Załącznik nr 3 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

Autoreferat w języku polskim

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko.

Kamil Barczak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- magistra inżyniera: Gliwice, Politechnika Śląska, Wydział Matematyczno-Fizyczny, Fizyka Techniczna, 2001 rok
- doktora nauk fizycznych: Gliwice, Politechnika Śląska, Wydział Matematyczno-Fizyczny, 13 września 2006 r.
  tytuł pracy doktorskiej: *Badanie własności magnetooptycznych światłowodów specjalnych typu D,*
  promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Pustelny

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

Miejsce zatrudnienia:

Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Wydział Elektryczny
Politechnika Śląska
ul. B. Krzywoustego 2
44-100, Gliwice

Historia zatrudnienia:

- w okresie od 6.10.2006 do 30.09.2007 r. pracowałem na stanowisku fizyka w Instytucie Fizyki na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Politechniki Śląskiej,
- w okresie od 1.10.2007 do 30.09.2008 r. pracowałem na stanowisku asystenta w Instytucie Fizyki na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Politechniki Śląskiej,
- w okresie od 1.10.2008 do 30.09.2009 r. pracowałem na stanowisku adiunkta w Instytucie Fizyki na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Politechniki Śląskiej,
- począwszy od 1.10.2009 r. pracuję na stanowisku adiunkta na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Moim osiągnięciem naukowym w rozumieniu art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) jest jednotematyczny cykl 14 publikacji autorskich i współautorskich pt.:

Światłowodowe czujniki pola magnetycznego umożliwiające pomiar natężenia prądu elektrycznego w systemie elektroenergetycznym oraz pomiar natężenia pola magnetycznego w maszynach elektrycznych.

b) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy

[C1] **Barczak K.** , Pustelny T., Dorosz D., Dorosz J., „Polarization maintaining fibers for application in magnetic field measurements", European Physical Journal-Special Topics, 154, pp. 11-14 (2008), DOI: 10.1140/epjst/e2008-00509-2, **IF=0,689**

[C2] **Barczak K.** , Pustelny T., Dorosz D., Dorosz J., „New optical glasses with high refractive indices for applications in optical current sensors", Acta Physica Polonica A, 116(3), pp. 247-249 (2009) **IF=0,433**

[C3] **Barczak K.** , „Application of Photonic Crystal Fiber in Optical Fiber Current Sensors", Acta Physica Polonica A, 122(5), pp. 793-795 (2012) **IF=0,531**

[C4] **Barczak K.** , „Magnetooptic Effects in the Photonic Crystal Fiber as a Function of the Polarization State", Acta Physica Polonica A, 124(3), pp. 384-386 (2013) **IF=0,604**

[C5] **Barczak. K.** , „Magnetooptic effect of photonic crystal fiber in blue region of visible spectrum", Bulletin Of The Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, 62(4), pp. 683-689 (2014), DOI: 10.2478/bpasts-2014-0074, **IF=0,914**

[C6] **Barczak K.** , Pustelny T., Zycki Z., Blazejczyk T., Dorosz D., „Optical Sensor of the Magnetic Field in Electrical Power Engineering", Acta Physica Polonica A, 118(6), pp. 1090-1092 (2010), **IF=0,467**

[C7] **Barczak K.** , „Optical fibre current sensor for electrical power engineering", Bulletin Of The Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, 59(4), pp. 409-414 (2011), DOI: 10.2478/v10175-011-0049-3, **IF=0,966**

[C8] **Barczak K.** , „Optical fiber current sensor with external conversion", 11th Conference On Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, and Methods, Proc. SPIE, 10034 (2016), DOI: 10.1117/12.2503162

[C9] **Barczak, K.** , Mazniewski K., „Investigation of optical fiber current sensor with external conversion in AC magnetic field", Optical Fibers and Their Applications, Proc. SPIE, 10325 (2017) , DOI: 10.1117/12.2270963

[C10] **Barczak K.** , Mazniewski K., „Optical fiber current sensor with external conversion for measurements of low AC electric currents", 12TH Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, And Methods, Proc. SPIE, 10455 (2017), DOI: 10.1117/12.2282805

[C11] **Barczak K.** , Duda D., Mazniewski K., „Optical fiber current sensor with external conversion in high voltage environment", 13th Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, And Methods, Proc. SPIE, 10830 (2018), DOI: 10.1117/12.2503162

[C12] **Barczak K.** , Duda D., Maźniewski K., „Insulating properties of optical fiber current sensor with external conversion", Prz. Elektrot., 94(10), pp. 53-56 (2018) , DOI: 0.15199/48.2018.10.12

[C13] **Barczak K.**, Szablicki M., „Investigation of optical fiber current sensor with external conversion in unstable stands", 13th Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, and Methods, Proc. SPIE, 10830 (2018) , DOI: 10.1117/12.2503158

[C14] **Barczak K.**, Szablicki M., „Configurable optical fiber current transformer", Proc. SPIE, 18th Conference on Optical Fibres and Their Applications, Proc. SPIE, 11045, 110450J (2019), DOI: 10.1117/12.2522345

We wszystkich powyższych artykułach jestem autorem korespondencyjnym.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wstęp

W niniejszym opracowaniu omówienie celu naukowego przeprowadzonych badań zostało poprzedzone syntetycznym wprowadzeniem dotyczącym aktualnego stanu wiedzy, na tle którego ulokowałem motywację podjętych przeze mnie prac badawczych.

Odnośniki do literatury określającej aktualny stan wiedzy będący tłem podjętych przeze mnie badań oznaczyłem dużą literą „U" (np. [U1]). Odniesienia do publikacji zaliczanych do jednotematycznego cyklu będącego moim osiągnięciem naukowym oznaczyłem dużą literą „C" (np. [C1]).

W elektrotechnice stałe pole magnetyczne wykorzystuje się bardzo często w maszynach elektrycznych małej i wielkiej mocy do zamiany energii elektrycznej na mechaniczną, a pole magnetyczne zmienne m.in. do zmiany wartości parametrów energii elektrycznej (np. transformatory energetyczne) oraz do pomiarów natężeń prądów przemiennych. Konieczność dokonywania pomiarów charakterystycznych wielkości pola magnetycznego jest nieodzownym elementem funkcjonowania wielu systemów elektrycznych. Pomiar pola magnetycznego stanowi także jedno ze źródeł informacji pozwalających na ocenę warunków pracy m.in. obiektów elektroenergetycznych, co jest niezbędne do wykrycia nienormalnych stanów pracy. Wiadomo jednak, że nie jest to łatwy pomiar, chociaż należy od początku do obszaru badań podstawowych. Stąd też wciąż obserwowany jest rozwój nowych typów czujników dostosowanych do współczesnych wymagań. Autor opracowania przedstawi własne osiągnięcia w tym zakresie.

Pole magnetyczne jest charakteryzowane przez wielkości wektorowe: natężenie pola magnetycznego i indukcję magnetyczną, które są związane przenikalnością magnetyczną ośrodka, przy czym natężenie pola magnetycznego jest niezależne od ośrodka, natomiast indukcja magnetyczna jest ściśle związana z właściwościami magnetycznymi ośrodka. W poruszanym przeze mnie obszarze badawczym pomiar pola magnetycznego będzie zawsze odbywał się za pomocą sondy w powietrzu, a więc w ośrodku niemagnetycznym. Z tego powodu nie ma znaczenia, którą wielkością będzie opisywane pole, gdyż wielkości te będą związane ze sobą tylko przenikalnością magnetyczną próżni, która jest współczynnikiem skalarnym. W moich badaniach, do opisu pola magnetycznego, przyjąłem używać indukcję magnetyczną. Wybór ten jest podyktowany tym, że dla typowych pól takich jak wokół magnesów trwałych, cewek elektromagnesów czy transformatorów wartość indukcji magnetycznej w powietrzu przyjmuje wartości rzędów 10^{-2}; 10^{-1} oraz 10^{0} T. W przeliczeniu na natężenie pola magnetycznego wartości te (wyrażane w A/m) są w zaokrągleniu $8 \cdot 10^{5}$ razy większe i przez to mniej wygodne w użyciu.

Praktycznie od początku powstania energetyki wielkoskalowej (w takich układach przesyłowi energii elektrycznej towarzyszy wysoka wartość napięcia i wysoka wartość natężenia prądu) do pomiarów parametrów prądów przemiennych stosowano indukcyjne przekładniki prądowe. Ich konstrukcje były doskonalone przez kolejne dziesięciolecia, a mimo to można stwierdzić, że rozwiązania te z trudem nadążają za współczesnymi potrzebami [U1,U2]. Przez szereg lat zmianie uległa również struktura i charakter elementów składowych systemu elektroenergetycznego, w szczególności zmienił się charakter odbiorników i źródeł energii przyłączanych do sieci. Jest to oczywiście związane z bardzo dynamicznym rozwojem cywilizacyjnym i mnogością innowacyjnych rozwiązań technicznych, których wspólnym mianownikiem jest konieczność zasilania energią elektryczną [U3]. W związku z tym stany przejściowe we współczesnym systemie elektroenergetycznym wywołane np. zwarciami, charakteryzują się coraz większą dynamiką i szybkością zmian wielkości elektrycznych opisujących te stany [U4]. W wielu przypadkach konwencjonalne przekładniki indukcyjne nie mogą poprawnie przetworzyć wielkości występujących w obwodach pierwotnych układów elektroenergetycznych na wielkości,

które są doprowadzane do aparatury obwodów wtórnych urządzeń automatyki zabezpieczeniowej i układów pomiarowych [U5]. Obecna technika pomiarowa skoncentrowana jest w dużej mierze na wykorzystaniu układów cyfrowych i wymaga nowych i lepszych (dokładniejszych przede wszystkim w stanach dynamicznych) przetworników pomiarowych, wykazujących mniejsze błędy przetwarzania w stanach zakłóceniowych takich jak np. zwarcia czy przeciążenia danego obiektu sieci elektroenergetycznej. W znaczącym stopniu dotyczy to przede wszystkim przetworników dostarczających sygnały wejściowe dla układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej EAZ [U4-U6].

Światłowodowe czujniki prądu są przetwornikami, które potencjalnie umożliwiają osiągnięcie odpowiednich właściwości spełniających współczesne wymagania EAZ. Nieliczne rozwiązania komercyjne oraz nieliczne przykłady zastosowań pozostawiają szerokie pole do rozwijania badań o charakterze aplikacyjnym. Stan ten wynika w dużej mierze z tego, że ta technika pomiarowa powstała w czasach, gdy elektronika nie była jeszcze w ogóle wykorzystywana w elektroenergetyce, w czasach zdominowanych przez automatykę opartą o urządzenie elektromagnetyczne i elektromechaniczne oraz technikę pomiarową bazującą na zjawiskach elektrycznych i elektromagnetycznych [U7].

Światłowodowe przetworniki do pomiaru pola magnetycznego oraz prądu są rozwijane od połowy lat 70-tych ubiegłego wieku. Dominującym efektem wykorzystywanym w tych czujnikach jest tzw. magnetooptyczny efekt Faradaya. Efekt ten polega na skręceniu płaszczyzny polaryzacji światła w ośrodku znajdującym się w zewnętrznym polu magnetycznym. Czujnik wykorzystujący ten mechanizm jest zatem czujnikiem pola magnetycznego, gdyż w efekcie Faradaya bezpośrednio przetwarzana jest wartość indukcji pola magnetycznego na zmianę skręcenia stanu polaryzacji światła. Światłowodowy czujnik prądu również jest czujnikiem pola magnetycznego, w tym przypadku pola, którego źródłem jest prąd elektryczny. Z tego powodu w moim osiągnięciu dominuje światłowodowy czujnik pola magnetycznego, którego jednym ze szczególnych przypadków jest światłowodowy czujnik prądu. W efekcie Faradaya następuje zmiana stanu polaryzacji światła, a więc światło w ośrodku musi być spolaryzowane, a sam ośrodek nie powinien zniekształcać tego stanu (z wyjątkiem efektu Faradaya). Jak się okazuje ma to kluczowe znaczenie w przypadku stosowania światłowodów włóknistych.

W zakresie światłowodowych czujników prądu do zastosowań elektroenergetycznych istnieje wiele rozwiązań wykorzystujących różne metody detekcji i konstrukcji czujników [U8], które zostały obszernie opisane w literaturze przedmiotu [U9-U19]. Podział ze względu na konstrukcję czujnika można przeprowadzić na wiele sposobów. Autor, bazując na swoim doświadczeniu i znajomości tematu na potrzeby tego opracowania zaproponował podział, który uwypukla sposób doprowadzenia światła do głowicy czujnika (rys. 1).

czujniki optyczne		
doprowadzenia światłowodowe [1)]		doprowadzenia w wolnej przestrzeni [2)]
światłowodowe z przetwarzaniem wewnętrznym	**światłowodowe z przetwarzaniem zewnętrznym**	**objętościowe**
[1)] światło ze źródła do głowicy czujnika oraz z głowicy do detektora doprowadzane jest światłowodami włóknistymi [2)] światło ze źródła do głowicy czujnika oraz z głowicy do detektora doprowadzane jest wiązką świetlną w wolnej przestrzeni		

Rys. 1. Podział optycznych czujników prądu ze względu na ich budowę (wg autora).

Sformułowanie „światłowodowy czujnik prądu” prawie zawsze dotyczy tych z przetwarzaniem wewnętrznym. Są to czujniki, których głowica pomiarowa jest wykonana z pętli światłowodowej (bardziej szczegółowo wspomnę o tym w punkcie I autoreferatu). Z uwagi na

wagę stosowania doprowadzeń światłowodowych zastosowałem podział na światłowodowe czujniki prądu z przetwarzaniem wewnętrznym oraz światłowodowe czujniki prądu z przetwarzaniem zewnętrznym (rys. 1). Taki podział czujników optycznych zaproponowany jest w pracy [U8].

