatego też systemy optyczne powinny umożliwiać obserwacje maksymalnie dużego pola (wymaga to zastosowania dedykowanych układów optycznych), co oczywiście pozostaje w sprzeczności z wykrywalnością niskich poziomów sygnałów optycznych.

Proponowany w niniejszym artykule optyczny system kontroli stara się pogodzić przedstawione wymagania i ograniczenia. W miejsce typowych systemów wizyjnych wykorzystujących detektor oraz obiektywowy układ zbierający światło z danego kierunku, zdecydowano się wykorzystać w miejsce obiektywu silikonowy, kowalencyjnie modyfikowany światłowód fluorescencyjny rozproszony wzdłuż kluczowych elementów systemu elektroenergetycznego. W przeciwieństwie do konwencjonalnych światłowodów, fluorescencyjne światłowody mogą sprzęgać światło (będące w tym przypadku wynikiem WZN) ze wszystkich kierunków przestrzennych, ponieważ fluorescencja zachodzi w rdzeniu światłowodu, a światło jest przesyłane do jego końców dzięki zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia. Ten wtórny sygnał jest rejestrowany za pomocą fotodetektora, którego rolę może pełnić: fotodioda, licznik fotonów bądź fotopowielacz. Poglądowo czujnik jest przedstawiony na rysunku 1.

Zaletą tego rozwiązania jest możliwość dowolnego poprowadzenia światłowodu, w tym też do miejsc, które nie mogłyby być obserwowane przez klasyczne (obiektywowe) systemy wizyjne np. ze względów konstrukcyjnych, przesłaniających obszary wymagające kontroli. Układy „obiektywowe” musiałyby być multiplikowane, co znacząco podnosiłoby koszt takiego systemu. Z punktu widzenia producentów rozdzielnic montaż wielu dodatkowych

elementów wewnątrz ich konstrukcji mogłoby ponadto znacząco zwiększyć niebezpieczeństwo zwarcia, a w konsekwencji doprowadzić do zniszczenia całej lokalnej infrastruktury. Takie zagrożenie praktycznie nie istnieje w przypadku użycia światłowodu o średnicy około 2 mm wykonanego z materiału o bardzo dobrych parametrach dielektrycznych.



