

doi:10.15199/48.2017.06.20

## Analiza częstotliwościowa pracy polarymetrycznego czujnika natężenia prądu z cewką pomiarową wykonaną ze światłowodu telekomunikacyjnego nieodpornego na zginanie

**Streszczenie.** W pracy krótko scharakteryzowano ideę pomiaru natężenia prądu przy użyciu czujnika polarymetrycznego ze światłowodową cewką pomiarową. Zaprezentowano definicję oraz podstawowe właściwości dyskretnego przekształcenia Fouriera. Omówiono technikę wyznaczania wartości poszczególnych harmonicznych sygnału na wejściu i wyjściu polarymetrycznego czujnika natężenia prądu. Wyznaczono wartości błędów pomiaru oraz współczynnika zawartości harmonicznych – THD, a następnie sformułowano ogólne wnioski dotyczące wprowadzania zniekształceń towarzyszących procesowi przetwarzania realizowanemu w polarymetrycznym czujniku natężenia prądu. Dodatkowo określono wpływ stężenia molowego domieszki GeO<sub>2</sub> w rdzeniu światłowodu (na przykładzie trzech standardów jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych wg ITU-T G.652, G.653 i G.655) oraz wpływ liczby zwojów pomiarowej cewki światłowodowej na zniekształcenia towarzyszące procesowi przetwarzania.

**Abstract.** In this paper briefly characterised the idea of measure of current using polarimetric current sensor with optical fiber coil. It shows the definition and basic properties of the Discrete Fourier Transform. It discusses the technique of determining the value of each harmonic of signal at the input and output polarimetric sensor current. Calculated the value of measurement errors and total harmonic distortion – THD, and formulated a general request for placing a distortion accompanying of processing realized in polarimetric current sensor. In addition, the impact of the molar concentration of the dopant GeO<sub>2</sub> in the core of fiber (for example, three standards of single mode optical fiber ITU-T G.652, G.653 and G.655) and the impact of the number of turns of the measuring coil on the distortion accompanying the process of processing, have been determined.

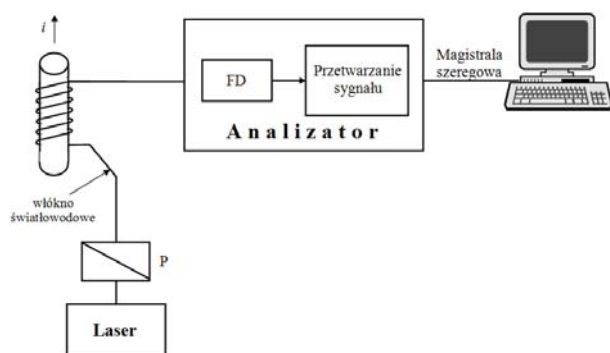
*(Frequency analysis of work of polarimetric current sensor with measurement coil made with the single mode optical fiber not resistant to bending)*

**Słowa kluczowe:** analiza częstotliwościowa, dyskretne przekształcenie Fouriera, polarymetryczny czujnik natężenia prądu, jednomodowy światłowod telekomunikacyjny, błąd pomiaru, współczynnik zawartości harmonicznych – THD

**Keywords:** frequency analysis, Discrete Fourier Transform, polarimetric current sensor, single mode optical fiber, measurement error, total harmonic distortion – THD

### Pomiar natężenia prądu za pomocą czujnika polarymetrycznego

Polarymetryczny czujnik natężenia prądu elektrycznego, którego szczegółową budowę i właściwości wynikające z zastosowanego włókna światłowodowego przedstawiono w pracach [1,2,3,4], określa natężenie prądu płynącego w przewodzie linii elektroenergetycznej w oparciu o następujące parametry: kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, długość fali pomiarowej, stałą Verdetą oraz liczbę zwojów tworzących cewkę światłowodową.



Rys. 1. Schemat blokowy polarymetrycznego czujnika natężenia prądu ze światłowodową cewką pomiarową: P – polaryzator ustalający wstępną i stałą polaryzację, FD – fotodetektor w analizatorze polaryzacji [1]

Światłowod jest ciałem nieaktywnym optycznie. Oznacza to, że w sytuacji, gdy nie działa zewnętrzne pole magnetyczne zmiana nie ulega kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji propagowanego w nim światła. W chwili wystąpienia zewnętrznego pola magnetycznego światłowod staje się aktywny optycznie – zmienia się kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji propagowanego światła (zachodzi magnetoptyczne zjawisko Faradaya – efekt Faradaya) zgodnie ze wzorem [5]:

$$(1) \quad \alpha = V \cdot L \cdot B \quad [\text{rad}]$$

gdzie:  $\alpha$  – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji [rad],  $V$  – stała Verdetą (współczynnik proporcjonalności)  $\left[ \frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$ ,

$L$  – droga, na której światło oddziaływa z polem magnetycznym [m],  $B$  – indukcja pola magnetycznego [T].