Przeważającą grupę tworzą światłowodowe czujniki prądu z przetwarzaniem wewnętrznym. Z uwagi na to, że magnetooptyczny efekt Faradaya zachodzi we włóknie, istotnym wymogiem jest aby stan polaryzacji światła był modyfikowany tylko przez ten efekt. Do podstawowych problemów wymagających rozwiązania należy wpływ deformacji włókna na sygnał pomiarowy (tzw. efekt elastooptyczny) [U20]. W związku z tym stosuje się specjalne konfiguracje czujnika mające na celu zminimalizowanie tego efektu [U15,U16,U21]. Podstawowym sposobem jest zastosowanie włókna o odpowiednio małej wrażliwości na deformacje wywołane czynnikami zewnętrznymi. Większa czułość na jednostkę długości włókna sprawia, że włókno w głowicy czujnikowej może być krótsze, a co za tym idzie i wpływ efektów elastooptycznych może być mniejszy. Z tego powodu w swojej pracy skoncentrowałem się na badaniach zmierzających do opracowania nowej konstrukcji włókna dla zastosowań w światłowodowym czujniku prądu z przetwarzaniem wewnętrznym. Na pierwszym etapie skupiłem się na osiągnięciu dobrej czułości, co wiąże się ściśle ze stałą Verdeta szkła. Wybór jest ograniczony do szkieł, których parametry technologiczne pozwalają na wytworzenie światłowodu jednomodowego. W wyniku tych badań we współpracy z Katedrą Promieniowania Optycznego Politechniki Białostockiej wytworzono światłowody jednomodowe o skokowym profilu współczynnika załamania (tzw. typu step-index) o wysokim współczynniku załamania oraz światłowody dwójłomne z eliptycznym rdzeniem [U22,U23]. Na podstawie tych doświadczeń, śledząc aktualne trendy postanowiłem zająć się przebadaniem światłowodów fotonicznych (ang. Photonic Crystal Fiber w skr. PCF) pod kątem możliwości ich zastosowania w czujnikach prądu. Są to włókna o przekroju poprzecznym zmodyfikowanym poprzez otwory powietrzne. Jest wiele różnych typów światłowodów PCF, w swoich pracach skupiłem się na potencjalnie możliwym do wykorzystania w czujnikach prądu. Jest to światłowód fotoniczny typu index-guiding (w skr. IGPCF) posiadający rdzeń szklany oraz płaszcz z tego samego materiału z otworami. Otwory w płaszczu zmniejszają współczynnik załamania zapewniając dużą różnicę współczynników załamania. Światłowód prowadzi światło dzięki różnicy współczynników załamania rdzeń-płaszcz dlatego nazwano go index-guiding. W badaniach wykorzystałem komercyjny światłowód stawiając tezę, że będzie on mniej wrażliwy na deformację niż typowy światłowód step-index [C3-C5].

Pomiar pola magnetycznego technikami bazującymi na efekcie magnetooptycznym Faradaya jest wykorzystywany głównie tam gdzie istnieją bardzo duże zakłócenia elektromagnetyczne lub ze względów bezpieczeństwa nie jest wskazane stosowanie urządzeń zasilanych energią elektryczną. Są to czujniki, których sondy są niewielkich rozmiarów z uwagi na potrzebę pomiaru pola w konkretnym punkcie przestrzeni [U24-U26].

W przypadku prowadzonych przez mnie badań w tym zakresie główną motywacją była potrzeba opracowania czujników wybranych maszyn elektrycznych, związana z projektem badawczym skoncentrowanym na maszynach elektrycznych. W tym celu, realizując wymogi projektu, zaproponowałem opracowaną przeze mnie konstrukcję światłowodowego czujnika pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym [C6]. Szczegółowo temat ten omówię w punkcie II autoreferatu.

Ostatnim istotnym elementem mojego osiągnięcia są badania nad światłowodowym czujnikiem prądu z przetwarzaniem zewnętrznym dla zastosowań elektroenergetycznych, w szczególności dla zastosowań w EAZ. Bazując na doświadczeniach ze światłowodowymi czujnikami pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym zaproponowałem wykorzystanie tego typu czujnika do pomiaru prądu [C7]. W tym przypadku w czujniku wykorzystuje się mechanizm przetwarzania wartości indukcji pola magnetycznego, którego źródłem jest prąd elektryczny na zmianę wartości parametrów optycznych głowicy czujnika. Zasadniczym celem stało się dla mnie opracowanie odpowiedniej konstrukcji czujnika oraz wskazanie możliwości

zastosowania go w systemie elektroenergetycznym. W związku z tym wykonałem kilka wersji czujnika oraz przeprowadziłem szereg badań potwierdzających możliwości aplikacyjne tego rozwiązania jako przekładnika prądowego pomiarowego (do pomiarów kontrolnych i rozliczeniowych energii elektrycznej) oraz jako przekładnika prądowego zabezpieczeniowego (do dostarczania sygnałów do zabezpieczeń EAZ) [C7-C14]. Opracowany przeze mnie czujnik został bardzo szeroko przebadany, włącznie z badaniami właściwości elektrycznych i testami w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Konstrukcję czujnika oparłem na czujniku pola magnetycznego, a do budowy głowicy wykorzystałem szkła opracowane dla światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem wewnętrznym [C2].

Celem wykonanej przeze mnie i udokumentowanej w artykułach [C1-C14] pracy, było:

- zbadanie możliwości zastosowania światłowodów ze szkieł czułych magnetooptycznie oraz światłowodów fotonicznych typu index-guiding jako głowicy światłowodowego czujnika prądu elektrycznego;

- opracowanie światłowodowego czujnika pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym do pomiarów natężenia pola magnetycznego wewnątrz maszyn elektrycznych;

- opracowanie światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym dla zastosowań w systemie elektroenergetycznym jako tzw. przekładnika prądowego pomiarowego oraz przede wszystkim jako przekładnika prądowego do zabezpieczeń.

Te trzy zadania badawcze są ściśle związane z nadrzędnym celem jakim było opracowanie światłowodowego czujnika pola magnetycznego działającego w oparciu o magnetooptyczny efekt Faradaya [U27,U28]. Należy zauważyć, że światłowodowe czujniki prądu elektrycznego są w rzeczywistości czujnikami pola magnetycznego. Przetwarzają one wartość indukcji pola magnetycznego, którego źródłem jest prąd elektryczny, na zmianę parametrów optycznych fali świetlnej propagującej się w głowicy czujnika.

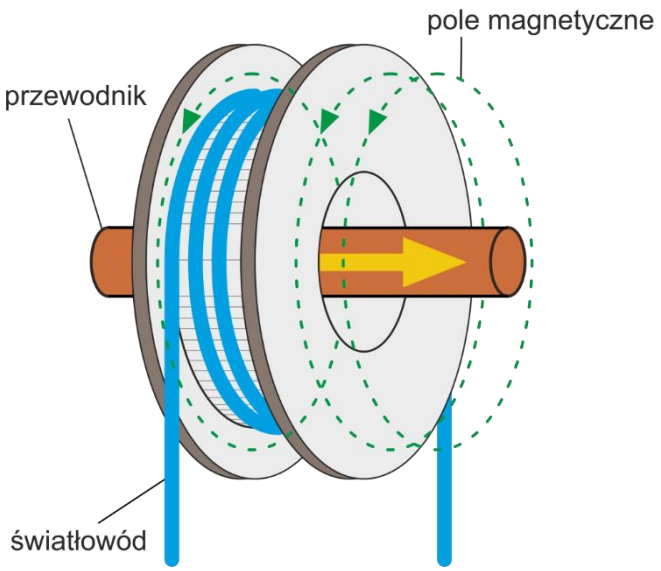
Podsumowując, osią przedstawionego do oceny osiągnięcia naukowego są zagadnienia badawcze związane z trzema typami światłowodowych czujników pola magnetycznego. Należą do nich:

1. Światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem wewnętrznym – prace: [C1-C5].
2. Światłowodowy czujnik pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym – praca: [C6].
3. Światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem zewnętrznym – prace: [C8-C14].

W dalszej części referatu szczegółowo omówiłem moje osiągnięcia dotyczące badań nad przedstawionymi powyżej typami czujników. Zastosowałem ten podział dzieląc dalszą treść odpowiednio na trzy części. Na końcu każdej części przedstawiłem swoje osiągnięcia w omawianym zakresie. Ostatnią częścią autoreferatu jest krótkie podsumowanie.

I. Światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem wewnętrznym

Budowa czujnika opiera się na pętli światłowodowej wykonanej z włókna czułego magnetooptycznie umiejscowionej w polu magnetycznym, którego źródłem jest mierzony prąd elektryczny (rys. 2). Z uwagi na to, że w tym czujniku wykorzystywany jest magnetooptyczny efekt Faradaya, który jest efektem podłużnym, pętla światłowodowa jest umieszczona współosiowo z przewodnikiem z prądem. Takie umiejscowienie zapewnia równoległe zorientowanie kierunku propagacji światła w światłowodzie do kierunku pola magnetycznego, którego źródłem jest mierzony prąd elektryczny.



Rys. 2. Światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem wewnętrznym.

W badaniach światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem wewnętrznym w pierwszej kolejności skoncentrowałem się na poszukiwaniu nowych struktur światłowodowych.

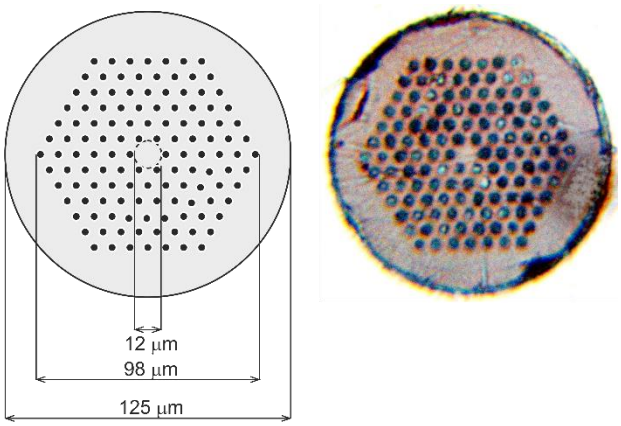
W pierwszej kolejności zaproponowałem światłowody ze szkieł o wysokim współczynniku załamania, które wg danych literaturowych powinny posiadać dużą czułość magnetooptyczną [U27,U29-U31]. We współpracy z ówczesną Katedrą Promieniowania Optycznego (obecnie Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej) Politechniki Białostockiej zostały zaprojektowane światłowody, które w tej Katedrze wytworzono. Zaprojektowano i wytworzono włókno jednomodowe typu step-index [C2] oraz włókno dwójłomne typu side-hole [C1], które było wielomodowe dla długości fali 635 nm. Włókno typu step-index to włókno o skokowym profilu współczynnika załamania, natomiast włókno typu side-hole to włókno o takim samym profilu z umieszczonymi symetrycznie po bokach rdzenia w płaszczu otworami powietrznymi, które wprowadzają dwójłomność liniową włókna. Oba włókna wykazywały tą samą czułość na poziomie **2,49 rad/(T·m)** oraz charakteryzowały się współczynnikiem załamania rdzenia na poziomie 1,62 (dla λ=632,8 nm). Zbadana w tych samych warunkach czułość dla włókna standardowego tj. krzemionkowego typu step-index wyniosła 1,36 rad/(T·m). Nie udało się otrzymać włókna jednomodowego typu side-hole dla długości fali 635 nm. W efekcie uzyskano bardzo niski stopień polaryzacji światła na wyjściu (20-30%) [C1]. Jest to wartość za niska dla zastosowań czujnikowych, w których do detekcji skręcenia płaszczyzny polaryzacji używa się polaryzatorów. Dodatkowo włókno to charakteryzowało się wysoką łamliwością. Nie umniejsza to jednak walorów poznawczych przedstawionych badań.

Znacznie bardziej obiecujący pod kątem czujnikowym okazał się światłowód typu step-index o wysokim współczynniku załamania [C2]. Światłowód ten jest jednomodowy dla długości fali 635 nm dzięki uzyskaniu niewielkiej różnicy współczynników załamania między rdzeniem a płaszczem.

Prace [C1] i [C2] zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych nr N515 4095348 p.t.: „Światłowodowy miernik natężenia prądu elektrycznego”, którego byłem kierownikiem.

W dalszej pracy nad wykorzystaniem światłowodów w pomiarach pól magnetycznych i prądu elektrycznego skupiłem się nad możliwością wykorzystania światłowodów fotonicznych typu index-guiding (IGPCF). Analizując osiągnięcia w tej dziedzinie postawiłem tezę, że światłowody IGPCF posiadają mniejszą wrażliwość stanu polaryzacji na przypadkowe deformacje włókna. W celu udowodnienia tej tezy przeprowadziłem szereg testów, których rezultatem są trzy

samodzielne artykuły [C3-C5]. Tym razem wykorzystałem światłowód IGPCF dostępny komercyjnie oznaczony ESM-12-01 firmy Blaze Photonics (aktualnie NKT Photonics). Przekrój włókna pokazano na rys. 3. Na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym przetestowałem światłowód fotoniczny w obecności zakłóceń i bez nich [C3, C4] oraz wykonałem testy porównawcze dla dwóch długości fali w zakresie światła widzialnego (405 nm oraz 635 nm) [C5].



Rys. 3. Przekrój poprzeczny światłowodu IGPCF o oznaczeniu ESM-12-01 (rys. 2 z pracy [C3]).

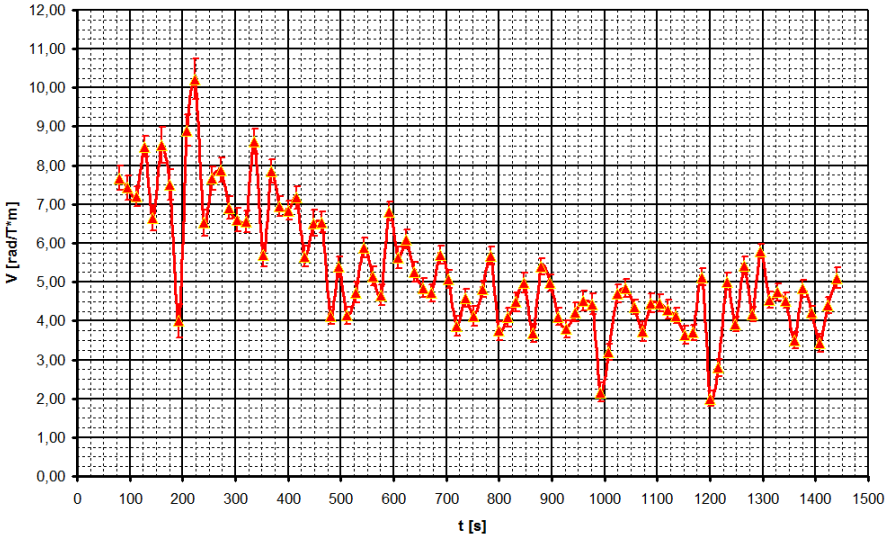
Podstawowym badaniem były testy w warunkach silnych zaburzeń w postaci wymuszonych drgań światłowodu. Wyznaczona w badaniach czułość magnetooptyczna dla długości fali światła 635 nm wyniosła: 2,17 rad/(T·m) bez drgań, oraz 2,23 rad/(T·m) podczas drgań. Względna różnica tych czułości wyniosła 2,8 %. Względna niepewność pomiaru kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji w efekcie magnetooptycznym nie przekroczyła **0,5 %** podczas drgań, podczas gdy dla pomiarów przeprowadzonych bez obecności drgań nie przekroczyła 0,21 % [C3].