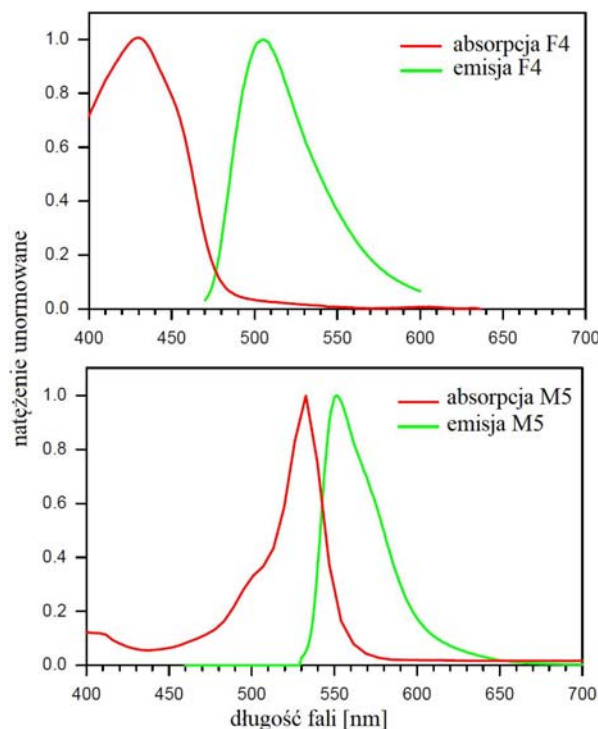
Rys.1. Schemat czujnika optycznego

Kolejną zaletą proponowanego rozwiązania jest fakt, że w zamkniętej rozdzielnicy napięcia, czy też w innych analogicznych elementach systemu przesyłania energii elektrycznej jedynym źródłem światła jest wyładowanie niezupełne. Tak więc pojawienie się sygnału na fotodetektorze jest jednoznaczne z wystąpieniem tego zjawiska. Bardzo istotna jest ponadto możliwość przesyłania za pomocą światłowodu sygnału optycznego na duże odległości. Ma to szczególne znaczenie w sytuacji, w której fotodetektor jest podatny na zakłócenia elektromagnetyczne, co w rezultacie mogłoby powodować powstawanie wielu fałszywych sygnałów oraz duży szum, a tym samym niską użyteczność tego typu sprzętu inspekcyjnego.

### Badania i dobór parametrów światłowodów fluorescencyjnych

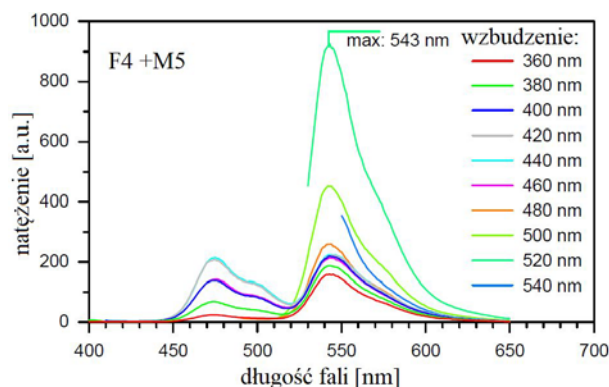
W prezentowanym detektorze wykorzystane zostały silikonowe światłowody opracowane i wyprodukowane przez współpracującą z Łukasiewicz-ITR firmę Polymerics GmbH. Światłowody te charakteryzują się dużą odpornością mechaniczną na ewentualny nacisk oraz znacząco mniejszym promieniem gięcia w porównaniu do klasycznych światłowodów wykonanych ze szkła. Silikony mają również dużo większy potencjał w zakresie ich kowalencyjnej modyfikacji, co jest szczególnie istotne w rozwiązaniu, w którym do silikonu wymagane jest wprowadzenie jednego lub dwóch barwników fluorescencyjnych o określonym stężeniu i proporcjach. Kowalencyjne wiązanie barwnika jest konieczne żeby zapobiec migracji barwników. Dzięki opracowanemu przez firmę Polymerics procesowi wytwarzania kowalencyjnych światłowodów fluorescencyjnych o zadanych parametrach optycznych możliwe było przeprowadzenie licznych testów laboratoryjnych, których celem był wybór optymalnego typu światłowodu, z punktu widzenia wzbudzenia i transmisji światła. W ramach prowadzonych prac przygotowawczych została również opracowana technologia kowalencyjnej modyfikacji silikonu z barwnikami w celu uzyskania jak najbardziej homogenicznego systemu bez migracji barwników i bez obecności bąbli gazu (np. powietrza). Dobrane zostały również wężyki (o wymaganym współczynniku załamania światła), pełniące jednocześnie funkcję płaszczka. Musiał się on charakteryzować również jak największą transmisją światła w zakresie spektralnym promieniowania pochodzącego z wyładowania niezupełnego. Spektrum tego zjawiska różni się zarówno w zależności od typu wyładowań, typu zastosowanej izolacji (gaz, ciecz, materiał stały) oraz temperatury i ciśnienia [6]. Typowo wyładowania niezupełne emitują światło już od 300 nm i sięgają nawet do bliskiej podczerwieni.

Głównym celem badania parametrów światłowodów był optymalny dobór barwników fluorescencyjnych, których spektralny zakres absorpcji był dopasowanych do widma emisji światła pochodzącego z WNZ. Jednocześnie widmo emisyjne barwników powinno leżeć z dala od ich obszaru absorpcji, aby nie prowadzić do zjawiska samowygazowania się wzbudzonego światła. Do testów wybrane zostały dwa barwniki oznaczone jako F4 i M5 (skład barwników jest tajemnicą handlową producenta). Ich widmo absorpcji oraz emisji przedstawione jest na rysunku 2.