Natężenie prądu, w układzie światłowodowego czujnika polarymetrycznego – rys. 1, zależy od następujących czynników: liczby zwojów cewki światłowodowej, dokładności określenia kąta płaszczyzny polaryzacji światła oraz właściwości materiałowych światłowodu. Natężenia płynącego w przewodzie linii elektroenergetycznej prądu można opisać następującą zależnością [1]:

$$(2) \quad I = \frac{\alpha}{\mu_0 \cdot V \cdot N} \quad [\text{A}]$$

gdzie:  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$  – przenikalność

magnetyczna próżni,  $N$  – liczba zwojów cewki światłowodowej.

Wartość prądu  $I$  występująca we wzorze (2) może reprezentować zarówno wartość prądu stałego jak i wartość chwilową, w przypadku prądu zmiennego. Analizator pozwala na pomiary wartości chwilowych przebiegów w funkcji czasu dając w ten sposób wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w funkcji czasu – wartość chwilową kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła.

### Definicja oraz wybrane właściwości dyskretnego przekształcenia Fouriera

Dyskretne przekształcenie Fouriera (ang. Discrete Fourier Transform – DFT) jest procedurą matematyczną do przeprowadzania analizy częstotliwościowej sygnału dyskretnego. W ten sposób można określić zawartość harmoniczną w analizowanym sygnale. Można je zdefiniować jako dyskretny ciąg składowych wyjściowych  $X(m)$  w dziedzinie częstotliwości [6]:

$$(3) \quad X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}} = \\ = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right) - \\ - j \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right)$$

gdzie:  $x(n)$  – dyskretny ciąg wartości w dziedzinie czasu ciągłej zmiennej  $x(t)$ ,  $j = \sqrt{-1}$  – jednostka urojona,  $n$  – indeks próbki wejściowej w dziedzinie czasu ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ ),  $m$  – indeks próbek wyjściowych DFT w dziedzinie częstotliwości ( $m = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ ),  $N$  – liczba próbek ciągu wejściowego oraz liczba punktów w ciągu wyjściowym DFT.

Wartości częstotliwości  $N$  kolejnych punktów na osi częstotliwości, w których są wyznaczane prążki DFT, można określić jako [6]:

$$(4) \quad f_{analysis}(m) = \frac{m \cdot f_s}{N} \text{ [Hz]}$$

gdzie:  $f_s$  – szybkość próbkowania z jaką był próbkowany sygnał oryginalny – ciągły.

Dyskretne przekształcenie Fouriera charakteryzuje się **symetrią**. Oznacza to, że jeżeli wyznacza się  $N$  – punktową DFT rzeczywistego ciągu wejściowego, to otrzymuje się  $N$  oddzielnych zespolonych wartości wyjściowych DFT, z których jedynie pierwszych  $\frac{N}{2}$  jest niezależnych. Zatem

aby otrzymać DFT sygnału  $x(n)$ , wystarczy wyliczyć  $\frac{N}{2}$

wartości  $X(m)$ , gdzie  $0 \leq m \leq \frac{N}{2} - 1$  [6]. Wartości

wyjściowe od  $X\left(\frac{N}{2}\right)$  do  $X(N-1)$  DFT nie zawierają

żadnej dodatkowej informacji o widmie rzeczywistego ciągu  $x(n)$  [6]. Dodatkowo można dostrzec następującą zależność [6]:

$$(5) \quad X(N-m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{j \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}} = \\ = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right) + \\ + j \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right)$$

Analizując wzór (5) można zauważyć, że składowa  $X(N-m)$  różni się jedynie co do znaku części urojonej w stosunku do wzoru (3) określającego składową  $X(m)$  – są to składowe sprzężone. Oznacza to, że co do modułu, składowe te są sobie równe, a różnią się jedynie fazą.

Drugą bardzo ważną właściwością DFT jest **liniowość**, która mówi, że DFT sumy sygnałów jest równa sumie transformacji każdego z sygnałów [6]. Dzięki tej właściwości można poddawać analizie skomplikowane sygnały będące sumą sygnałów sinusoidalnych – przebiegi okresowe odkształcone, a nie tylko sygnał będący pojedynczym przebiegiem sinusoidalnym.

Po wyznaczeniu wartości składowych DFT, można na ich podstawie określić amplitudy oraz prawdziwe wartości skuteczne składowych harmonicznym sygnału poddawanego analizie częstotliwościowej. Jeżeli przebieg wejściowy zawierał składową stałą, to jej wartość będzie opisana wzorem [6]:

$$(6) \quad X_0 = \frac{X(0)}{N}$$

gdzie:  $X(0)$  – amplituda wyjściowej składowej stałej DFT. Natomiast amplitudy składowych sinusoidalnych przebiegu wejściowego będą opisane zależnością [6]:

$$(7) \quad X_m = \frac{2 \cdot X(m)}{N \cdot \sqrt{2}}$$

gdzie:  $X(m)$  – amplituda wyjściowa prążków wyjściowych DFT,  $m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} - 1$ .