W kolejnym etapie badań sprawdziłem właściwości polaryzacyjne włókna fotonicznego. W tym celu sprawdziłem doświadczalnie stabilność azymutu i eliptyczności polaryzacji wyjściowej w funkcji kąta polaryzacji liniowej światła na wejściu. Badania przeprowadzałem dla długości fali światła 635 nm wykazując, że przebiegi dla sytuacji z drganiami i bez drgań pokrywają się ze sobą. Wynika z tego wniosek, że włókno nie zmienia swoich właściwości polaryzacyjnych w warunkach przed i po wystąpieniu silnych zakłóceń w postaci deformacji. Wyznaczona czułość magnetooptyczna w funkcji kąta polaryzacji liniowej światła na wejściu włókna wykazała zbliżony przebieg w stanie z drganiami i bez drgań [C4].

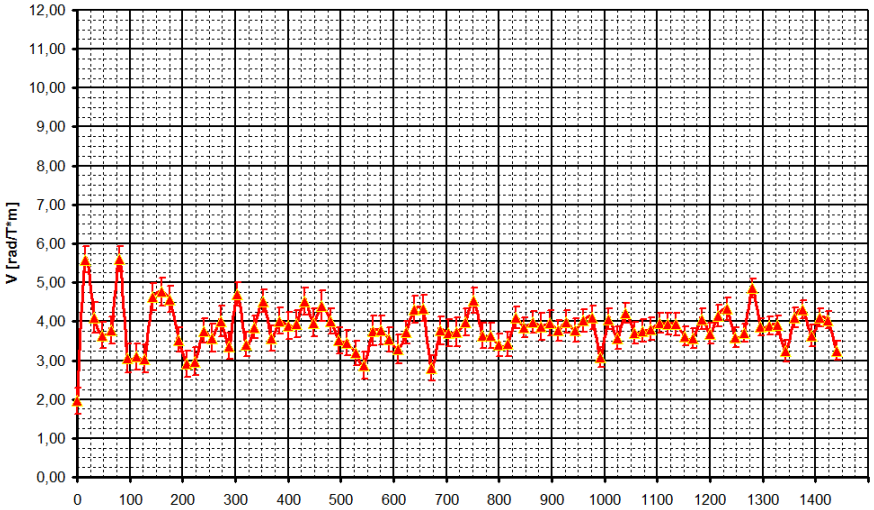
Ostatnim, zasadniczym elementem badań były testy porównawcze, które przeprowadziłem dla długości fali światła 635 nm oraz 405 nm [C5]. Celem porównania przebadałem jednocześnie światłowody jednomodowe typu step-index odpowiednio jednomodowe dla zadanej długości fali światła. Światłowód fotoniczny jest jednomodowy w szerokim zakresie długości fali obejmującym obie wybrane do badań długości fali światła. Podstawowym argumentem ich wyboru była zależność stałej Verdeta szkieł diamagnetycznych w funkcji długości fali. Wartość stałej Verdeta dla długości fali 635 nm osiąga wartości rzędu kilku rad/(T·m), co pozwala korzystając z szeroko dostępnych detektorów uzyskać czułość napięciową przetwornika pomiarowego porównywalną do czułości jaką można osiągnąć dla fali 405 nm. Natomiast dla długości fali 405 nm stała Verdeta dla szkieł diamagnetycznych wzrasta ponad dwukrotnie w porównaniu do długości fali 635 nm, co potencjalnie umożliwia znaczny wzrost czułości czujnika.

Na wykresach z rys. 4 i rys. 5 przedstawiłem przebiegi czasowe zmian czułości magnetooptycznej w obecności drgań dla obu typów światłowodów dla długości fali światła 635 nm. Analogiczne wykresy dla długości fali światła 405 nm zestawiłem na wykresach rys. 6 i rys. 7. Wyniki te pokazują, że światłowód fotoniczny posiada znacznie lepszą stabilność w obecności drgań (rys. 5 oraz rys. 7). Dodatkowo nie następuje dryft czułości w czasie, podczas

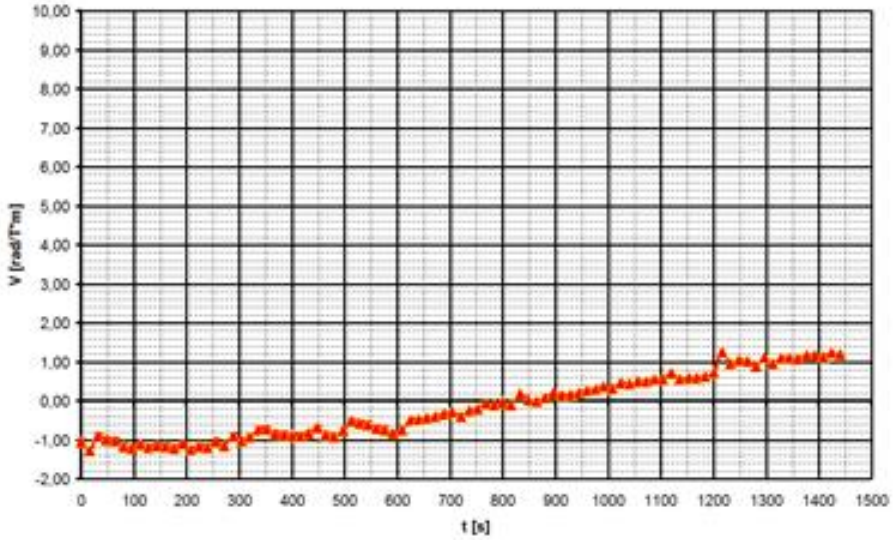
gdy w światłowodzie standardowym typu step-index ten dryft jest wyraźny dla długości fali 635 nm (rys. 4), a dla długości fali 405 nm wielkość tego dryftu jest bardzo duża i wartość czułości magnetooptycznej przechodzi przez zero zmieniając znak (rys. 6).



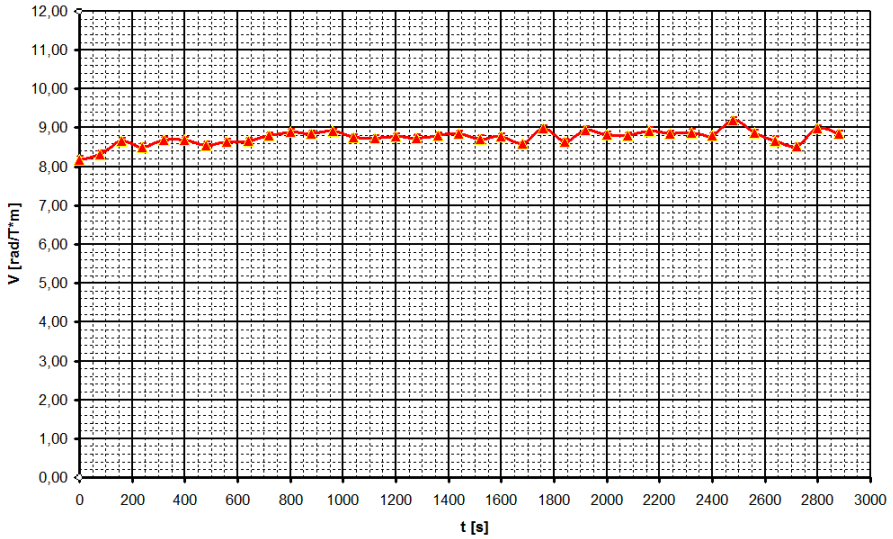
Rys. 4. Przebieg czasowy czułości magnetooptycznej V dla dł. fali światła 635 nm. Światłowód: step-index. W obecności drgań (rys. 5 z pracy [C5]).



Rys. 5. Przebieg czasowy czułości magnetooptycznej V dla dł. fali światła 635 nm. Światłowód: IGPCF. W obecności drgań (rys. 6 z pracy [C5]).



Rys. 6. Przebieg czasowy czułości magnetooptycznej V dla dł. fali światła 405 nm. Światłowód: step-index. W obecności drgań (rys. 11 z pracy [C5]).



Rys. 7. Przebieg czasowy czułości magnetooptycznej V dla dł. fali światła 405 nm. Światłowód: IGPCF. W obecności drgań (rys. 12 z pracy [C5]).

Powyższe wyniki potwierdzają prawdziwość postawionej tezy, że światłowód fotoniczny typu index-guiding jest znacznie mniej wrażliwy polaryzacyjnie od standardowego światłowodu typu step-index na deformację włókna. Jest to jedno z najważniejszych moich osiągnięć w tym obszarze, które wynika wyłącznie z moich badań, pomysłów, doświadczeń i analiz.

Podsumowując badania nad światłowodowym czujnikiem prądu z przetwarzaniem wewnętrznym za moje najważniejsze osiągnięcia naukowe uważam:

I.a Wykazanie możliwości wykorzystania szkieł o wysokim współczynniku załamania światła jako materiału na włókno optyczne typu step-index oraz włókno polaryzacyjne czułe magnetooptycznie [C1-C2]. W tym obszarze:

1) Opracowałem projekt konstrukcji światłowodu wykorzystującego jako rdzeń szkło o wysokim współczynniku załamania światła (1,62 dla dł. fali 633 nm) czułe magnetooptycznie o parametrach technologicznych umożliwiających wytworzenie włókna optycznego [C2].

2) Dobrałem parametry optyczne szkła rdzeniowego światłowodu jednomodowego (dla dł. fali 635 nm) typu step-index oraz światłowodu polaryzacyjnego typu side-hole [C1-C2].
3) Potwierdziłem eksperymentalnie, na wykonanym przeze mnie układzie pomiarowym, dobrą czułość magnetooptyczną opracowanych i wytworzonych światłowodów, która dla obu włókien wyniosła 2,49 rad/(T·m). Jest ona niespełna dwukrotnie wyższa w porównaniu do standardowych włókien krzemionkowych typu step-index, dla których wartość tej czułości w tych badaniach wyniosła 1,36 rad/(T·m) [C1].

I.b Określenie właściwości polaryzacyjnych włókien fotonicznych typu index-guiding i wykazanie możliwości ich wykorzystania w głowicach światłowodowego czujnika prądu. [C3-C4]. W tym obszarze:

1) Uzyskałem dobrą czułość magnetooptyczną dla długości fali światła 635 nm, która wyniosła 2,17 rad/(T·m) bez drgań, oraz 2,23 rad/(T·m) podczas drgań, co daje różnicę na poziomie 2,8 %. Wykazałem potencjalne możliwości stosowania włókna w warunkach zewnętrznych zaburzeń w postaci drgań, na które głowica światłowodowego czujnika prądu jest narażona w rzeczywistych warunkach pracy.
2) Eksperymentalne potwierdziłem niską wrażliwość włókna podczas drgań mechanicznych, ze względu na właściwości polaryzacyjne [C4].

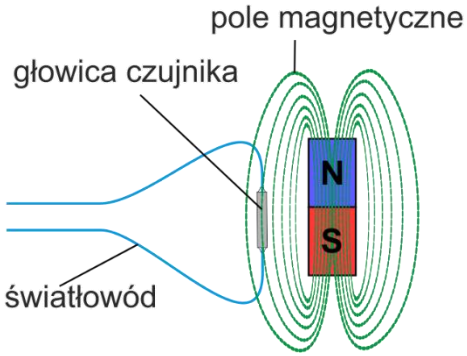
I.c Udowodnienie postawionej tezy, że światłowód fotoniczny typu index-guiding jest znacznie mniej wrażliwy polaryzacyjnie niż standardowy światłowodu typu step-index ze względu na deformację włókna [C3-C5]. W tym obszarze:

1) Eksperymentalne potwierdziłem niższą wrażliwość polaryzacyjną włókna fotonicznego typu index-guiding w porównaniu ze standardowym włóknem krzemionkowym typu step-index dla długości fali 405 nm i 635 nm (rys. 4 do 7) [C5].
2) Uzyskałem wysoką wartość czułości magnetooptycznej na poziomie 8,75 rad/(T·m) w opracowanym układzie czujnikowym z światłowodem fotonicznym typu index-guiding pracującym przy długości fali 405 nm [C5].

II. Światłowodowy czujnik pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym

W ramach prac nad światłowodowym czujnikiem prądu z przetwarzaniem wewnętrznym wykonano szkła, z których nie wszystkie posiadały odpowiednie parametry technologiczne umożliwiające wykonanie z nich światłowodów jednomodowych na zadany zakres długości fali [C2]. Doświadczenia zdobyte podczas badań, a przede wszystkim opracowane szkła czułe magnetooptycznie stały się bazą do rozwoju światłowodowych czujników pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym.

W światłowodowym czujniku z przetwarzaniem zewnętrznym światłowody doprowadzają światło do głowicy czujnika oraz z głowicy do układów detekcji, gdzie rejestrowane są parametry fali świetlnej zmodulowane w głowicy wielkością mierzoną (np. fizyczną). Zaproponowany przeze mnie światłowodowy czujnik pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym jest oparty na magnetooptycznym efekcie Faradaya, który zachodzi tylko w głowicy pomiarowej zbudowanej ze szkła objętościowego czułego magnetooptycznie (rys. 8).



Rys. 8. Światłowodowy czujnik pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym.

Zagadnienie to rozwijałem w ramach projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych nr N510 387735N p.t.: „Badania rozkładu pól magnetycznych w urządzeniach elektromagnetycznych z wykorzystaniem efektów magnetooptycznych w światłowodach". W projekcie tym byłem odpowiedzialny za opracowanie kilku typów optycznych czujników pola magnetycznego.

Istotną zaletą i przewagą metod wykorzystujących efekt magnetooptyczny jest ich nieinwazyjność, iskrobezpieczność wynikająca z braku elementów przewodzących oraz niewrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne. Ta ostatnia cecha jest bardzo istotna w pomiarach wykonywanych wewnątrz maszyn elektrycznych jakimi są silniki elektryczne, które były głównym przedmiotem projektu. W połączeniu z ekstremalnie szybkim czasem odpowiedzi (10^{-12}s) [U32] czujniki tego typu wprowadzają nową jakość w metodach pomiaru pola magnetycznego w tego rodzaju urządzeniach.