Rys.2. Widmo absorpcji i emisji barwników F4 i M5

Maksymalne przesunięcie widma emisji w kierunku dłuższych fal było wskazane ze względu na mniejszą w tym zakresie wrażliwość stosowanych detektorów. Taki też był główny cel zastosowania barwnika oznaczonego jako M5. Zależność widma emisji obu barwników od długości fali wzbudzenia jest pokazana na rysunku 3.



Rys.3. Widmo emisyjne barwników F4 i M5 w zależności od długości fali światła wzbudzającego

Właściwy dobór barwników, ich stężenie oraz proporcje miały również bardzo duży wpływ na kolejny parametr charakteryzujący światłowody, jakim jest wartość tłumienia, czyli strat wynikających przede wszystkim z ekstynkcji światła. Dla typowych, powszechnie stosowanych

światłowodów kwarcowych poziom tłumienia wynosi około 1 dB/km. W przypadku kowalencyjnie modyfikowanych światłowodów silikonowych poziom tłumienia był mierzony na poziomie od kilku do nawet kilkuset dB/m (dla 3 dB spadek sygnału wynosi 50%). Mamy tu więc do czynienia z dwoma konkurującymi ze sobą zjawiskami. Duże stężenie barwnika przekłada się na dużą wartość wzbudzonego sygnału, jednocześnie znacząco podnosząc wartość tłumienia światła. Z drugiej strony zbyt słaba fluorescencja generowała światło poniżej progu detekcji zastosowanej fotodiody (zbyt niski był stosunek sygnału do szumu).

Do badania tłumienia światłowodów zaprojektowano i wykonano dedykowane stanowisko laboratoryjne. Światłowod fluorescencyjny był rozciągnięty w wyłobieniu szyny po której poruszał się wózek z zamontowanym prostopadle do światłowodu oświetlaczem o regulowanej mocy. Zastosowane źródło światła oświetlało krótki odcinek (ok. 2 mm) fluorescencyjnego światłowodu. Wzbudzone promieniowanie było rejestrowane za pomocą fotodiody lawinowej. Wartość tłumienia była wyznaczana poprzez porównanie sygnału przy różnych położeniach wózka względem detektora. Aby zminimalizować wpływ światła rozproszonego pochodzącego bezpośrednio od oświetlacza w pomiarach przyjęta została minimalna jego odległość od detektora wynosząca kilkanaście centymetrów.

W ramach badań przetestowane zostało kilkadziesiąt światłowodów o różnych stężeniach barwników, a tym samym o różnych parametrach optycznych.

### **Propozycja optycznego detektora wyładowań niepełnych**

Do budowy prototypu detektora zdecydowano się na wybór światłowodu oznaczonego jako aks-132 z mieszaniną barwników F4 i M5 o wartości tłumienia 4,4 dB. Średnica światłowodu wynosi 1,8 mm.

Wzbudzone w światłowodzie światło rejestrowane było za pomocą fotodiody lawinowej firmy Thorlabs (model: APD410A2) z regulowanym wzmocnieniem sygnału oraz detektora opracowanego w Ł-ITR wykorzystującego fotodiodę lawinową Hamamatsu (model: S8664-30K). Ze względu na relatywnie dużą średnicę światłowodu i rezygnację z układu optycznego zbierającego światło wychodzące ze światłowodu, element fotoczuły w fotodiodzie lawinowej miał średnicę 3 mm, co umożliwiło rejestrację prawie całego światła opuszczającego światłowod.