Warto zaznaczyć, na podstawie symetrii DFT, że wyznaczając  $N$  – punktową DFT sygnału wejściowego uzyskujemy jedynie informacje o  $\frac{N}{2}$  składowych

o indeksach od 0 do  $\frac{N}{2} - 1$ , gdzie indeks 0 odpowiada

składowej stałej, a indeksy od 1 do  $\frac{N}{2} - 1$  odpowiadają poszczególnym składowym sinusoidalnym.

Wobec powyższego prawdziwa wartość skuteczna (ang. True RMS) sygnału poddawanego DFT, zgodnie z twierdzeniem Parsewala, będzie opisana wzorem [7]:

$$(8) \quad X_{RMS} = \sqrt{X_0^2 + \sum_{m=1}^{\frac{N}{2}-1} X_m^2}$$

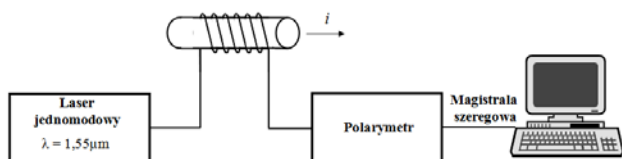
Analizując uzyskane z DFT wyniki warto wyznaczyć współczynnik zawartości harmonicznym (ang. Total Harmonic Distortion – THD), który jest zdefiniowany następująco [7]:

$$(9) \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^{\frac{N}{2}-1} X_m^2}}{X_1} \cdot 100\%$$

gdzie:  $X_1$  – harmoniczna o indeksie 1, tak zwana podstawowa harmoniczna.

## Analiza częstotliwościowa okresowego sygnału wyjściowego z polarymetrycznego czujnika natężenia prądu

Rozpatrywane podczas eksperymentu czujniki zbudowane były ze: **źródła światła**, którym był jednomodowy laser firmy EXFO model FLS-2600 o liniowej polaryzacji światła i o regulowanym względnym poziomie mocy od 0,0 dBm do 6,0 dBm z krokiem 0,1 dBm mający możliwość wyboru długości fali świetlnej z przedziału od 1518,00 nm do 1568,00 nm z krokiem 0,01 nm (w czasie pomiarów wykorzystywano falę świetlną o długości 1550,00 nm przy względnym poziomie mocy lasera równym 4,0 dBm), o złączach FC/PC, **jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych** standardów wg ITU-T G.652, G.653 i G.655, **polarymetru światłowodowego** firmy Agilent model 8509B bez wewnętrznego źródła światła laserowego, o złączach FC/PC [8], **komputera klasy PC** ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym rejestrację wartości chwilowych kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła. Schemat układu pomiarowego przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego i polarymetrycznego czujnika natężenia prądu ze światłowodową cewką pomiarową

Przed rozpoczęciem pomiarów, gdy wartość mierzonego prądu wynosiła 0 A, skalibrowano polarymetr, aby na jego wejściu była maksymalna moc (największa widzialność w układzie optycznym) światła spolaryzowanego liniowo.

Dodatkowo na badanym przewodzie z prądem, w celu pomiaru prawdziwej wartości skutecznej natężenia prądu, umieszczone zostały **cegi prądowe** firmy HEME model PR1030 oraz **cewka Rogowskiego** firmy FLUKE model i2000 FLEX. Obydwa mierniki były podłączone do dwóch identycznych **multimetrów cyfrowych** firmy EnergyLab model EM5512 mierzących prawdziwą wartość skuteczną. Przy braku prądu w badanym przewodzie dokonano kalibracji cęgów prądowych.

Do badań zostało przygotowanych 6 cewek pomiarowych wykonanych z jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów (po dwie na każdy standard światłowodu telekomunikacyjnego, jedna 40 – zwojowa, a druga 80 – zwojowa, zwój miał promień 15 mm). Pomiarzy wykonano dla trzech wartości skutecznych natężenia prądu w badanym przewodzie – 100 A, 300 A, 500 A.

Pomiar wartości chwilowych kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła przeprowadzono za pomocą polarymetru. Ustawiono 20 próbek na okres badanego przebiegu prądu, który wynosił 20 ms (rozpatrywano przebieg sinusoidalny o częstotliwości sieciowej). Wartości chwilowe, zmierzonego za pomocą polarymetru, kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła zostały zamieszczone w tabeli 1 (dla G.652), tabeli 2 (dla G.653) i tabeli 3 (dla G.655).

Przed przystąpieniem do analizy sygnału wyjściowego z czujnika polarymetrycznego z wykorzystaniem DFT, dokonano przeliczenia wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła zgodnie z zależnością (2), przyjmując stałe Verdetta światłowodów z prac [1,3], które

w III oknie optycznym wynoszą:  $5,4579 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$

(dla G.652),  $5,4642 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$  (dla G.653)

i  $5,4437 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$  dla G.655. Przebiegi czasowe sygnałów

poddawanych analizie częstotliwościowej zostały przedstawione na rysunkach od 3 do 5.

