

Badanie i analiza charakterystyk statycznych polarymetrycznego przetwornika prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła

Streszczenie. W pracy krótko scharakteryzowano polarymetryczny przetwornik prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła ($I - \alpha$) oraz wpływ długości fali świetlnej i temperatury na stałą Verdetą, która jest współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy wymuszeniem magnetycznym i reakcją materiału – krzemionki SiO_2 domieszkowanej GeO_2 , z której wykonany jest rdzeń światłowodu. Zdefiniowano charakterystykę statyczną rozpatrywanego przetwornika oraz wynikającą z niej czułość statyczną. Wyznaczono charakterystykę statyczną przetwornika idealnego i rzeczywistego, a na ich podstawie określono czułość statyczną przetwornika idealnego i rzeczywistego oraz błędy statyczne przetwornika rzeczywistego. Sformułowano ogólne wnioski dotyczące właściwości metrologicznych polarymetrycznych przetworników $I - \alpha$, do budowy których wykorzystuje się jednomodowe światłowody telekomunikacyjne różnych standardów.

Abstract. This article briefly characterizes polarimetric current – angle of rotation of light polarization converter ($I - \alpha$) and the impact of wavelength and temperature for the Verdet constant, which is the coefficient of proportionality between magnetic forcing and response material - silica SiO_2 doped by GeO_2 , of which the fiber core is made. The static characteristic and static sensitivity were defined for this converter. The static characteristic and static sensitivity of the ideal and the actual converter and the static errors of the actual converter have been designated. Have been formulated the general conclusions concerning the metrological characteristics of polarimetric converter $I - \alpha$, whose structures are based of different standards of telecommunication single mode optical fibers. (**Research and analysis of static characteristics of polarimetric current – the angel of rotation of light polarization converter**)

Słowa kluczowe: polarymetryczny przetwornik prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, efekt Faradaya, jednomodowy światłowód telekomunikacyjny, charakterystyka statyczna, czułość statyczna, błąd statyczny

Keywords: polarimetric current – the angle of rotation of light polarization converter, single mode telecommunication fiber, Faraday effect, static characteristic, static sensitivity, static error

doi:10.12915/pe.2014.06.44

Wybrane informacje dotyczące przetwornika

Polarymetryczny przetwornik prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła ($I - \alpha$) opiera swe działanie na magnetooptrycznym zjawisku Faradaya. Jest układem o strukturze łańcuchowej, którego ciąg przetwarzania, przedstawiony na rys. 1., nie jest rozgałęziony (nie ma w nim węzłów sumacyjnych, a wszystkie procesy przetwarzania zachodzą tylko w jednym kierunku – od wejścia do wyjścia układu).



Rys. 1. Ciąg przetwarzania o strukturze łańcuchowej dla polarymetrycznego przetwornika prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła (Obiekt – przewód fazowy linii elektroenergetycznej, Czujnik – włókno światłowodowe, Przetwarzanie – polarymetr, Rejestracja – komputer klasy PC, Obserwator – osoba wykonująca pomiar)

Rozpatrywany przetwornik umożliwia, w sposób pośredni, pomiar wartości chwilowej natężenia prądu elektrycznego. Na podstawie wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji oraz parametrów konstrukcyjnych czujnika można określić wartość natężenia prądu, zgodnie z zależnością [1]:

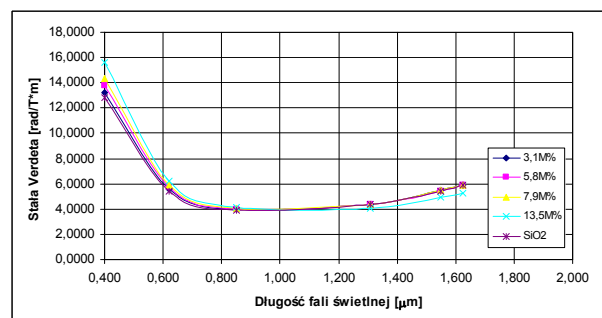
$$(1) \quad I = \frac{\alpha}{\mu_0 \cdot V \cdot N} \text{ [A]}$$

gdzie: α – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji [rad], $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [Vs/Am] – przenikalność magnetyczna próżni, V – stała Verdetą (współczynnik proporcjonalności) [rad/Tm], N – liczba zwojów światłowodowej cewki pomiarowej.