Pole magnetyczne wokół magnesów trwałych oraz cewek z prądem elektrycznym cechuje bardzo duży gradient wielkości wektorowej opisującej to pole (np. indukcji pola magnetycznego). W szczególności gradient ten jest znaczący w docelowym miejscu pomiaru, co jest spowodowane obecnością ośrodków niemagnetycznych jakimi są powietrze i materiały, z których zbudowany jest czujnik. To właśnie sprawia, że tego typu pomiar może być traktowany jako punktowy. Jest to podstawowa zaleta zastosowania czujników światłowodowych z przetwarzaniem zewnętrznym. Wynika to z faktu, że w czujniku z przetwarzaniem wewnętrznym pole magnetyczne oddziaływujące na całej długości światłowodu, daje wynik uśredniony po długości światłowodu.

W literaturze przedmiotu są znane rozwiązania optycznych czujników pola magnetycznego bazujące na szkłach diamagnetycznych, kryształach czy granatach żelazowych ziem rzadkich [U11,U13,U33-U35]. Szczególnie te ostatnie wykazują bardzo dobre właściwości. Taki też czujnik został również przeze mnie zaprojektowany i wykonany w ramach projektu badawczego KBN. Skoncentrowałem się jednak na wykorzystaniu szkieł diamagnetycznych z uwagi na możliwość zbudowania bardzo prostej konstrukcji czujnika, którego charakterystyka przetwarzania będzie liniowa w określonym zakresie. Tej cechy nie posiadają granaty żelazowe, a przy tym cechują się niewielką pętlą histerezy oraz ulegają nasyceniu [U36].

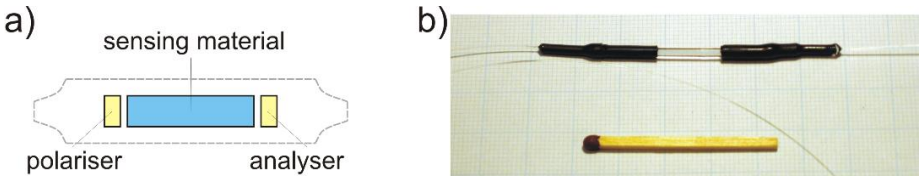
Efektem moich badań w tym zakresie jest rozwiązanie konstrukcyjne przedstawione w pracy [C6] oraz inne opracowane i wykonane w całości przeze mnie prototypy czujników (opisane w istotnej aktywności naukowej), które wykonałem w projekcie.

Opracowany przeze mnie czujnik ma czułość na poziomie **8,64 °/T** i charakteryzuje się prostą budową wykorzystującą głowicę pomiarową zawierającą pręt szklany o długości 34 mm i średnicy 1,8 mm. Jest to czułość wystarczająca do mierzenia pól na poziomie 10^{-1} T (rys. 10). W głowicy czujnika jako materiał czuły magnetooptycznie wykorzystałem szkło oznaczone przeze mnie symbolem DD165 [C2] o współczynniku załamania światła 1,65 dla długości fali światła 635 nm.

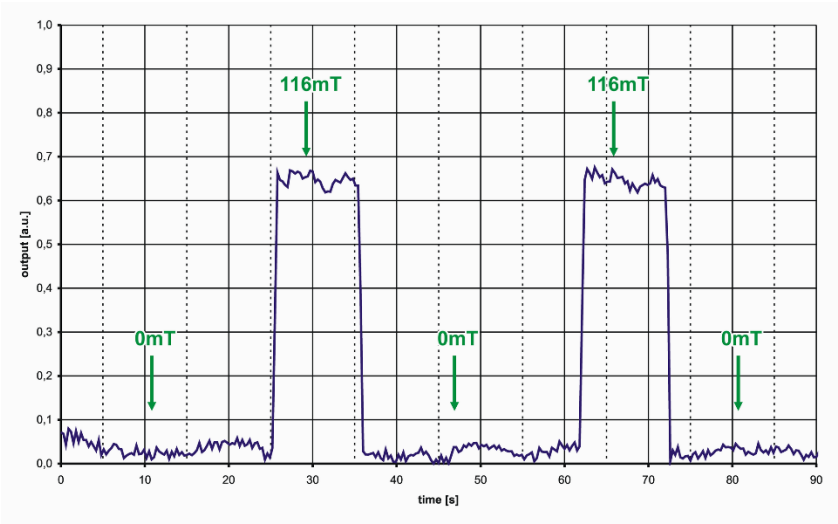
Czujnik posiada doprowadzenie światłowodowe w postaci światłowodu jednomodowego, który doprowadza światło ze źródła laserowego o długości fali 635 nm do głowicy czujnika. W związku z tym na końcówce włókna jest zamocowana soczewka gradientowa typu SELFOC o

średnicy 2 mm, która ma za zadanie kolimację wiązki na wejściu do głowicy czujnika. Jako światłowodu wyjściowego użyłem wielomodowy światłowód typu PCS (ang. Plastic Clad Silica) o średnicy rdzenia 200 μm i średnicy płaszcza 300 μm. Światłowód ten doprowadza wiązkę światła do fotodiody krzemowej, za pomocą której przetwarzana jest wartość natężenia światła na wartość napięcia. Użycie tych elementów pozwoliło na znaczne uproszczenie budowy głowicy czujnika, w której zastosowano tylko dwie płytki polaryzatorów oraz pręt szklany czuły magnetooptycznie (rys. 9).

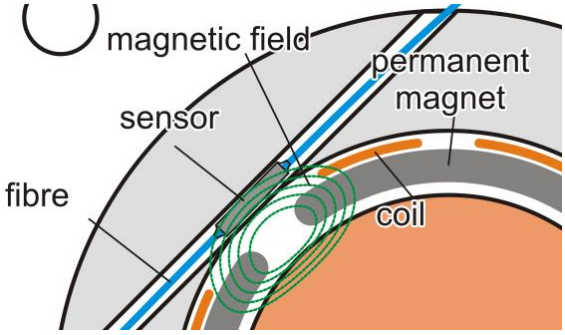
W ramach prac nad czujnikiem zaproponowałem sposób umiejscowienia czujnika w silniku prądu stałego uwzględniający jego budowę i zasadę działania, która determinuje orientację głowicy czujnika względem kierunku linii pola magnetycznego. Opisany w pracy [C6] czujnik zaprojektowałem tak, aby mierzył wartość indukcji pola magnetycznego magnesów trwałych znajdujących się w stojanie silnika (rys. 11).



Rys. 9. Głowica światłowodowego czujnika pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym: a) budowa, b) wygląd głowicy z fragmentami doprowadzeń światłowodowych (rys. 1 z pracy [C6]).



Rys. 10. Odpowiedź czujnika na zewnętrzne pole magnetyczne (rys. 6 z pracy [C6]).



Rys. 11. Propozycja lokalizacji światłowodowego czujnika pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym wewnątrz silnika elektrycznego prądu stałego (rys. 4 z pracy [C6]).

Brak dodatkowych elementów optycznych formujących wiązkę światła na wyjściu z głowicy (takich jak soczewki) sprawia, że część fali świetlnej jest tracona. W tej konkretnej aplikacji jest to nieistotne, gdyż sygnał optyczny musi być doprowadzony na bardzo krótkie odległości (rzędu 1-2 metrów). Dodatkowo część fali świetlnej niespełniająca warunku całkowitego wew. odbicia powoduje świecenie głowicy widzialne z zewnątrz (w przypadku stosowanej długości fali 635 nm jest to kolor czerwony). Efekt ten jest wizualnym sygnalizatorem, że czujnik działa. Ułatwia to również identyfikację miejsca pomiaru pola w urządzeniu.

Z powyższego wynika, że optyczne czujniki pola magnetycznego umożliwiają pomiary parametrów pola w bardzo trudnych warunkach, w miejscach dotąd niemonitorowanych na szeroką skalę. Pomiar pola magnetycznego wewnątrz maszyn elektrycznych jest istotny dla rozwoju dyscypliny elektrotechnika. Pomiary takie umożliwiają dostarczenie nowych informacji dla naukowców zajmujących się maszynami elektrycznymi. Należy jednak zwrócić uwagę, że każdy przypadek wymaga indywidulanego podejścia uwarunkowanego konkretną geometrią maszyny, warunkami środowiskowymi, czułością i zakresem pomiaru. Każdy czujnik musi być zatem opracowany i zaprojektowany do konkretnego zastosowania. Tak również było w realizowanym przeze mnie projekcie. Tym samym to konkretne opracowane przeze mnie rozwiązanie ma charakter nowości.

Obszar ten był istotny i kluczowy w dalszym rozwoju badań związanych ze światłowodowym czujnikiem pola magnetycznego. Bez tego kroku i tych ważnych doświadczeń nie rozwinąłbym kolejnego obszaru badań, badań nad światłowodowym czujnikiem prądu z przewarzaniem zewnętrznym dla zastosowań elektroenergetycznych.

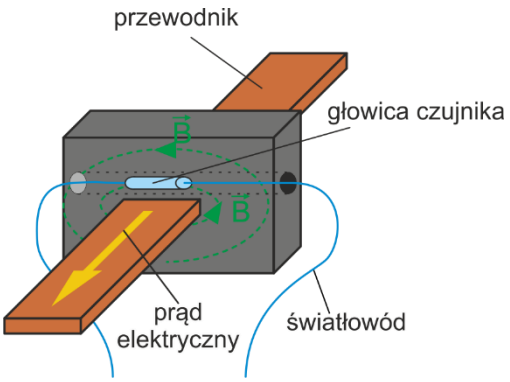
Podsumowując badania nad światłowodowym czujnikiem pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym wskazuję jako moje osiągnięcie naukowe:

II.a Opracowanie koncepcji, zaprojektowanie, wykonanie i charakteryzacja prototypu światłowodowego czujnika z przetwarzaniem zewnętrznym umożlwiającego pomiary pola magnetycznego wewnątrz maszyn elektrycznych [C6]. W tym obszarze:

1) Opracowałem i przebadałem prototyp światłowodowego czujnika pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym, w tym opracowałem i wykonałem głowicę czujnika z wykorzystaniem szkła o stałej Verdeta 4,34 rad/(T·m) uformowanego w postaci pręta szklanego o długości 34 mm i średnicy 1,8 mm. Konstrukcja głowicy zapewnia możliwość lokalnego pomiaru wartości indukcji pola magnetycznego wewnątrz maszyn elektrycznych (rys. 11).
2) Potwierdziłem eksperymentalnie poprawność działania opracowanego prototypu, który wykazał czułość magnetooptyczną na poziomie 8,64 °/T.

III. Światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem zewnętrznym

Światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem zewnętrznym jest to czujnik przeznaczony do pomiaru prądu, podobnie jak światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem wewnętrznym. Jednocześnie jest w rzeczywistości światłowodowym czujnikiem pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym użytym do pomiaru prądu (rys. 12). Czujnik ten łączy w sobie oba poprzednie typy czujników i podobnie jak światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem wewnętrznym przetwarza pośrednio wartość natężenia prądu elektrycznego na zmianę wartości parametrów sygnału optycznego.



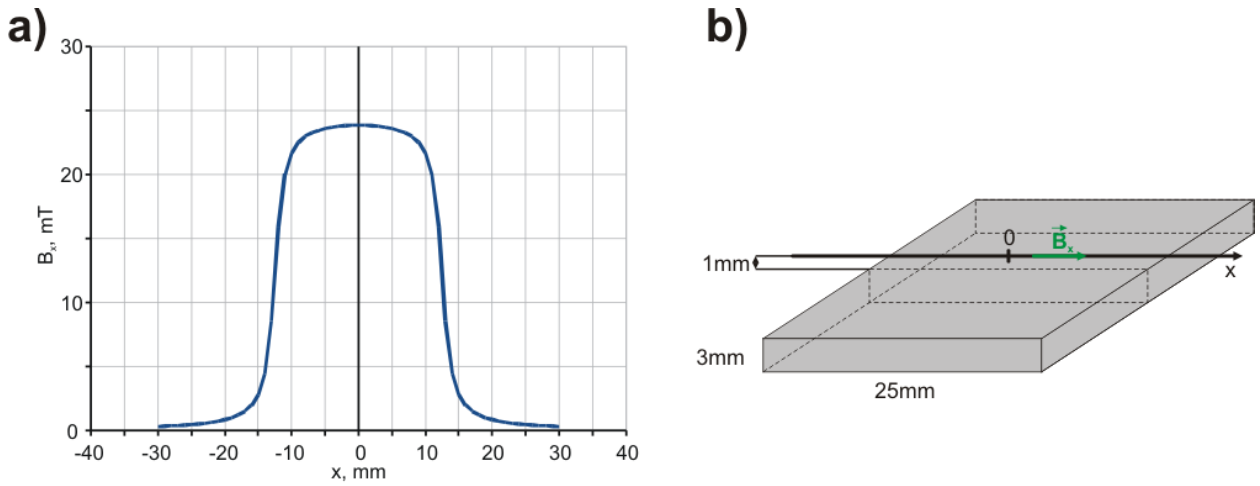
Rys. 12. Światłowodowy czujnik prądu z przetwarzaniem zewnętrznym.

Jest to zagadnienie będące rozwinięciem badań nad światłowodowym czujnikiem pola magnetycznego opisanego w punkcie II. Jak już wspomniałem we wstępie oraz w punkcie I, badania moje są głównie skoncentrowane na światłowodowym czujniku prądu elektrycznego, który może być zastosowany w budowie tzw. optycznych przekładników prądowych stosowanych w elektroenergetyce.

W literaturze światłowodowe czujniki prądu z przetwarzaniem zewnętrznym w głównej mierze bazują na rozwiązaniach wyposażonych w dodatkowe układy optyczne formujące wiązkę światła tak, aby była dobrze określona w obszarze głowicy czujnika. Jak przedstawiłem w punkcie II przeprowadzone przeze mnie badania dowodzą, że taką konstrukcję można uprościć uzyskując czujnik o dobrej czułości i jednocześnie prosty w budowie, a co za tym idzie pewniejszy w działaniu. Mniejsza liczba elementów, to mniejsza liczba połączeń. Dzięki temu jest to rozwiązanie potencjalnie tańsze (prostsze technologicznie) i ułatwiające uzyskanie odpowiedniego poziomu powtarzalności parametrów podczas procesu produkcji.