Zastosowanie własnego rozwiązania optoelektronicznego dawało pełną kontrolę nad parametrami detektora. Sygnał z fotodiody obserwowano na oscyloskopie. W docelowym rozwiązaniu planowane jest podłączenie detektora do komputera z odpowiednim oprogramowaniem umożliwiającym sterowanie jego parametrami oraz zapis i analizę danych pomiarowych, w tym historię zdarzeń w systemie sieci elektroenergetycznej oraz ostrzeganie o przekroczonych progach poziomu WNZ.

Pomimo zastosowanych rozwiązań maksymalizujących stosunek sygnału do szumu wydaje się, że przy danej wartości tłumienia użyteczna długość światłowodu fluorescencyjnego wynosi około 1 m. Z jednej strony daje to możliwość wyprowadzenia sygnału z miejsc trudno dostępnych, z drugiej strony ogranicza przesyłanie sygnału na duże odległości i umieszczenia układów elektronicznych (w tym fotodiody) poza zasięgiem szumów generowanych przez systemy elektroenergetyczne.

Aby rozwiązać problem transmisji sygnału optycznego, zdecydowano się na wykonanie światłowodu

hybrydowego, czyli połączenia światłowodu fluorescencyjnego ze światłowodem bez barwnika, a tym samym o znikomej wartości tłumienia. W trakcie prób laboratoryjnych testowane były rozwiązania połączenia silikonowego światłowodu fluorescencyjnego z „tradycyjnym” światłowodem szklanym. Testowano również napełnianie wężyków (płaszczki światłowodu) najpierw fluorescencyjnym silikonem, a następnie czystym silikonem. Najlepszym i najprostszym rozwiązaniem okazało się jednak sklejenie dwóch typów światłowodów silikonowych (z i bez barwnika). Wartość tłumienia złącza jest pomijalna i nie wpływa na wielkość i jakość rejestrowanego sygnału. Wykonany światłowod hybrydowy jest pokazany na rys. 4.

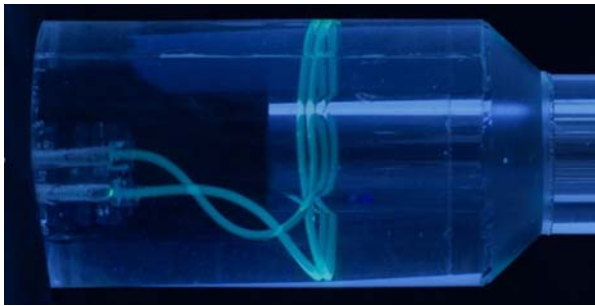


Rys.4. Światłowod hybrydowy

### **Analiza rynku docelowego**

Na podstawie analizy rynku związanego z dystrybucją energii elektrycznej oraz opinii przedstawicieli firm produkujących i serwisujących systemy sieci przesyłowych wytypowane zostały miejsca wymagające zwiększonej kontroli, ze względu na największą częstotliwość występujących awarii. Jednocześnie starano się zidentyfikować miejsca całkowicie odizolowane od światła zewnętrznego, którego natężenie zdecydowanie przewyższa światło będące wynikiem wyładowania niepełnego. Są to mufy kablowe oraz przepusty elektryczne.

Kolejnym problemem, który należało rozwiązać jest fakt, że wszystkie elementy systemów elektroenergetycznych są wykonane z materiałów nieprzezroczystych, co znacząco ogranicza zastosowanie metod optycznych. Obecnie za ich pomocą można rejestrować wyładowania koronowe oraz przebiegi. Zjawiska te występują już w końcowej fazie degradacji urządzenia i jest to etap zbyt późny do detekcji z serwisowego punktu widzenia. Aby móc wdrożyć i skomercjalizować proponowane urządzenie konieczna byłaby zmiana materiałów, z których wykonywane są elementy izolacyjne sieci. Musiałyby one charakteryzować się parametrami dielektrycznymi nie gorszymi od tych stosowanych obecnie oraz przezroczystością dla światła z zakresu spektralnego wyładowania niepełnego. Element tego typu (końcówka lub mufa kablowa) wykonany z przezroczystego silikonu został zaproponowany przez firmę Polymerics. Końcówka kablowa ma w swojej strukturze zamontowany światłowod fluorescencyjny z wyprowadzeniami umożliwiającymi podłączenie jej do detektora. Możliwe jest też bezpośrednie zamontowanie opracowanego światłowodu hybrydowego. Przykład końcówki kablowej z wbudowanym detektorem pokazany jest na rysunku 5.