Występująca we wzorze (1) stała Verdetą jest

wielkością empiryczną. Charakteryzuje ona materiał ośrodka jako współczynnik proporcjonalności pomiędzy wymuszeniem magnetycznym i reakcją materiału [2,3]. Rozpatrując typowe szkła tlenkowe – diamagnetyki, z których wykonuje się włókna światłowodowe stosowane w przetwornikach $I - \alpha$, można stwierdzić, że w ich przypadku stała Verdetą jest dodatnia i niewielka [2,3,4]. Dodatkowo dla diamagnetyków zależy ona od [2,3]:

- długości fali świetlnej (mocna zależność) – wraz z jej wzrostem maleje wartość stałej Verdetą, z wyjątkiem obszarów absorpcji, którym towarzyszy anormalna dyspersja, a wartość stałej Verdetą wraz ze wzrostem długości fali rośnie. Zależność wartości stałej Verdetą od długości fali świetlnej i stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu przedstawia rys. 2.,



Rys. 2. Zależność wartości stałej Verdetą od długości fali świetlnej i stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu [4]

- temperatury (słaba zależność) – nie wpływa ona na efekt Faradaya, z wyjątkiem udziału wynikającego z termicznej rozszerzalności szkła, jednak w przedziale temperatury od 12 °C do 90 °C jest ona niezauważalna. Warto dodać, że temperatura mięknienia krzemionki, z której wykonany jest światłowód to około 550 °C [3]. Jeżeli włókno światłowodowe ma temperaturę niższą od tej wartości wówczas fluktuacje wartości współczynnika

załamania są pomijalnie małe, a co za tym idzie zapewniona jest stałość wartości stałej Verdetta [5]. Dodatkowo obniżanie temperatury w diamagnetykach nie wywołuje zmian wartości stałej Verdetta.

Charakterystyka statyczna oraz czułość statyczna przetwornika

Statyczna funkcja przetwarzania, która określa zmianę kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła pod wpływem zmiany natężenia prądu elektrycznego, przetwornika $I - \alpha$ jest opisana zależnością [1]:

$$(2) \quad \alpha = \mu_0 \cdot V \cdot I \cdot N$$

Na jej podstawie można określić czułość statyczną przetwornika $I - \alpha$, która jest rozumiana jako granica stosunku przyrostu wielkości wyjściowej – kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, do wywołującego tę zmianę przyrostu wielkości wejściowej – natężenia prądu elektrycznego, co opisuje następująca zależność:

$$(3) \quad S = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta I} = \frac{\partial \alpha}{\partial I} = \mu_0 \cdot V \cdot N$$

Na podstawie wzoru (2), dysponując wynikami pomiarów, można przyjąć z wystarczającą dokładnością, że czułość statyczna to stosunek skończonych przyrostów odpowiednich wartości:

$$(4) \quad S \approx \frac{\Delta \alpha}{\Delta I}$$

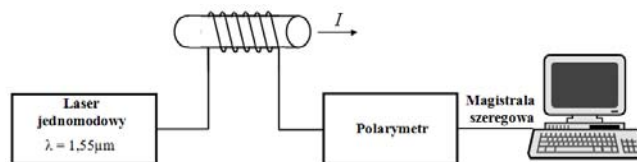
Czułość statyczna jest wielkością mianowaną, a jej wymiar zależy od wielkości wejściowej i wyjściowej przetwornika. W przypadku przetwornika $I - \alpha$, którego wielkością wejściową jest natężenie prądu elektrycznego, a wielkością wyjściową kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, jest ona wyrażona w jednostkach [rad/A] (najczęściej stosowana, ponieważ polarymetry mierzą wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji w radianach) albo [°/A].

Rozpatrywany przetwornik $I - \alpha$ posiada liniową charakterystykę przetwarzania, wobec czego jego czułość statyczna jest stała w całym zakresie pomiarowym.

Wyznaczenie charakterystyki oraz czułości statycznej rzeczywistej i idealnej przetwornika

Strukturę układu pomiarowego (rys. 3.) do wyznaczenia charakterystyk statycznych przetworników tworzyły:

- **źródło 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 [6],
- **jednomodowe światłowody telekomunikacyjne** standardów G.652, G.653, G.655, G.657A i G.657B,
- **polarymetr światłowodowy** firmy Agilent model 8509B bez wewnętrznego źródła światła laserowego, o złączach FC/PC [7],
- **komputer klasy PC** ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym rejestrację wartości chwilowych kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła.



Rys. 3. Poglądowa struktura układu pomiarowego do wyznaczenia charakterystyki statycznej polarymetrycznego przetwornika $I - \alpha$

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

Dodatkowo na przewodzie z prądem, w celu pomiaru natężenia prądu, umieszczone zostały **cegi prądowe** firmy HEME model PR1030, które były podłączone do **multimetru cyfrowego** firmy EnergyLab model EM5512. Przy braku prądu w przewodzie dokonano kalibracji cęgów prądowych.