W konstrukcji światłowodowego czujnika pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym [C6] na wyjściu z głowicy użyłem światłowodu typu PCS o średnicy płaszcza 300 μm. Rozwiązanie to pozwoliło na uproszczenie konstrukcji polegające na tym, że nie było konieczne zastosowanie soczewki na wyjściu z głowicy. W konstrukcji kolejnego czujnika z przetwarzaniem zewnętrznym do pomiaru prądu zmodyfikowałem konstrukcję wprowadzając szereg kolejnych uproszczeń. Na wejściu i na wyjściu zastosowałem światłowód wykonany z polimeru PMMA o średnicy 1,5 mm, uzyskując mniejsze straty światła związane z połączeniem światłowodu wyjściowego z głowicą. Założyłem, że światłowody te nie wymagają dodatkowej optyki (soczewki kolimującej na wejściu i skupiającej na wyjściu z głowicy czujnika). Dzięki temu mogłem dodatkowo wprowadzić kolejne uproszczenie jakim było zastosowanie źródła światła w postaci diody typu LED (o długość fali 635 nm). Głównym celem tej modyfikacji było użycie światła niespolaryzowanego (zamiast światła laserowego, które jest spolaryzowane). Jest to zabieg zapewniający większą stabilność natężenia światła tuż za polaryzatorem wejściowym w głowicy czujnika. Zmianie uległa również głowica czujnika, którą zaopatrzyłem w pręt szklany ze szkła wieloskładnikowego bazującego na tlenkach metali ciężkich. Zmierzona przeze mnie stała Verdeta tego szkła wyniosła **7,75 rad/(T·m)** dla długości fali światła 635 nm (rys. 3 z pracy [C7]).

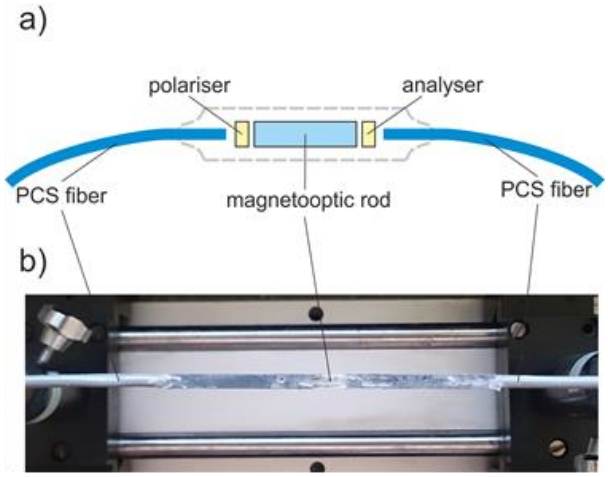
Ważnym elementem układu jest geometria przewodnika z prądem, na którym jest umieszczona głowica czujnika. Analiza teoretyczna rozkładu pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem o przekroju prostokątnym wskazuje jednoznacznie, że taka konstrukcja (rys. 13) zapewnia równoległość wektora indukcji pola magnetycznego, którego źródłem jest mierzony prąd do kierunku biegu promieni światła w głowicy czujnika (rys. 12).



Rys. 13. Rozkład indukcji pola magnetycznego a), wzdłuż osi x znajdującej się 1 mm nad przewodnikiem z prądem b) (rys. 8 z pracy [C7]).

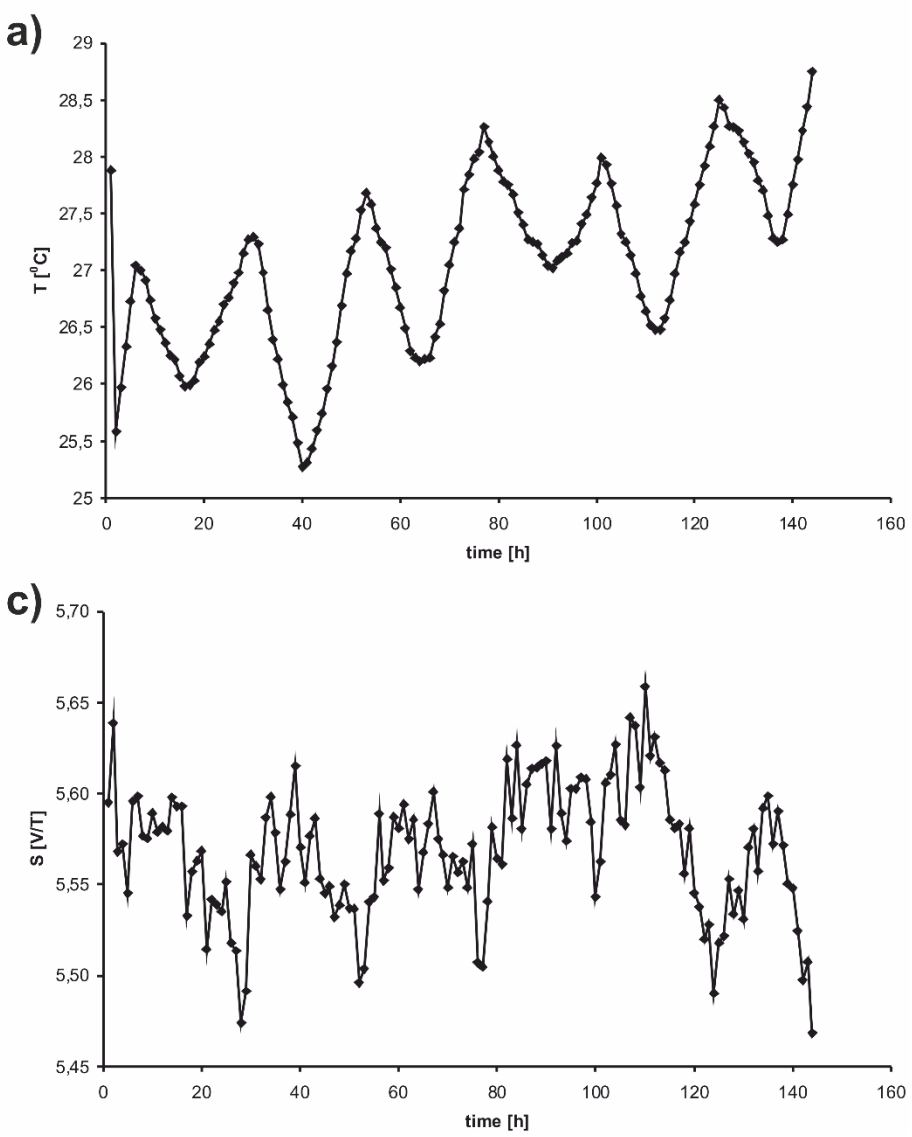
W pomiarach uzyskałem czułość prezentowanego w pracy [C7] czujnika równą **0,019 mV/A**. Użyte w tym rozwiązaniu światłowody plastikowe typu POF są bardzo łatwe w obróbce: proste w szlifowaniu i cięciu. Cechują się jednak mniejszą odpornością na uszkodzenia mechaniczne oraz znacznie mniejszym dopuszczalnym zakresem temperatur pracy [U37]. Nie to jest jednak ich głównym ograniczeniem. Zasadniczą negatywną cechą tych światłowodów jest ich wysoka stała elastooptyczna powodująca częściową polaryzację światła. Efekt ten jest losowy, gdyż zależy od deformacji włókna, a powstałe naprężenia mogą relaksować w zależności od czynników zewnętrznych, w szczególności od temperatury. W efekcie pojawia się we włóknie przypadkowy stan polaryzacji zmienny w czasie, który za pierwszym polaryzatorem (na wejściu do głowicy) generuje szumy bezpośrednio z nim związane. Zwróciłem uwagę, że zastosowanie tych włókien było zbyt daleko idącym uproszczeniem.

Chcąc zminimalizować wpływ tego problemu na poprawność działania, zastosowałem do budowy kolejnego prototypu światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym światłowody szklane (ze szkła krzemionkowego) typu PCS o średnicy 1 mm (rys. 14). W konstrukcji tej wykorzystałem w głowicy czujnika najczulsze magnetooptycznie szkło z pośród przebadanych w ramach pracy [C2] o stałej Verdeta 35,7 rad/(T·m) dla długości fali światła 635 nm. Dodatkowo światłowody doprowadzające zostały zaopatrzone w pokrycie ochronne w postaci tuby z PCV. Czułość magnetooptyczna głowicy czujnika wyniosła **40,9 °/T**.



Rys. 14. Głowica światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym: a) budowa, b) wygląd głowicy z fragmentami doprowadzeń światłowodowych (rys. 3 z pracy [C8]).

Pierwsze testy potwierdziły dobrą stabilność czujnika. W pracy [C8] zostały zamieszczone wyniki testów stabilności (test 90 i 144 godzinny) oraz czułości napięciowej. Czułość napięciowa czujnika wyniosła **5,1 V/T**. W przeliczeniu na wartość natężenia prądu czułość napięciowa prototypu czujnika wyniosła **0,046 mV/A** przy założeniu, że głowica czujnika znajduje się 1 mm nad przewodnikiem wzdłuż wytwarzanego przez niego pola magnetycznego oraz przy wymiarach przekroju przewodnika równych 600 mm × 10 mm. Znacznie mniejsze szumy obserwowane podczas pomiaru pozwoliły mi na przeprowadzenie testów stabilności parametrów w funkcji czasu i temperatury. W trakcie testów rejestrowałem czułość napięciową oraz napięcie odniesienia (wartość napięcia na czujniku przy zerowym prądzie). Na podstawie tych badań oszacowałem zależność czułości od temperatury na poziomie **0,7 %/°C** (Rys. 15).



Rys. 15. Przebiegi czasowe: a) temperatury; c) czułości magnetooptycznej V (rys. 6 z pracy [C8]).

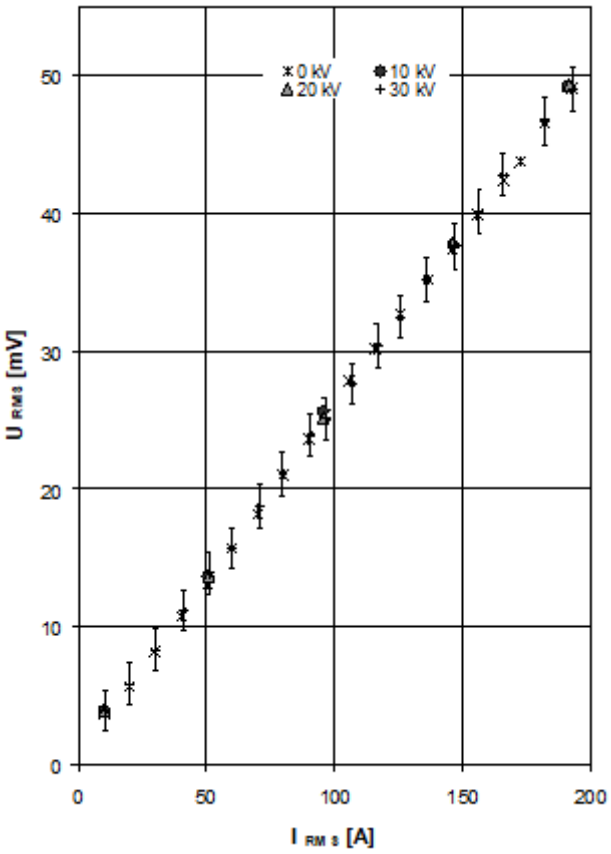
W kolejnym etapie badań wykonałem analizę pracy czujnika na rzeczywistym przewodniku z prądem. We współpracy ze współautorem pracy [C9] zestawiłem stanowisko z szynoprzewodem o przekroju 600 mm × 10 mm z możliwością wymuszania prądów sinusoidalnych przemiennych z częstotliwością sieciową (tj. 50 Hz) o wartości skutecznej natężenia do 2000 A. Zaprojektowałem odpowiedni zacisk umożliwiający stabilne mocowanie głowicy czujnika na

przewodniku. Odległość osi głowicy czujnika od powierzchni przewodu wyniosła ok. 1 mm. W ramach tych badań uzyskałem czułość równą **0,048 mV/A**.

Z uwagi na to, że geometria przewodnika (toru prądowego) ma zasadniczy wpływ na czułość zdecydowałem, że do dalszych badań należy przygotować prototyp przekładnika prądowego, stanowiący połączenie czujnika światłowodowego i konkretnego toru prądowego o prostokątnym przekroju poprzecznym. Zdecydowałem, że prototyp przekładnika ma umożliwiać pomiar prądów o wartościach skutecznych do 200 A co stanowiło kryterium doboru wymiarów poprzecznych toru prądowego przekładnika. Dobór był zatem zdeterminowany prądem dopuszczalnym długotrwałym przewodnika, który określono (we współpracy ze współautorem pracy [C10]) na 200 A. Wybrałem przewód miedziany o przekroju 20 mm × 3 mm spełniający dla typowych warunków ułożenia i otoczenia ww. kryterium. Przedstawione w pracy [C10] badania przeprowadziłem samodzielnie na skonstruowanym przeze mnie stanowisku laboratoryjnym, w którym źródłem pola magnetycznego jest cewka powietrzna. Z geometrii analizowanego przewodnika określiłem współczynnik opisujący wartość pola magnetycznego (w odległości 1 mm nad nim) przypadający na jednostkową wartość natężenia prądu. W symulacji warunków rzeczywistych przelicznik ten posłużył mi do obliczenia wartości natężenia prądu płynącego przez wybrany przewodnik odpowiadającego danej wartości indukcji pola magnetycznego cewki. W tym przypadku otrzymano czułość napięciową **0,284 mV/A**. Jest to niemal sześciokrotnie większa wartość niż dla przewodnika 600 mm × 10 mm. Dodatkowo w tym układzie przeprowadziłem badania dla pól magnetycznych odpowiadających prądom zwarciowym o natężeniu 10-cio krotnie większym od wartości znamionowej (rys. 7 z pracy [C10]). Przy tak dużym poszerzeniu zakresu nachylenie prostej dopasowania napięcia na czujniku w funkcji prądu przewodnika zmieniło się nieznacznie (o 4,2 %). Wynik ten potwierdza, że czujnik może być zastosowany jako przekładnik prądowy do zabezpieczeń [U2].

Zastosowanie czujnika w roli przekładnika prądowego w systemie elektroenergetycznym wymaga określenia jego właściwości izolacyjnych. W związku z tym (we współpracy ze współautorami prac [C11] i [C12]) wykonałem badania wysokonapięciowe. W pierwszej kolejności skupiłem się na wytrzymałości elektrycznej. W zespole współautorów pracy [C11] wykonaliśmy jednominutową próbę napięciową **70 kV**, która jest wymagana normą dla układów izolacyjnych pracujących w sieci o napięciu znamionowym 30 kV (U_m = 36 kV). Próba ta przebiegła pozytywnie bez żadnych zakłóceń. Następnie przeprowadziliśmy badania prądu upływu w zakresie napięć o wartościach skutecznych do 38 kV, na podstawie których wyznaczyłem impedancję jednostkową (w odniesieniu do drogi upływu), równą **18,5 MΩ/cm**. Dla porównania impedancja jednostkowa dla izolatora ceramicznego wyniosła podczas tego samego cyklu badań 14,5 MΩ/cm. Celem potwierdzenia dobrych właściwości izolacyjnych zmierzyłem również rezystancję powierzchniową miernikiem rezystancji izolacji na odcinku włókna światłowodowego wraz z tubą z PCV o długości 5 mm. W tym teście uzyskałem wartość **22,0 GΩ** (rys. 3 z pracy [C12]). Uzyskana wartość wskazuje na bardzo dobre właściwości izolacyjne światłowodu wraz z pokryciem z PCV.