Rys.5. Końcówka kablowa 20 kV z wbudowanym światłowodem fluorescencyjnym

Wstępne testy zaproponowanej końcówki oraz mufy kablowej zostały przeprowadzone przez firmę Polymerics m.in. z HTW (University of Applied Sciences – Berlin). Wartość wyładowania niepełnego wynosiło około 10 pC. Próg detekcji proponowanego czujnika optycznego jest porównywalny z czułością urządzeń kontrolnych wykorzystywanych przez służby serwisowe.

#### Podsumowanie

Badania potwierdziły skuteczność i użyteczność zaproponowanej metody pomiarowej wykorzystującej silikonowe światłowody fluorescencyjne. W połączeniu z nowymi materiałami do produkcji muf i przepustów kablowych możliwe jest zaproponowanie przemysłowi energetycznemu prostego w montażu i obsłudze systemu detekcji wyładowań niepełnych.

**Autorzy:** dr Adam Czyżewski, Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: adam.czyzewski@itr.lukasiewicz.gov.pl; dr Dariusz Litwin, Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: dariusz.litwin@itr.lukasiewicz.gov.pl; mgr Paweł Michalski, Łukasiewicz - Instytut Tele- i

Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: pawel.michalski@itr.lukasiewicz.gov.pl; mgr Szymon Czerwiński, Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: szymon.czerwinski@itr.lukasiewicz.gov.pl; mgr Mariusz Kucharek, Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: mariusz.kucharek@itr.lukasiewicz.gov.pl; Dipl.-Ing. André Leistner Polymerics GmbH, Landsberger Allee 378A, 12681 Berlin, E-mail: la@polymerics.de; Dipl.-Ing. Marina Stier, Polymerics GmbH, Landsberger Allee 378A, 12681 Berlin, E-mail: st@polymerics.de; Dipl.-Ing. Marina Klose-Stier, Polymerics GmbH, Landsberger Allee 378A, 12681 Berlin, E-mail: as@polymerics.de; Dipl.-Ing. Aleksandra Leistner Polymerics GmbH, Landsberger Allee 378A, 12681 Berlin, E-mail: aleks@polymerics.de; dr Anieli Leistner, Polymerics GmbH, Landsberger Allee 378A, 12681 Berlin.

#### LITERATURA

- [1] Szczechowski J., Siodła K.: Alternatywne metody pomiaru wyładowań niepełnych w transformatorach mocy – próby odbioru i diagnostyka. *Przegląd elektrotechniczny*, 10 (2018), 89-94.
- [2] Sikorski W., Ultraczułe przetworniki emisji akustycznej zoptymalizowane do monitoringu wyładowań niepełnych w transformatorach. *Przegląd elektrotechniczny*, 10 (2016), 10-16.
- [3] Kunicki M., Zastosowanie metody UHF do detekcji i analizy wyładowań niepełnych, *Przegląd elektrotechniczny*, 10 (2016), 58-62.
- [4] Wu J., Mor A.R., Nes P., Smit J., Measuring method for partial discharges in a high voltage cable system subjected to impulse and superimposed voltage under laboratory conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115 (2020)
- [5] Phung T., Blackburn T., Liu Z. Acoustic Measurements of Partial Discharge Signals. *Journal of electrical and electronics engineering, Australia*, 21 (2001), No 1, 41-47
- [6] Muhr M., R. Schwarz R., Experience with optical partial discharge detection. *Materials Science-Poland*, 27 (2009) No. 4/2, 1139-1146