Tabela 1. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.652, w zależności od liczby zwojów oraz wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie

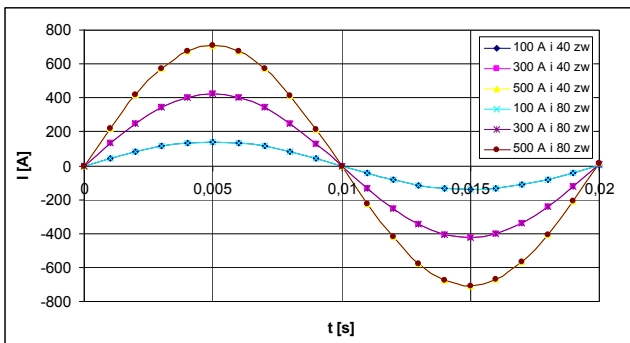
Chwila czasowa $t$ [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym G.652 (3,1 M%) [°]					
	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	100 A	300 A	500 A	100 A	300 A	500 A
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	0,69	2,06	3,44	1,37	4,12	6,87
0,002	1,31	3,92	6,54	2,61	7,84	13,07
0,003	1,80	5,40	9,00	3,60	10,80	17,99
0,004	2,12	6,35	10,58	4,23	12,69	21,15
0,005	2,22	6,67	11,12	4,45	13,34	22,24
0,006	2,11	6,34	10,57	4,23	12,69	21,14
0,007	1,80	5,39	8,98	3,59	10,78	17,97
0,008	1,30	3,91	6,51	2,60	7,81	13,02
0,009	0,68	2,04	3,40	1,36	4,08	6,80
0,010	-0,01	-0,03	-0,05	-0,02	-0,06	-0,10
0,011	-0,70	-2,10	-3,50	-1,40	-4,20	-7,00
0,012	-1,32	-3,96	-6,60	-2,64	-7,92	-13,20
0,013	-1,81	-5,43	-9,05	-3,62	-10,86	-18,10
0,014	-2,12	-6,37	-10,61	-4,24	-12,73	-21,22
0,015	-2,22	-6,67	-11,12	-4,45	-13,34	-22,24
0,016	-2,11	-6,32	-10,53	-4,21	-12,63	-21,06
0,017	-1,78	-5,34	-8,89	-3,56	-10,67	-17,79
0,018	-1,28	-3,83	-6,38	-2,55	-7,65	-12,76
0,019	-0,65	-1,94	-3,23	-1,29	-3,87	-6,46
0,020	0,05	0,15	0,24	0,10	0,29	0,49

Tabela 2. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.653, w zależności od liczby zwojów oraz wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie

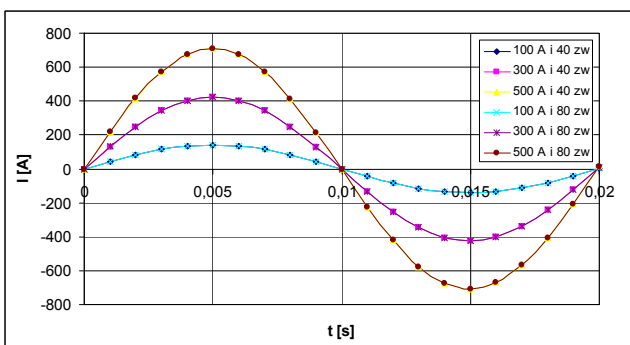
Chwila czasowa $t$ [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym G.653 (7,9 M%) [°]					
	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	100 A	300 A	500 A	100 A	300 A	500 A
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	0,69	2,06	3,44	1,38	4,13	6,88
0,002	1,31	3,93	6,54	2,62	7,85	13,09
0,003	1,80	5,40	9,01	3,60	10,81	18,02
0,004	2,12	6,35	10,59	4,24	12,71	21,18
0,005	2,23	6,68	11,13	4,45	13,36	22,27
0,006	2,12	6,35	10,58	4,23	12,70	21,17
0,007	1,80	5,40	8,99	3,60	10,79	17,99
0,008	1,30	3,91	6,52	2,61	7,82	13,04
0,009	0,68	2,04	3,40	1,36	4,08	6,80
0,010	-0,01	-0,03	-0,05	-0,02	-0,06	-0,10
0,011	-0,70	-2,10	-3,50	-1,40	-4,20	-7,00
0,012	-1,32	-3,96	-6,61	-2,64	-7,93	-13,22
0,013	-1,81	-5,44	-9,06	-3,63	-10,88	-18,13
0,014	-2,12	-6,37	-10,62	-4,25	-12,75	-21,25
0,015	-2,23	-6,68	-11,13	-4,45	-13,36	-22,27
0,016	-2,11	-6,32	-10,54	-4,22	-12,65	-21,08
0,017	-1,78	-5,34	-8,90	-3,56	-10,69	-17,81
0,018	-1,28	-3,83	-6,39	-2,55	-7,66	-12,77
0,019	-0,65	-1,94	-3,23	-1,29	-3,88	-6,46
0,020	0,05	0,15	0,24	0,10	0,29	0,49

Tabela 3. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.655, w zależności od liczby zwojów oraz wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie

Chwila czasowa t [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym G.655 (5,8 M%) [°]					
	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	100 A	300 A	500 A	100 A	300 A	500 A
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	0,69	2,06	3,43	1,37	4,11	6,85
0,002	1,30	3,91	6,52	2,61	7,82	13,04
0,003	1,79	5,38	8,97	3,59	10,77	17,95
0,004	2,11	6,33	10,55	4,22	12,66	21,10
0,005	2,22	6,65	11,09	4,44	13,31	22,18
0,006	2,11	6,33	10,54	4,22	12,65	21,09
0,007	1,79	5,38	8,96	3,58	10,75	17,92
0,008	1,30	3,90	6,49	2,60	7,79	12,99
0,009	0,68	2,03	3,39	1,36	4,07	6,78
0,010	-0,01	-0,03	-0,05	-0,02	-0,06	-0,10
0,011	-0,70	-2,09	-3,49	-1,40	-4,19	-6,98
0,012	-1,32	-3,95	-6,58	-2,63	-7,90	-13,17
0,013	-1,81	-5,42	-9,03	-3,61	-10,83	-18,06
0,014	-2,12	-6,35	-10,58	-4,23	-12,70	-21,17
0,015	-2,22	-6,65	-11,09	-4,44	-13,31	-22,18
0,016	-2,10	-6,30	-10,50	-4,20	-12,60	-21,00
0,017	-1,77	-5,32	-8,87	-3,55	-10,65	-17,74
0,018	-1,27	-3,82	-6,36	-2,54	-7,63	-12,72
0,019	-0,64	-1,93	-3,22	-1,29	-3,86	-6,44
0,020	0,05	0,15	0,24	0,10	0,29	0,49



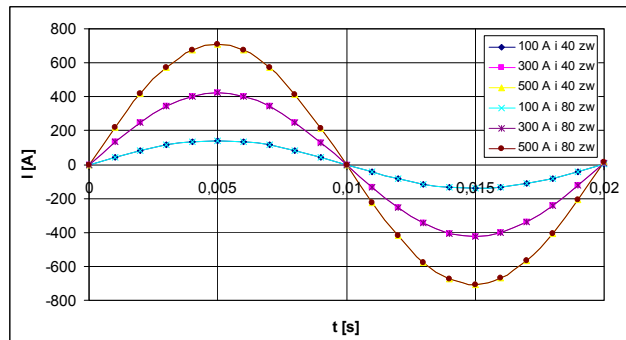
Rys. 3. Przebieg czasowy sygnału na wyjściu czujnika polarymetrycznego z cewką pomiarową wykonaną z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.652, w zależności od liczby zwojów oraz wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie



Rys. 4. Przebieg czasowy sygnału na wyjściu czujnika polarymetrycznego z cewką pomiarową wykonaną z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.653, w zależności od liczby zwojów oraz wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie

Ostatnim etapem analizy uzyskanych wyników było wyznaczenie 20-punktowej DFT, prawdziwej wartości skutecznej i współczynnika zawartości harmoniczných – THD, w zależności od liczby zwojów cewki, standardu włókna światłowodowego oraz prawdziwej wartości

skutecznej natężenia prądu w przewodzie. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w tablicach od 4 do 6.



Rys. 5. Przebieg czasowy sygnału na wyjściu czujnika polarymetrycznego z cewką pomiarową wykonaną z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.655, w zależności od liczby zwojów oraz wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie

Tabela 4. Wartości m-tej składowej wyjściowej DFT dla mierzonego prądu o wartości skutecznej 100 A, w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej wraz z THD

Indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości - m	Moduł m-tej składowej wyjściowej DFT [A]					
	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	G.652	G.653	G.655	G.652	G.653	G.655
0	1,909	2,542	1,914	1,909	2,542	2,551
1	1413,025	1413,023	1413,031	1412,025	1412,028	1413,025
2	5,141	5,495	8,159	6,367	6,654	6,395
3	2,438	3,912	4,001	4,037	3,573	3,673
4	2,734	2,108	2,266	2,832	2,710	3,045
5	2,294	2,009	1,427	2,249	2,291	1,860
6	1,044	1,141	1,951	1,915	1,968	2,277
7	1,805	1,569	1,704	1,496	1,738	1,447
8	1,964	2,108	2,055	1,677	1,748	1,490
9	1,343	1,344	2,187	1,444	1,713	1,440
10	1,909	1,271	1,914	1,272	1,271	0,638
11	1,343	1,344	2,187	1,444	1,713	1,440
12	1,964	2,108	2,055	1,677	1,748	1,490
13	1,805	1,569	1,704	1,496	1,738	1,447
14	1,044	1,141	1,951	1,915	1,968	2,277
15	2,294	2,009	1,427	2,249	2,291	1,860
16	2,734	2,108	2,266	2,832	2,710	3,045
17	2,438	3,912	4,001	4,037	3,573	3,673
18	5,141	5,495	8,159	6,367	6,654	6,395
19	1413,025	1413,023	1413,031	1412,025	1412,028	1413,025
<b>Prawdziwa wartość skuteczna [A]</b>	99,917	99,918	99,919	99,847	99,848	99,918
<b>THD [%]</b>	0,53	0,57	0,73	0,64	0,64	0,63