Kolejne badania wysokonapięciowe dotyczyły pomiarów prądów w przewodniku (będącym elementem składowym prototypu przekładnika prądowego) znajdującym się na wysokim potencjale elektrycznym względem ziemi [C12]. Badania te wykazały, że wysoki potencjał przewodnika nie wpływa na działanie światłowodowego czujnika prądu. Dowodem na to są wyniki dla napięć 0 kV, 10 kV, 20 kV i 30 kV zamieszczone na rys. 16.



Rys. 16. Wykres zbiorczy odpowiedzi czujnika dla napięć 0 kV, 10 kV, 20 kV, 30 kV (rys. 7 z pracy [C12]).

Powyższy wynik (rys. 16) nie jest zaskoczeniem, a jedynie potwierdzeniem doskonałych właściwości izolacyjnych czujnika w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy. Test ten otwiera drogę do badań na rzeczywistym torze prądowym systemu elektroenergetycznego w zakresie napięć do 36 kV.

Jak już wspomniałem czujnik ma duże możliwości zastosowania jako przekładnik prądowy do zabezpieczeń. Czujnik ten spełnia wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej dla napięć znamionowych do 30 kV, jest iskrobezpieczny i nieinwazyjny. Oznacza to, że nie wpływa na parametry elektryczne obwodu i przede wszystkim jest niewrażliwy na przeciążenia. Ta ostatnia zaleta jest nie tylko związana z możliwością pomiaru prądów przeciążeniowych, ale również z możliwością pomiaru krótkotrwałych prądów, kilkudziesięciokrotnie przekraczających wartość znamionową (prądy zwarciowe). Ograniczeniem możliwości zastosowania analizowanego czujnika w takich stanach jest maksymalna temperatura toru prądowego, nie powodująca termicznego zniszczenia czujnika. W związku z tym podjąłem próbę przetestowania czujnika w warunkach odpowiadających stanom zakłóceń systemu elektroenergetycznego. W tym zakresie nawiązałem współpracę w zakresie elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeń (ze współautorem pracy [C13]), wykonując badania stanów nieustalonych na stanowisku symulującym warunki rzeczywiste, podobnie jak w pracy [C10]. Przeniesienie tego pomysłu na ten grunt umożliwiło mi przetestowanie czujnika dla prądów o przebiegach innych niż sinusoidalnie zmienne o częstotliwości 50 Hz. W pracy [C13] przedstawiłem wyniki testów polegających na okresowym włączaniu na krótki okres czasu i wyłączaniu przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz, co odwzorowuje nienormalne stany pracy systemu elektroenergetycznego o dużej dynamice parametrów elektrycznych. Przy pomiarach prądów z wykorzystaniem konwencjonalnych przekładników prądowych uzyskuje się duże odkształcenia przebiegów wartości chwilowych sygnałów wtórnych, co jest niepożądane, ponieważ może

przyczynić się do niepoprawnego działania EAZ. Natomiast opracowany przeze mnie czujnik prądu praktycznie bezbłędnie „przeniósł” sygnał wymuszany w obwodzie pierwotnym do obwodu wtórnego. Nawet w czasie bliskim punktom włączenia i wyłączenia, przebiegi sygnału wtórnego były jedynie nieznacznie odkształcone, przy czym względny błąd jedynie nieznacznie przekroczył 1%, w odniesieniu do wartości oczekiwanej i to dla prądu przekraczającego 4000 A. Szczegółowe wyniki zebrano w Tab. 1.

Tab. 1. Zarejestrowane różnice między sygnałami pierwotnym i wtórnym prototypu przekładnika prądowego z światłowodowym czujnikiem prądu z przetwarzaniem zewnętrznym w stanach nieustalonych. W celu porównania przeliczono napięcie czujnika na odpowiadającą mu wartość prądu.

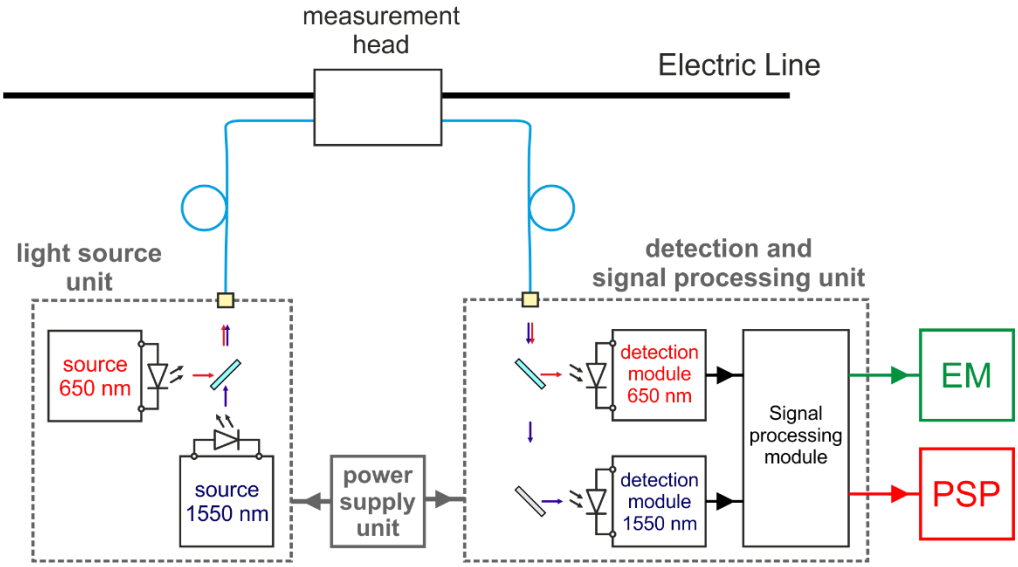
Próbka	Nat. prądu cewki	I_{max1h}, A	U_{max1h}, mV	stan nieustalony na początku sygnału „włączenie”		stan ustalony sygnału			stan nieustalony na końcu sygnału „wyłączenie”	
				max. różnica dodatnia, %	max. różnica ujemna, %	max. różnica dodatnia, %	średnia różnica, %	max. różnica ujemna, %	max. różnica dodatnia, %	max. różnica ujemna, %
pierwsza próbka	5 A	2595	602,2	0,101	–0,483	0,042	–0,038	–0,143	0,462	–0,068
druga próbka	6 A	3116	722,8	0,075	–0,728	0,095	–0,006	–0,115	0,636	–0,077
trzecia próbka	7 A	3640	844,2	0,141	–0,790	0,101	0,007	–0,074	0,798	–0,066
czwarta próbka	8 A	4045	937,8	0,141	**–0,980**	0,141	0,046	–0,044	**1,089**	–0,053

gdzie:
I_{max1h} – amplituda podstawowej harmonicznej (50 Hz) prądu pierwotnego mierzona pośrednio przez pomiar prądu cewki (wartość przeliczona dla szynoprzewodu 20 mm × 3 mm wg linii z rys. 13 b));
U_{max1h} – amplituda podstawowej harmonicznej (50 Hz) napięcia wtórnego czujnika.

Najwyższe uzyskane rozbieżności nie przekroczyły 1,1 %. Wartości te jednak uzyskano tam, gdzie gradient sygnału był największy, a więc pojawić się mogły również pewne błędy w pomiarowym układzie odniesienia. Były to pierwsze testy, które potwierdziły bardzo dobre właściwości dynamiczne czujnika (bardzo krótki czas odpowiedzi). Pomiary te nade wszystko wykazały, że opracowany przeze mnie czujnik ma bardzo szerokie możliwości zastosowania w elektroenergetycznej automatyce zabezpieczeń.

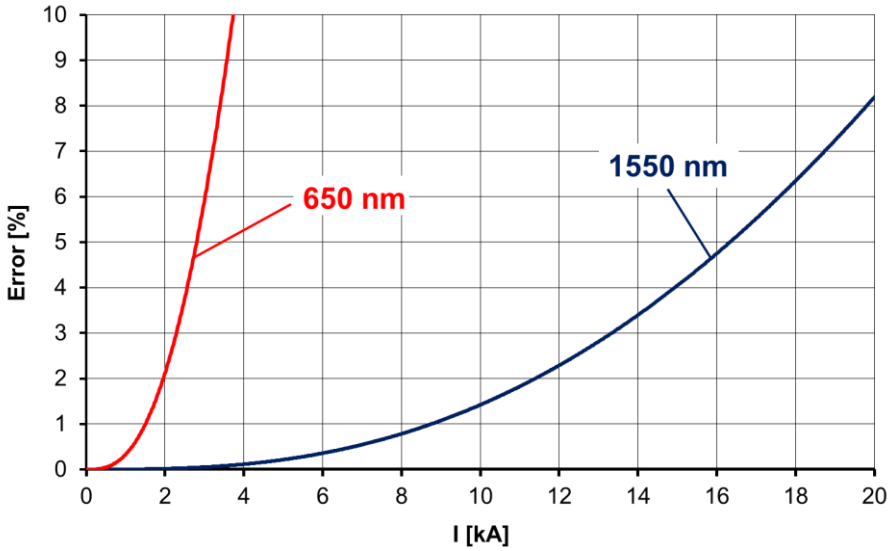
W moim cyklu jako ostatni artykuł zamieściłem pracę wskazującą na jedną z możliwości wykorzystania opracowanego przeze mnie światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym jako przekładnika prądowego do zabezpieczeń. Zaproponowałem przeanalizowanie możliwości wykorzystania właściwości dyspersyjnych czujnika celem regulacji jego czułości bez konieczności jego demontażu lub nawet w trakcie jego pracy [C14]. W ten sposób powstała koncepcja konfigurowalnego przekładnika prądowego. W czujniku na wyjściu z głowicy znajduje się polaryzator, który przetwarza skręcenie polaryzacji na zmianę natężenia światła na wyjściu. Przetwarzanie to jest z założenia nieliniowe, zgodnie z prawem Malusa. Zgodnie z tym prawem dla światła spolaryzowanego liniowo jego natężenie po przejściu przez polaryzator jest proporcjonalne do kwadratu cosinusa kąta pomiędzy azymutem polaryzacji światła na wejściu a osią optyczną (maksymalnego przepuszczania) polaryzatora. Punkt pracy jest dobrany tak, aby znajdował się w środku zakresu największej liniowości (punkt przegięcia funkcji cosinus kwadrat). Zakładając liniowy charakter tego przekształcenia, przy zbyt dużym skręceniu może znacząco wzrosnąć błąd wynikający z nieliniowości charakterystyki przenoszenia, zgodnie z prawem Malusa. Stała Verdeta, która jest bezpośrednio związana z czułością czujnika zależy od długości fali światła (tzw. dyspersja stałej Verdeta). Stała Verdeta jest większa dla krótszych długości fali i może się ponad dwukrotnie różnić na krańcach zakresu widzialnego. Dla stosowanych przeze mnie szkieł diamagnetycznych jest to zależność monotoniczna. Zauważyłem,

że nieliniowość stosowanego przeze mnie czujnika można znacząco ograniczyć zmniejszając czułość dla wyższych prądów, a więc wtedy gdy skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła również jest duże. Wówczas czułość napięciowa bezwzględna czujnika będzie znacznie mniejsza, jednak względna czułość (przy dużych wartościach) może pozostać na założonym poziomie. Zatem jest możliwe utrzymanie odpowiedniej klasy pomiarowej dla wielu zakresów pomiarowych. Przeanalizowałem możliwość pracy czujnika w dwóch zakresach pomiarowych tj. dla długości fali światła 635 nm oraz 1550 nm. Zaproponowałem pracę czujnika jednocześnie na obu długościach fali, co schematycznie przedstawiłem na rys. 17. Pozwala to na jednoczesną realizację dwóch zadań, dotychczas wykonywanych przez dwa niezależne przekładniki prądowe: przekładnik do pomiarów (do takiego przekładnika przyłącza się urządzenia pomiarowe, m.in. liczniki energii – na rysunku ilustruje to bloczek EM) i przekładnik do zabezpieczeń (jak wskazano wcześniej, do takiego przekładnika przyłącza się EAZ – na rysunku ilustruje to bloczek PSP). Stanowi to innowację względem aktualnie stosowanych rozwiązań i pozwoli na uproszczenie struktury obwodów wtórnych, co jest oczekiwane w systemie elektroenergetycznym.



Rys. 17. Schemat konfigurowalnego światłowodowego czujnika prądu. Przykład konfiguracji dla dwóch długości fali światła: 635 nm oraz 1550 nm (rys. 3 z pracy [C14])

Przeprowadzona przeze mnie analiza wykazała, że maksymalny błąd nieliniowości dla długości fali 635 nm i dla zakresu **od 0 do 200 A** wynosi **0,0033 %**, przy czym dla długości fali 1550 nm, taką samą wartość błędu nieliniowości uzyskano dla zakresu **od 0 do 1180 A**. Warto te błędy rozważyć dla wielokrotności 10 i 20 prądu znamionowego 200 A, gdyż są to wartości odpowiadające współczynnikom granicznym dokładności określonym przez normę PN-EN 60044-1 (wszystkie znormalizowane wartości to: 5, 10, 15, 20, 30). Zatem dla długości fali 1550 nm błąd nieliniowości dla zakresu **od 0 do 10 kA** wynosi **1,43 %** a dla zakresu **od 0 do 20 kA** wynosi **8,2 %**. Wartości te mieszczą się odpowiednio w klasie dokładności 5P i 10P dla przekładników prądowych do zabezpieczeń. Zależność błędu nieliniowości od wartości prądu dla obu długości fali światła (635 nm i 1550 nm) pokazano na rys. 18. Z powyższych danych wynika, że przekładnik taki może jednocześnie pracować jako przekładnik prądowy do pomiarów i do zabezpieczeń [C14].



Rys. 18. Względny błąd wynikający z nieliniowości konfigurowalnego światłowodowego czujnika prądu (rys. 4 z pracy [C14]).