Do badań zostało przygotowanych 10 cewek pomiarowych wykonanych z jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów (po dwie na każdy standard jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego, jedna 40 – zwojowa, a druga 80 – zwojowa, zwój miał promień 15 mm).

Następnie, na podstawie prac [1,8], w środowisku MathCAD, opracowano model matematyczny przetwornika $I - \alpha$. Dysponując wartościami współczynników załamania w rdzeniach używanych światłowodów, wyznaczono stężenia molowe domieszki GeO_2 oraz wartości stałej Verdetta w tzw. III oknie optycznym (długość fali świetlnej 1550,00 nm). Uzyskane wyniki zostały zawarte w tabeli 1.

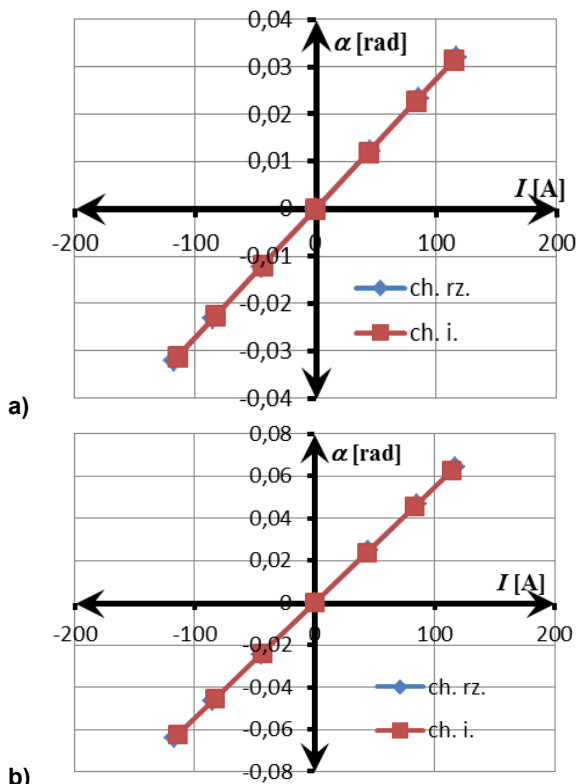
Tabela 1. Stężenie molowe domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz wartość stałej Verdetta w tzw. III oknie optycznym [wyniki własne]

Standard światłowodu wg ITU-T	Wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu – n_1	Stężenie molowe domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu [M%]	Wartość stałej Verdetta $\left[\frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$
G.652	1,4515	4,582	5,4407
G.653	1,4590	9,344	5,4626
G.655	1,4554	7,075	5,4561
G.657A	1,4500	3,617	5,4498
G.657B	1,4490	2,970	5,4606

Na podstawie wartości stałej Verdetta (tabela 1.), parametrów konstrukcyjnych cewki światłowodowej oraz zmian natężenia prądu od -120 A do 120 A, korzystając ze wzoru (2) wyznaczono charakterystyki statyczne idealnego przetwornika.

Przykładowe rzeczywiste oraz idealne charakterystyki statyczne przetwornika $I - \alpha$, dla jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.652 oraz zmiennej liczby zwojów cewki światłowodowej, zostały przedstawione na rys. 4.

Ostatnim etapem było określenie rzeczywistej oraz idealnej czułości statycznej badanego przetwornika $I - \alpha$. W celu określenia rzeczywistej czułości statycznej skorzystano ze wzoru (4), natomiast do określenia idealnej czułości statycznej wykorzystano wzór (3). Uzyskane wyniki zostały zawarte w tabeli 2.



Rys. 4. Rzeczywista (ch. rz.) oraz idealna (ch. i.) charakterystyka statyczna przetwornika $I-\alpha$ dla cewki światłowodowej wykonanej z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.652: a) 40 zwojów, b) 80 zwojów [wyniki własne]

Tabela 2. Rzeczywista i idealna czułość statyczna badanego przetwornika $I-\alpha$ w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej [wyniki własne]

Standard światłowodu wg ITU-T	Czułość statyczna przetwornika $I-\alpha$			
	Cewka światłowodowa 40-zwojowa		Cewka światłowodowa 80-zwojowa	
	Rzeczywista	Idealna	Rzeczywista	Idealna
G.652	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$5,47 \cdot 10^{-4}$	$5,47 \cdot 10^{-4}$
G.653	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$
G.655	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$
G.657A	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$5,48 \cdot 10^{-4}$	$5,48 \cdot 10^{-4}$
G.657B	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$