Tabela 5. Wartości m-tej składowej wyjściowej DFT dla mierzonego prądu o wartości skutecznej 300 A, w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej wraz z THD

Indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości - m	Moduł m-tej składowej wyjściowej DFT [A]					
	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	G.652	G.653	G.655	G.652	G.653	G.655
0	5,726	6,990	7,016	6,998	6,037	6,378
1	4238,073	4236,075	4237,076	4237,078	4238,079	4237,078
2	18,898	19,828	20,156	19,733	19,185	19,320
3	10,364	10,879	10,129	10,864	11,181	11,065
4	8,456	7,131	6,571	8,006	7,536	8,392
5	6,001	6,755	6,900	6,762	6,550	6,331
6	5,347	5,733	4,917	5,589	5,429	5,768
7	4,984	5,232	5,026	4,639	4,895	5,250
8	4,038	4,966	5,177	4,715	4,597	4,540
9	4,542	4,014	5,473	4,566	4,443	4,256
10	4,453	3,177	4,465	4,453	4,130	4,465
11	4,542	4,014	5,473	4,566	4,443	4,256
12	4,038	4,966	5,177	4,715	4,597	4,540
13	4,984	5,232	5,026	4,639	4,895	5,250
14	5,347	5,733	4,917	5,589	5,429	5,768
15	6,001	6,755	6,900	6,762	6,550	6,331
16	8,456	7,131	6,571	8,006	7,536	8,392
17	10,364	10,879	10,129	10,864	11,181	11,065
18	18,898	19,828	20,156	19,733	19,185	19,320
19	4238,073	4236,075	4237,076	4237,078	4238,079	4237,078
<b>Prawdziwa wartość skuteczna [A]</b>	299,683	299,542	299,613	299,613	299,683	299,613
<b>THD [%]</b>	0,61	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63

Tabela 6. Wartości m-tej składowej wyjściowej DFT dla mierzonego prądu o wartości skutecznej 500 A, w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej wraz z THD

Indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości - m	Moduł m-tej składowej wyjściowej DFT [A]					
	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	G.652	G.653	G.655	G.652	G.653	G.655
0	11,451	10,803	10,843	10,179	11,120	10,843
1	7062,133	7061,129	7061,131	7062,125	7063,131	7063,130
2	31,290	31,840	31,992	32,265	32,537	32,826
3	17,675	17,752	17,886	17,626	18,402	17,963
4	13,245	13,320	12,704	13,092	12,741	13,102
5	9,897	10,422	10,383	10,356	11,066	10,862
6	8,862	8,219	9,050	9,015	9,076	9,235
7	8,041	8,283	8,453	8,384	8,682	8,188
8	7,779	7,748	8,226	7,486	7,632	7,476
9	7,860	8,399	7,349	7,241	7,558	7,359
10	7,634	8,261	7,016	7,634	7,308	7,016
11	7,860	8,399	7,349	7,241	7,558	7,359
12	7,779	7,748	8,226	7,486	7,632	7,476
13	8,041	8,283	8,453	8,384	8,682	8,188
14	8,862	8,219	9,050	9,015	9,076	9,235
15	9,897	10,422	10,383	10,356	11,066	10,862
16	13,245	13,320	12,704	13,092	12,741	13,102
17	17,675	17,752	17,886	17,626	18,402	17,963
18	31,290	31,840	31,992	32,265	32,537	32,826
19	7062,133	7061,129	7061,131	7062,125	7063,131	7063,130
<b>Prawdziwa wartość skuteczna [A]</b>	499,378	499,307	499,307	499,378	499,449	499,449
<b>THD [%]</b>	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63	0,63

### Analiza częstotliwościowa okresowego sygnału wejściowego poddawanego procesowi przetwarzania w polarymetrycznym czujniku natężenia prądu

Polarymetryczny czujnik natężenia prądu jest przetwornikiem prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła ( $I - \alpha$ ), który posiada strukturę łańcuchową [4]. Jego tor pomiarowy (ciąg przetwarzania), przedstawiony na rys. 6., nie jest rozgałęziony (nie ma w nim węzłów sumacyjnych, a wszystkie procesy przetwarzania zachodzą tylko w jednym kierunku – od wejścia do wyjścia układu pomiarowego).

W celu określenia, czy przetwornik ten wprowadza zniekształcenia, poza przebadaniem sygnału wyjściowego należało przebadać sygnał podawany na jego wejście (sygnał przetwarzany).

Badanie sygnału wejściowego polegało na poddaniu go analizie fourierowskiej. W tym celu wykorzystano układ pomiarowy z rys. 2., a w nim cęgi prądowe firmy HEME model PR1030 podłączono do oscyloskopu cyfrowego firmy RIGOL model DS1000B, za pomocą którego uzyskano 600 próbek na okres badanego sygnału. Pomiar przeprowadzono dla trzech przebiegów wejściowych o założonych prawdziwych wartościach skutecznych 100 A, 300 A i 500 A.