Podsumowując badania nad światłowodowym czujnikiem prądu z przetwarzaniem zewnętrznym moimi osiągnięciami naukowymi są:

III.a Opracowanie, zaprojektowanie i wykonanie prototypu światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym. [C7-C8]. W tym obszarze:

1) Opracowałem i przebadałem prototyp światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym bazujący na światłowodowym czujniku pola magnetycznego (z p. II.a). Wykorzystałem w tej wersji prototypu tanie i dostępne komercyjnie światłowody polimerowe (PMMA) jako doprowadzenie i odprowadzenie fali świetlnej z głowicy oraz użyłem diodę LED (dł. fali 635 nm) jako źródła światła.
2) Opracowałem zmodyfikowaną wersję prototypu światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym, wykorzystując szklane (krzemionkowe) światłowody typu PCS jako doprowadzenie i odprowadzenie fali świetlnej z głowicy oraz użyłem osłony tych światłowodów w postaci tuby z PCV. W ten sposób uzyskałem lepszą stabilności pracy czujnika dzięki radykalnemu zmniejszeniu wpływu deformacji włókien doprowadzających na parametry fali świetlnej (rys. 4 z pracy [C7] oraz rys. 15). Uzyskałem również poprawienie odporności termicznej czujnika ze względu na wysoką odporność światłowodów krzemionkowych na temperaturę.
3) Przebadałem czujniki w warunkach prądów stałych i przemiennych i określiłem ich czułość magnetooptyczną wynoszącą 40,9 °/T oraz napięciową wynoszącą 5,1 V/T [C8].

III.b Charakteryzacja właściwości optycznych i elektrycznych opracowanego światłowodowego czujnika prądu oraz wykazanie możliwości jego zastosowania w roli przekładnika prądowego w elektroenergetyce. [C8-C12]. W tym obszarze:

1) Wykazałem bardzo dobre właściwości izolacyjne światłowodowego czujnika prądu – we współpracy ze współautorami prac [C11] i [C12] uzyskałem wytrzymałość elektryczną dla układów izolacyjnych pracujących w sieci o napięciu znamionowym 30 kV (U_m = 36 kV) [C11]. Otrzymałem wysoką impedancję jednostkową równą 18,5 MΩ/cm – dla porównania impedancja ta dla izolatora ceramicznego wyniosła podczas tego samego cyklu badań 14,5 MΩ/cm.

2) Opracowałem prototyp przekładnika prądowego z przewodem miedzianym o przekroju 20 mm × 3 mm na prąd znamionowy 200 A. Dla tego prototypu potwierdzona eksperymentalnie przeze mnie czułość napięciowa wynosi 0,284 mV/A.
3) Potwierdziłem poprawność działania prototypu przekładnika w warunkach zbliżonych do rzeczywistych dla napięć do 30 kV (rys. 16).

III.c Wykazanie i określenie możliwości zastosowania opracowanego światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym jako niekonwencjonalnego przekładnika prądowego dla celów pomiarowych i zabezpieczeniowych w elektroenergetycznych systemach średnich i wysokich napięć [C13-C14]. W tym obszarze:

1) Eksperymentalnie potwierdziłem poprawność działania w stanach nieustalonych (tab. 1) prototypu przekładnika prądowego bazującego na światłowodowym czujniku prądu z przetwarzaniem zewnętrznym [C13].
2) Opracowałem koncepcję światłowodowego przekładnika prądowego umożliwiającego jednoczesne wykorzystanie go jako przekładnika prądowego do zabezpieczeń i przekładnika do pomiarów. Konstrukcję oparłem na jednoczesnym wykorzystaniu w czujniku dwóch długości fali 405 nm i 635 nm, co pozwala na uzyskanie dwóch zakresów pomiarowych o założonych klasach dokładności odpowiednio dla celów pomiarowych i zabezpieczeniowych [C14].

Podsumowanie

Przedstawiony w autoreferacie dorobek naukowy, stanowiący moje osiągnięcie naukowe, dotyczy zastosowań magnetooptycznego efektu Faradaya w konstrukcjach czujników optoelektronicznych do pomiaru pola magnetycznego i prądu elektrycznego. Opracowałem prototypy czujników oraz określiłem możliwości wykorzystania światłowodów fotonicznych.

Motywacją moich badań było poszerzenie możliwości pomiarów prądów i pola magnetycznego w zastosowaniach elektroenergetycznych (w szczególności w EAZ) i elektrotechnicznych (w szczególności w maszynach elektrycznych).

Moja działalność badawcza przyczyniła się do rozwinięcia zagadnień pomiaru pola magnetycznego i prądu elektrycznego z wykorzystaniem czujników światłowodowych z przetwarzaniem zewnętrznym i wewnętrznym do zastosowań w przemyśle elektroenergetycznym.

Sumaryczny impact factor przedstawianego przeze mnie jednotematycznego cyklu artykułów jest równy ***4,348***. Sumaryczna liczba cytowań (wg bazy Web of Science Core Collection) przedkładanego przez ze mnie cyklu publikacji, z uwzględnieniem i wyłączeniem autocytowań, wynoszą odpowiednio: ***81*** i ***55***, analogiczne liczby cytowań wg bazy Scopus wynoszą: ***92*** i ***59***.

Poniżej zebrałem osiągnięcia, które zostały zamieszczone w podsumowaniach punktów I, II i III autoreferatu. Stanowią one moje osiągnięcie naukowe określone w punkcie 4 a).

I.a Wykazanie możliwości wykorzystania szkieł o wysokim współczynniku załamania światła jako materiału na włókno optyczne typu step-index oraz włókno polaryzacyjne czułe magnetooptycznie [C1-C2]. W tym obszarze:

1) Opracowałem projekt konstrukcji światłowodu wykorzystującego jako rdzeń szkło o wysokim współczynniku załamania światła (1,62 dla dł. fali 633 nm) czułe

magnetooptycznie o parametrach technologicznych umożlwiających wytworzenie włókna optycznego [C2].

2) Dobrałem parametry optyczne szkła rdzeniowego światłowodu jednomodowego (dla dł. fali 635 nm) typu step-index oraz światłowodu polaryzacyjnego typu side-hole [C1-C2].

3) Potwierdziłem eksperymentalnie, na wykonanym przeze mnie układzie pomiarowym, dobrą czułość magnetooptyczną opracowanych i wytworzonych światłowodów, która dla obu włókien wyniosła 2,49 rad/(T·m). Jest ona niespełna dwukrotnie wyższa w porównaniu do standardowych włókien krzemionkowych typu step-index, dla których wartość tej czułości w tych badaniach wyniosła 1,36 rad/(T·m) [C1].

I.b Określenie właściwości polaryzacyjnych włókien fotonicznych typu index-guiding i wykazanie możliwości ich wykorzystania w głowicach światłowodowego czujnika prądu. [C3-C4]. W tym obszarze:

1) Uzyskałem dobrą czułość magnetooptyczną dla długości fali światła 635 nm, która wyniosła 2,17 rad/(T·m) bez drgań, oraz 2,23 rad/(T·m) podczas drgań, co daje różnicę na poziomie 2,8 %. Wykazałem potencjalne możliwości stosowania włókna w warunkach zewnętrznych zaburzeń w postaci drgań, na które głowica światłowodowego czujnika prądu jest narażona w rzeczywistych warunkach pracy.

2) Eksperymentalne potwierdziłem niską wrażliwość włókna podczas drgań mechanicznych, ze względu na właściwości polaryzacyjne [C4].

I.c Udowodnienie postawionej tezy, że światłowód fotoniczny typu index-guiding jest znacznie mniej wrażliwy polaryzacyjnie niż standardowy światłowodu typu step-index ze względu na deformację włókna [C3-C5]. W tym obszarze:

1) Eksperymentalne potwierdziłem niższą wrażliwość polaryzacyjną włókna fotonicznego typu index-guiding w porównaniu ze standardowym włóknem krzemionkowym typu step-index dla długości fali 405 nm i 635 nm (rys. 4 do 7) [C5].

2) Uzyskałem wysoką wartość czułości magnetooptycznej na poziomie 8,75 rad/(T·m) w opracowanym układzie czujnikowym z światłowodem fotonicznym typu index-guiding pracującym przy długości fali 405 nm [C5].

II.a Opracowanie koncepcji, zaprojektowanie, wykonanie i charakteryzacja prototypu światłowodowego czujnika z przetwarzaniem zewnętrznym umożlwiającego pomiary pola magnetycznego wewnątrz maszyn elektrycznych [C6]. W tym obszarze:

1) Opracowałem i przebadałem prototyp światłowodowego czujnika pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym, w tym opracowałem i wykonałem głowicę czujnika z wykorzystaniem szkła o stałej Verdeta 4,34 rad/(T·m) uformowanego w postaci pręta szklanego o długości 34 mm i średnicy 1,8 mm. Konstrukcja głowicy zapewnia możliwość lokalnego pomiaru wartości indukcji pola magnetycznego wewnątrz maszyn elektrycznych (rys. 11).

2) Potwierdziłem eksperymentalnie poprawność działania opracowanego prototypu, który wykazał czułość magnetooptyczną na poziomie 8,64 °/T.

III.a Opracowanie, zaprojektowanie i wykonanie prototypu światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym. [C7-C8]. W tym obszarze:

1) Opracowałem i przebadałem prototyp światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym bazujący na światłowodowym czujniku pola magnetycznego (z p. II.a). Wykorzystałem w tej wersji prototypu tanie i dostępne komercyjnie światłowody polimerowe (PMMA) jako doprowadzenie i odprowadzenie fali świetlnej z głowicy oraz użyłem diodę LED (dł. fali 635 nm) jako źródła światła.

2) Opracowałem zmodyfikowaną wersję prototypu światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym, wykorzystując szklane (krzemionkowe) światłowody typu PCS jako doprowadzenie i odprowadzenie fali świetlnej z głowicy oraz użyłem osłony tych światłowodów w postaci tuby z PCV. W ten sposób uzyskałem lepszą stabilności pracy czujnika dzięki radykalnemu zmniejszeniu wpływu deformacji włókien doprowadzających na parametry fali świetlnej (rys. 4 z pracy [C7] oraz rys. 15). Uzyskałem również poprawienie odporności termicznej czujnika ze względu na wysoką odporność światłowodów krzemionkowych na temperaturę.
3) Przebadałem czujniki w warunkach prądów stałych i przemiennych i określiłem ich czułość magnetooptyczną wynoszącą 40,9 °/T oraz napięciową wynoszącą 5,1 V/T [C8].

III.b Charakteryzacja właściwości optycznych i elektrycznych opracowanego światłowodowego czujnika prądu oraz wykazanie możliwości jego zastosowania w roli przekładnika prądowego w elektroenergetyce. [C8-C12]. W tym obszarze:

1) Wykazałem bardzo dobre właściwości izolacyjne światłowodowego czujnika prądu – we współpracy ze współautorami prac [C11] i [C12] uzyskałem wytrzymałość elektryczną dla układów izolacyjnych pracujących w sieci o napięciu znamionowym 30 kV (U_m = 36 kV) [C11]. Otrzymałem wysoką impedancję jednostkową równą 18,5 MΩ/cm – dla porównania impedancja ta dla izolatora ceramicznego wyniosła podczas tego samego cyklu badań 14,5 MΩ/cm.
2) Opracowałem prototyp przekładnika prądowego z przewodem miedzianym o przekroju 20 mm × 3 mm na prąd znamionowy 200 A. Dla tego prototypu potwierdzona eksperymentalnie przeze mnie czułość napięciowa wynosi 0,284 mV/A.
3) Potwierdziłem poprawność działania prototypu przekładnika w warunkach zbliżonych do rzeczywistych dla napięć do 30 kV (rys. 16).

III.c Wykazanie i określenie możliwości zastosowania opracowanego światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym jako niekonwencjonalnego przekładnika prądowego dla celów pomiarowych i zabezpieczeniowych w elektroenergetycznych systemach średnich i wysokich napięć [C13-C14]. W tym obszarze:

1) Eksperymentalnie potwierdziłem poprawność działania w stanach nieustalonych (tab. 1) prototypu przekładnika prądowego bazującego na światłowodowym czujniku prądu z przetwarzaniem zewnętrznym [C13].
2) Opracowałem koncepcję światłowodowego przekładnika prądowego umożliwiającego jednoczesne wykorzystanie go jako przekładnika prądowego do zabezpieczeń i przekładnika do pomiarów. Konstrukcję oparłem na jednoczesnym wykorzystaniu w czujniku dwóch długości fali 405 nm i 635 nm, co pozwala na uzyskanie dwóch zakresów pomiarowych o założonych klasach dokładności odpowiednio dla celów pomiarowych i zabezpieczeniowych [C14].

W zakresie przedstawionej tutaj tematyki badawczej istnieje wiele problemów oczekujących na rozwiązanie. Niektóre z nich są już przedmiotem moich badań, inne zaś zamierzam podjąć w najbliższej przyszłości. Należą do nich:

1. Badania wpływu temperatury na odpowiedź światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym w szerokim zakresie temperatur odpowiadającym typowym rzeczywistym warunkom pracy.
2. Badania właściwości magnetooptycznych szkieł wyprodukowanych w ITME, które potencjalnie mogą być wykorzystane w głowicy światłowodowego czujnika prądu z przetwarzaniem zewnętrznym oraz jako materiał na włókno fotoniczne. W szczególności

cykl badań będzie miał na celu określnie dyspersji stałej Verdeta w zakresie widzialnym. W dalszym etapie ma być określona ta dyspersja w funkcji temperatury.

3. Zbadanie właściwości magnetooptycznych włókien fotonicznych wykonanych z wybranych na podstawie powyższych badań szkieł (we współpracy z ITME).

Obecnie jestem w trakcie realizacji badań nad określeniem dyspersji stałej Verdeta szkieł wyprodukowanych w ITME. Wykonałem badania i analizę wyników dla temperatury pokojowej. Napisany przeze mnie artykuł został przesłany do recenzji w czasopiśmie „IEEE Transaction on magnetics".

Warto podkreślić, że za wyjątkiem pracy [C13] i [C14] wszystkie przedstawione jako osiągnięcie naukowe prace zostały napisane w całości przeze mnie. W badaniach z prac [C9][C11-C14] współuczestniczyli ze mną współautorzy, w pozostałych pracach wszystkie badania i opracowania (w tym rysunki) zostały w całości wykonane przeze mnie. Potwierdza to moją dojrzałość i samodzielność naukową.

Praca naukowa doprowadziła mnie do momentu, w którym dalszy wzrost i doskonalenie badań należy prowadzić w oparciu o szerszą i bardziej interdyscyplinarną współpracę, która będzie skutkowała przekazywaniu współpracownikom większego zakresu zadań naukowych.

Zbudowałem zaplecze laboratoryjne i warsztat badawczy. Nawiązałem współpracę i utrwaliłem wiele kontaktów. W zakresie realizowanej przeze mnie tematyki dorobek ten otwiera możliwości realizacji nowych kierunków badawczych. Mogą one być tematami prac doktorskich oraz kolejnych wartościowych publikacji akceptowanych przez wysoko punktowane czasopisma.

Literatura uzupełniająca:

[U1] W. Starczakow, "Przekładniki", PWN, W-wa, 1954.

[U2] A. Wiszniewski, "Przekładniki w elektroenergetyce", WNT, Warszawa 1982.

[U3] Szczerbowski R., "Wyzwania polskiego sektora wytwórczego do 2030 roku", Zesz. Nauk. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, nr 102, s. 203–216, 2018.

[U4] W. Winkler, A. Wiszniewski, "Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych", PWN, WNT, wyd. 2, Warszawa, 2019.

[U5] Z. Lubośny, "Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa farm wiatrowych", WNT, Warszawa, 2014.

[U6] R. Kowalik, M. Januszewski, A. Smolarczyk, "Cyfrowa elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa", Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.

[U7] J. Żydanowicz, "Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa", tom 1, WNT, Warszawa 1979.

[U8] Silva R. M., Martins H., Nascimento I., Baptista J. M., Ribeiro A. L., Santos J. L., Frazão O., "Optical current sensors for high power systems: a review", *Applied Sciences, 2(3),* 602-628.2012.

[U9] Jones R.E., Willson J.P., Pitt G.D., Pratt R.H., Foulds K.W.H., Batchelder D.N., "Detection techniques for measurement of dc magnetic fields using optical fibre sensors", *First International Conference on Optical Fibre Sensors, The Institution of Electrical Engineers, IEE,* London, 1983.

[U10] Yamashita T., Watabe A., Masuda I., Sakamoto K., Kurosawa K., Yoshida S., "Extremely small stress-optic coefficient glass single mode fibers for current sensor", *Optical Fiber Sensors, Optical Society of America,* p. We24, 1996.

[U11] Li, G. D., Aspey, R. A., & Jones, G. R., “White LED based Faraday current sensor using a quartz wavelength encoder”, *Optics communications*, 162(1-3), 44-48, 1999.

[U12] Rose, A. H., Etzel, S. M., & Rochford, K. B., “Optical fiber current sensors in high electric field environments”, *Journal of Lightwave Technology*, 17(6), 1042-1048, 1999.

[U13] Rochford, K. B., “Improved fiber-optic magnetometer based on iron garnet crystals”, *Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors, International Society for Optics and Photonics, Vol. 4185*, p. 41854W, 2000.

[U14] Bohnert K., Gabus P., Nehring J., Brandle H., “Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor”, *Journa*l of Lightwave Technology, 20(2), p. 267, 2002.

[U15] Barmenkov, Y. O., Mendoza-Santoyo, F., “Faraday plasma current sensor with compensation for reciprocal birefringence induced by mechanicalperturbations”, *Journal of Applied Research and Technology, 1(2)*, 157-163, 2003.

[U16] Bohnert K., Gabus P., Brändle H., Guggenbach P., “Fiber-optic dc current sensor for the electro-winning industry”, 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, Vol. 5855, pp. 210-214, *International Society for Optics and Photonics*, 2005.

[U17] Shao J., Liu W., Liu C., Xu D., “A passive optical fiber current sensor based on YIG”, *2008 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference, IEEE*, pp. 1-4, 2008.

[U18] Zhao Y., Zhou F., Xu F., Lu Y. Q., “A heterodyne optical fiber current sensor based on a nanowire-grid in-line polarizer”, *IEEE Photonics Journal, 4(5)*, pp. 1288-1294, 2012.

[U19] Peng N., Huang Y., Wang S., Wen T., Liu W., Zuo Q., Wang L., “Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber”, *IEEE Photonics Technology Letters, 25(17)*, pp. 1668-1671, 2013.

[U20] Pistoni N.C., Martinelli M., “Birefringence Effects Suppression in Optical Fiber Sensor Circuits”, *7th Optical Fibre Sensor Conference*, Australia, pp. 125-128, 1990.

[U21] Hao J., Huang P., Li X., Yang H., Yang J., “Polarization errors analysis of waveplate in Sagnac optical fiber current sensor”, *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, IEEE, Vol. 1*, pp. 238-241, 2011.

[U22] J. Dorosz, “Technology of elliptical and strip core optical fibers”, *Proc. SPIE 5775*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments III, 2005.

[U23] J. Dorosz, “Technologia światłowodów włóknistych”, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, 2005.

[U24] Holm U., Sohlström H., Svantesson K., „Transmission loss compensation for Faraday effect fibre optic sensors”, *Sensors and Actuators A, 47*(1-3), pp. 487-490, 1995.

[U25] Sedlar M., Matejec V., Paulicka I., “Optical fibre magnetic field sensors using ceramic magnetostrictive jackets”, *Sensors and Actuators 84*, pp. 297–302, 2000.

[U26] Chen Y., Han Q., Liu T., Lan X., Xiao H., „Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode–multimode–single-mode structure and magnetic fluid”, *Optics letters, 38*(20), pp. 3999-4001, 2013.

[U27] H. Bach and N. Neuroth, “The Properties of Optical Glass,” Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1998.

[U28] Pershan P. S., "Magneto-optical effects," *J. Appl. Phys. 38*, pp. 1482-1490, 1967.

[U29] M. J. Weber, Ed., “CRC Handbook of Laser Science and Technology,” Vol. IV, Part 2, CRC Press, Boca Raton, FL, 1988.

[U30] Shiyu Y., Lousteau J., Olivero M., Merlo M., Boetti N., Abrate S., Milanese D., „Analysis of Faraday effect in multimode tellurite glass optical fiber for magneto-optical sensing and monitoring applications”, *Applied Optics, 51*(19), pp. 4542-4546, 2012.

[U31] Elisa M., Iordanescu R., Vasiliu C., Sava B. A., Boroica L., Valeanu M., Melinescu A., „Magnetic and magneto-optical properties of Bi and Pb-containing aluminophosphate glass”, *Journal of Non-Crystalline Solids, 465,* pp. 55-58, 2017.

[U32] Butler M. A., Venturini E. L., "High frequency Faraday rotation in FR-5 glass", *Appl. Opt., vol. 26,* pp. 1581-1582, 1987.

[U33] Q. Chen , Q. Wang, Q. Ma, H. Wang, „Structure, spectra and Faraday rotation in TiO2 doped diamagnetic PbO-Bi2O3-B2O3 glasses”, *Journal of Non-Crystalline Solids, 464,* pp. 14-22, 2017.

[U34] Suzuki F., Sato F., Oshita H., Yao S., Nakatsuka Y., Tanaka K., „Large Faraday effect of borate glasses with high Tb3+ content prepared by containerless processing”, *Optical Materials, 76,* pp. 174-177, 2018.

[U35] Chen Q., Ma Q., Wang H., Chen Q., „Diamagnetic tellurite glass and fiber based magneto-optical current transducer”, *Applied Optics, 54*(29), pp. 8664-8669, 2015.

[U36] Goto T., Onbaşlı M. C., Ross C. A., „Magneto-optical properties of cerium substituted yttrium iron garnet films with reduced thermal budget for monolithic photonic integrated circuits”, *Optics express, 20*(27), pp. 28507-28517, 2012.

[U37] Zubia J., Arrue J., „Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications”, *Optical Fiber Technology, 7*(2), pp. 101-140, 2001.

[D1-D11] są zamieszczone w “Wykazie dorobku habilitacyjnego”.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Tematyką pomiaru pól magnetycznych zajmowałem się już w trakcie realizacji pracy doktorskiej, która dotyczyła badania właściwości magnetooptycznych światłowodów specjalnych. Badania te miały na celu określenie możliwości zastosowania światłowodów typu D w pomiarach pól magnetycznych. Przekrój poprzeczny płaszcza tego typu światłowodu przypomina kształtem dużą literę „D”, a charakterystyczne ścięcie płaszcza znajduje się bardzo blisko rdzenia włókna. Asymetria ta jest bezpośrednią przyczyną dwójłomności włókna, która wpływa na mniejszą jego wrażliwość na zakłócenia wywołane czynnikami zewnętrznymi takimi jak deformacje. Ścięcie płaszcza umożliwia także penetrację pokrycia przez pole zanikające fali świetlnej. Wykorzystując to zjawisko zaproponowałem i zbadałem nową strukturę z pokryciem wykonanym z gumy silikonowej zawierającej drobiny niklu. Wyniki badań zostały opublikowane w publikacjach posiadających IF [D1-D3]. Do najważniejszych osiągnięć zaliczyłem uzyskanie dobrej czułości na działanie zewnętrznego pola magnetycznego światłowodów typu D z pokryciem bez drobin niklu. Skręcenie płaszczyzny polaryzacji w zewnętrznym polu magnetycznym charakteryzowane stałą Verdeta wyniosło ok. 5 rad/(T·m). Należy podkreślić, że czułość ta jest wyższa niż dla światłowodów krzemionkowych typu step-index. Ponadto wykazałem, że domieszkowanie gumy silikonowej pokrycia światłowodowego materiałami ferromagnetycznymi (np. drobinami niklu) nie pozwoli na otrzymanie światłowodu o satysfakcjonujących właściwościach magnetooptycznych. Natomiast kluczowym parametrem w badanych światłowodach była odległość ścięcia płaszcza od rdzenia, która wynosiła d=4μm. Na światłowody typu D w znacznie

mniejszym stopniu działają przypadkowe zakłócenia zewnętrzne związane z przypadkowymi deformacjami włókien. Jest to bardzo ważna właściwość badanych włókien typu D pod kątem ich potencjalnych zastosowań praktycznych. Światłowody te jednak są wrażliwe na działanie temperatury i w zakresie 16 – 65 °C wartość czułości magnetooptycznej zmienia się ponad trzykrotnie. Jest to właściwość niekorzystna i wymaga uwzględnienia w kontekście praktycznych zastosowań czujnikowych. Podsumowałem moje badania nad światłowodami typu D w rozdziale książki p.t.: „Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej", t. 3 [D11]. Analiza parametrów użytkowych była impulsem do dalszych badań nad innymi konstrukcjami pozwalających na ich zastosowanie. W efekcie zaproponowałem własne konstrukcje, przedstawione w punkcie 4.

Po doktoracie, poza głównym nurtem badań, moja aktywność naukowa była skoncentrowana na zagadnieniach badawczych związanych ze światłowodami planarnymi, energetyką prosumencką oraz zastosowaniem światłowodów włóknistych w medycynie.

W ramach uczestnictwa w projekcie badawczym rozwojowym nr KBN R01 0034 06 (2009-2012) zaprojektowałem i zbudowałem stanowisko badawcze do pobudzania światłowodów planarnych. Uczestniczyłem również w opracowaniu metody łączenia włókien światłowodowych z strukturami planarnymi. Stanowisko to do tej pory jest użytkowane w Katedrze Optoelektroniki Politechniki Śląskiej.

W ramach działalności statutowej Katedry Optoelektroniki Politechniki Śląskiej uczestniczyłem w charakterze wykonawcy w pracach BK-205/RE4/2014, BK-233/RE4/2015, BK-232/RE4/2016, BK-243/RE4/2017, BK-205/RE4/2018. Moja aktywność naukowa w tych pracach polegała na:

- rozbudowie i oprogramowaniu w środowisku LabView stanowisk badawczych do badań efektu magnetooptycznego w warunkach stałych i zmiennych pól magnetycznych (BK-205/RE4/2014);
- zaprojektowaniu, zbudowaniu i oprogramowaniu w środowisku LabView stanowiska badawczego do wyznaczania stałej Verdeta w funkcji długości fali w szkłach wieloskładnikowych (BK-232/RE4/2016);
- opracowaniu i oprogramowaniu w środowisku LabView stanowiska pomiarowego do badań czułości napięciowej na zewnętrzne pole magnetyczne światłowodowych czujników prądu i pola magnetycznego z przetwarzaniem zewnętrznym (BK-233/RE4/2015).

Byłem kierownikiem pracy statutowej BK-259/RE4/2011. W wyniku tej pracy zaprojektowałem, zbudowałem i przebadałem kilka konfiguracji światłowodowego depolaryzatora światła. Konstrukcja depolaryzatora była oparta na wykorzystaniu wielomodowych sprzęgaczy światłowodowych. Wyniki tej pracy zostały opublikowane w [D8].

W okresie po doktoracie byłem również zaangażowany w prace w zakresie energetyki prosumenckiej. W pracy zbiorowej [D10] analizowałem możliwości współpracy instalacji fotowoltaicznej z gruntową pompą ciepła w prosumenckiej mikroinstalacji energetycznej (PME). Wyniki tych analiz doprowadziły do konkluzji, że odpowiednio dobrana instalacja fotowoltaiczna z zasobnikami energii może umożliwić całkowite pokrycie zużycia energii elektrycznej w PME.

Byłem również, ekspertem merytorycznym podczas „II Zabrzańskiego Seminarium Ekologicznego" pod tytułem: „Efektywność energetyczna obiektów użyteczności publicznej" w dniu 25.10.2013 r. oraz „III Zabrzańskiego Seminarium Ekologicznego" pod tytułem: „Efektywność energetyczna budynków mieszkalnych" w dniu 29.11.2013 r. Seminaria te odbyły się w Zabytkowej Kopalni Węgla Kamiennego Guido w Zabrzu, a realizowane były w ramach projektu „Od paliw kopalnych do energii odnawialnej" współfinansowanego ze środków WFOŚiGW w Katowicach. Efektem tej pracy jest również komunikat w pracy [D9].

W 2014 roku współpracowałem z Katedrą i Zakładem Fizjologii Śląskiego Uniwersytetu Medycznego. W ramach tej współpracy opracowałem i przetestowałem oświetlacz

światłowodowy do zastosowań w badaniach nad udarem niedokrwiennym mózgu. Oświetlacz służy do chwili obecnej jako źródło stymulujące wywołanie udaru niedokrwiennego mózgu u szczurów w warunkach laboratoryjnych. Z wykorzystaniem tego rozwiązania zostały zrealizowane prace statutowe Katedry i Zakładu Fizjologii Śląskiego Uniwersytetu Medycznego o symbolach i tytułach: KNW-2-072/D/6/N, praca p.t.: „Badanie wpływu hamowania szlaku mTOR na przeżywalność komórek nerwowych po udarze niedokrwiennym mózgu u szczurów"; KNW-1-056/K/8/O, praca p.t.: „Badanie wpływu rapamycyny na odległe deficyty neurologiczne w zwierzęcym modelu udaru niedokrwiennego" oraz praca p.t.: „Rola białka HuR w udarze niedokrwiennym szczurów".

podpis Wnioskodawcy

Kamil Banaszek