Rys. 6. Tor pomiarowy (ciąg przetwarzania) o strukturze łańcuchowej dla polarymetrycznego czujnika natężenia prądu ze światłowodową cewką pomiarową (Obiekt – przewód fazowy linii elektroenergetycznej, Czujnik – włókno światłowodowe, Przetwarzanie – polarymetr, Rejestracja – komputer klasy PC, Obserwator – osoba wykonująca pomiar, Układy EAZ – Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej, Układy SSiN – Systemu sterowania i Nadzoru)

Liczbę próbek, dla każdego z analizowanych przebiegów, ograniczono do 20. Próbkę wybrano dla konkretnych chwil czasowych, które odpowiadały próbkowaniu prowadzonemu przez analizator będący elementem składowym polarymetru światłowodowego. Następnie, zgodnie ze wzorem (3) wyznaczono reprezentacje zespolone harmonicznych przebiegu

wejściowego, a na ich podstawie oraz wzorów (6) i (7) wyznaczono składową stałą oraz amplitudy poszczególnych składowych harmonicznych. Dysponując uzyskanymi wynikami obliczeń oraz wzorem (8) wyznaczono prawdziwą wartość skuteczną dla analizowanego przebiegu, a na podstawie wzoru (9) jego THD. Uzyskane wyniki zostały zawarte w tabeli 7.

Tabela 7. Wartości m-tej składowej wejściowej DFT wraz THD

Indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości - m	Moduł m-tej składowej w3jściowej DFT [A]		
	Cewka 40 – zwojowa		
	100 A	300 A	500 A
0	19,176	19,733	49,796
1	4842,544	44687,718	124881,484
2	0,674	0,881	2,940
3	1,396	10,674	15,731
4	0,184	0,221	1,583
5	0,517	2,434	0,248
6	1,509	0,336	1,276
7	0,348	0,422	0,379
8	0,505	2,943	2,137
9	1,675	1,015	10,121
10	0,230	0,000	0,248
11	1,675	1,015	10,121
12	0,505	2,943	2,137
13	0,348	0,422	0,379
14	1,509	0,336	1,276
15	0,517	2,434	0,248
16	0,184	0,221	1,583
17	1,396	10,674	15,731
18	0,674	0,881	2,940
19	4842,544	44687,718	124881,484
<b>Prawdziwa wartość skuteczna [A]</b>	100,333	299,671	502,306
<b>THD [%]</b>	0,06	0,03	0,02

Tabela 8. Wartości błędu bezwzględnego i względnego, w zależności od liczby zwojów dla czujnika polarymetrycznego z cewką pomiarową wykonaną z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.652

	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	<b>Prawdziwa wartość skuteczna przebiegu wyjściowego <math>I_{wy}</math> [A]</b>	99,917	299,683	499,378	99,847	299,613
<b>Prawdziwa wartość skuteczna przebiegu wejściowego <math>I_{we}</math> [A]</b>	100,333	299,671	502,306	100,333	299,671	502,306
<b>Błąd bezwzględny <math>\Delta I</math> [A]</b>	-0,416	0,012	-2,928	-0,486	-0,058	-2,928
<b>Błąd względny <math>\delta</math>, [%]</b>	-0,4	0,0	-0,6	-0,5	0,0	-0,6

Tabela 9. Wartości błędu bezwzględnego i względnego, w zależności od liczby zwojów dla czujnika polarymetrycznego z cewką pomiarową wykonaną z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.653

	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
	<b>Prawdziwa wartość skuteczna przebiegu wyjściowego <math>I_{wy}</math> [A]</b>	99,918	299,542	499,307	99,848	299,683
<b>Prawdziwa wartość skuteczna przebiegu wejściowego <math>I_{we}</math> [A]</b>	100,333	299,671	502,306	100,333	299,671	502,306
<b>Błąd bezwzględny <math>\Delta I</math> [A]</b>	-0,415	-0,129	-2,999	-0,485	0,012	-2,857
<b>Błąd względny <math>\delta</math>, [%]</b>	-0,4	0,0	-0,6	-0,5	0,0	-0,6

### Wnioski

W celu określenia wpływu rozpatrywanego czujnika polarymetrycznego (przetwornika prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła) na właściwości

częstotliwościowe przebiegu na jego wyjściu, należy posłużyć się klasyczną teorią błędów pomiarowych, gdzie jako wartości prawdziwe przyjmuje się wyniki uzyskane podczas analizy częstotliwościowej przebiegu wejściowego. Takie założenie jest prawdziwe, świadczą o tym wartości THD przebiegu podawanego na wejście przetwornika. Błędy pomiarowe wyznaczono na podstawie wzorów [9]:

$$(10) \quad \Delta I = I_{wy} - I_{we} \quad [A]$$

$$(11) \quad \delta_I = \frac{\Delta I}{I_{wy}} \cdot 100\%$$

gdzie:  $I_{wy}$  – prawdziwa wartość skuteczna prądu na wyjściu czujnika polarymetrycznego [A],  $I_{we}$  – prawdziwa wartość skuteczna prądu na wejściu czujnika polarymetrycznego [A].

Korzystając z wyników zawartych w tablicach od 4 do 7, określono wartości błędu bezwzględnego i względnego, w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej. Uzyskane wyniki zawarto w tablicy 8 (dla G.652), tablicy 9 (dla G.653) oraz tablicy 10 (dla G.655).

Tabela 10. Wartości błędu bezwzględnego i względnego, w zależności od liczby zwojów dla czujnika polarymetrycznego z cewką pomiarową wykonaną z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.655

Prawdziwa wartość skuteczna przebiegu wyjściowego $I_{wy}$ [A]	Cewka 40 – zwojowa			Cewka 80 – zwojowa		
		99,919	299,613	499,307	99,918	299,613
Prawdziwa wartość skuteczna przebiegu wejściowego $I_{we}$ [A]	100,333	299,671	502,306	100,333	299,671	502,306
Błąd bezwzględny $\Delta I$ [A]	-0,414	-0,058	-2,999	-0,415	-0,058	-2,857
Błąd względny $\delta_I$ [%]	-0,4	0,0	-0,6	-0,4	0,0	-0,6

Przeprowadzona analiza częstotliwościowa wykazała, że rozpatrywany przetwornik światłowodowy nie wprowadza znaczących zniekształceń, o czym świadczy wartość współczynnika zawartości harmonicznych sygnału jego wyjściu. Na podstawie uzyskanych wyników można określić przedział, w jakim zawiera się THD, tj., od 0,53% do 0,73%. Minimalne wartości THD towarzyszy światłowodowi standardowemu – G.652, a maksymalna światłowodowi o profilu korony – G.655.

Stężenie molowe domieszki  $GeO_2$  w rdzeniu światłowodu (standard wykorzystanego jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego) oraz liczba zwojów cewki światłowodowej nie wpływają znacząco na wartość błędu względnego pomiaru natężenia prądu za pomocą

rozpatrywanego przetwornika światłowodowego  $I - \alpha$ . Błąd względny przetwarzania zawiera się w przedziale od -0,6% do 0,0%. Są to bardzo małe wartości, a przede wszystkim graniczne, czyli takie, które nie przekraczają klasy przyrządu. Na podstawie wartości względnego błędu granicznego (tablice od 8 do 10.) oraz normy IEC 44-1 [10] dotyczącej podstawowych parametrów przekładników prądowych, rozpatrywany polarymetryczny czujnik natężenia prądu można zakwalifikować do grupy przekładników pomiarowych, których klasa zależy od wartości skutecznej prądu mierzonego oraz standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego wykorzystanego do budowy cewki pomiarowej.

Zaprezentowane wyniki analizy fourierowskiej potwierdziły prawidłowość metody projektowania światłowodów jednomodowych oraz określania ich właściwości materiałowych, zawartych w pracach [1,2,3,4]. Świadczą o tym uzyskane wyniki prawdziwej wartości skutecznej prądu zmierzonego pośrednio, z wykorzystaniem przetwornika światłowodowego, które pokrywają się z wynikami zmierzonymi za pomocą cęgów prądowych i cewki Rogowskiego.

**Autorzy:** dr inż. Sławomir Andrzej Torbus, Politechnika Warszawska Filia w Plocku, Łukasiewicza 17, 09-400 Plock, E-mail: [storbus@pw.plock.pl](mailto:storbus@pw.plock.pl)

#### LITERATURA

- [1] Torbus S. A., Ratuszek M., The selection method of the single mode telecommunication fiber to the interferometric current sensor depending on the destination areas, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2010*, Wilga (24 – 30 May 2010), Proc. of SPIE, 0277-786X, Vol. 7745, 7745-81
- [2] Torbus S. A., Using G.652 telecommunication single-mode optical fibre for a measurement coil of the interferometric current sensor, *Zeszyty naukowe nr 257 – Elektrotechnika 15*, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy (2010)
- [3] Torbus S. A., Zastosowanie światłowodów telekomunikacyjnych G.652, G.653 i G.655 w polarymetrycznych czujnikach natężenia prądu, *Pomiary Automatyka Kontrola nr 5/2011*
- [4] Torbus S. A., Dutkiewicz P., Badanie i analiza charakterystyk statycznych polarymetrycznego przetwornika prąd – kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6/2014
- [5] Romaniuk R., Szkło nieliniowe dla fotoniki. Część 5. Szkła Verdetta – Faradaya, *Elektronika*, nr 10/2008
- [6] Lyons R. G., Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, *WKŁ*, Warszawa 2003
- [7] Zieliński T. P., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań, *WKŁ*, Warszawa 2007
- [8] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/08509-90016.pdf>
- [9] Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A., *Metrologia elektryczna, WNT*, Warszawa 2000
- [10] Norma IEC 44-1, Podstawowe parametry przekładników prądowych