Błędy statyczne badanego przetwornika

Przez błędy statyczne (błędy przetwarzania) należy rozumieć różnicę między charakterystyką statyczną idealną, a rzeczywistą. Jest to miara dokładności przetwornika w stanach statycznych. Wyróżniamy następujące rodzaje błędów statycznych:

- błąd bezwzględny odniesiony do wejścia przetwornika, który można zdefiniować w następujący sposób:

$$(5) \quad \Delta I = \max\{I_i - I_{rz}\} [A]$$

gdzie: I_i – wartość natężenia prądu elektrycznego odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika idealnego przy ustalonej wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji, I_{rz} – wartość natężenia prądu elektrycznego odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika rzeczywistego przy ustalonej wartości kąta

skręcenia płaszczyzny polaryzacji. Dla badanego przetwornika $I-\alpha$ oraz różnych standardów włókien światłowodowych, wyniki zostały zamieszczone w tabeli 3 i tabeli 4;

- błąd bezwzględny odniesiony do wyjścia przetwornika, który można zdefiniować w następujący sposób:

$$(6) \quad \Delta I = \max\{I_i - I_{rz}\} [A]$$

gdzie: α_i – wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika idealnego przy ustalonej wartości natężenia prądu elektrycznego, α_{rz} – wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika rzeczywistego przy ustalonej wartości natężenia prądu elektrycznego. Dla badanego przetwornika $I-\alpha$ oraz różnych standardów włókien światłowodowych, wyniki zostały zamieszczone w tabeli 3 i tabeli 4;

- błąd nieliniowości, który można zdefiniować w następujący sposób:

$$(7) \quad \delta\alpha = \frac{\max\{\alpha_i - \alpha_{rz}\}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \cdot 100\%$$

gdzie: α_{\max} – maksymalna wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika rzeczywistego, α_{\min} – minimalna wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła jaką może wykryć polarymierz (dla stosowanego polarymetru jest to 0,01 rad). Dla badanego przetwornika $I-\alpha$ oraz różnych standardów włókien światłowodowych, wyniki zostały zamieszczone w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Wartości błędów statycznych badanego przetwornika $I-\alpha$ dla różnych standardów włókien światłowodowych – cewka 40-zwojowa [wyniki własne]

Standard światłowodu wg ITU-T	$\Delta I [A]$	$\Delta\alpha [rad]$	$\delta\alpha [\%]$
G.652	2,77	$7,57 \cdot 10^{-4}$	3,43
G.653	3,50	$9,61 \cdot 10^{-4}$	4,30
G.655	2,16	$5,93 \cdot 10^{-4}$	2,70
G.657A	3,27	$8,96 \cdot 10^{-4}$	4,03
G.657B	3,63	$9,96 \cdot 10^{-4}$	4,44

Tabela 4. Wartości błędów statycznych badanego przetwornika $I-\alpha$ dla różnych standardów włókien światłowodowych – cewka 80-zwojowa [wyniki własne]

Standard Jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego wg ITU-T	$\Delta I [A]$	$\Delta\alpha [rad]$	$\delta\alpha [\%]$
G.652	2,77	$1,51 \cdot 10^{-3}$	2,80
G.653	3,50	$1,92 \cdot 10^{-3}$	3,51
G.655	2,16	$1,19 \cdot 10^{-3}$	2,20
G.657A	3,27	$1,79 \cdot 10^{-3}$	3,29
G.657B	3,63	$1,99 \cdot 10^{-3}$	3,63

Wnioski

Jeżeli przez czułość rozumiemy granicę stosunku przyrostu kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, do wywołującego tę zmianę przyrostu natężenia prądu elektrycznego, wówczas na podstawie danych zawartych w tablicy 2 można wskazać następujące zależności:

▪ liczba zwojów tworzących cewkę światłowodową wpływa na czułość statyczną. Zgodnie ze wzorem (3) proporcjonalnie do liczby zwojów rośnie czułość statyczna, przy zadanym stężeniu molowym domieszki GeO₂ w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej (dla danej wartości stałej Verdetta światłowodu). Potwierdzają to wyniki obliczeń oraz pomiarów zamieszczone w tablicy 2. Dwukrotny wzrost liczby zwojów cewki światłowodowej spowodował dwukrotny wzrost czułości statycznej;

▪ czułość statyczna przetwornika idealnego odpowiada czułości statycznej przetwornika rzeczywistego, co oznacza, że użyta metoda wyznaczania stałej Verdetta, opisana w pracach [1,8], jest prawidłowa, a wyniki obliczeń zamieszczone w tablicy 1 są zgodne z rzeczywistością.

Analizując dane zamieszczone w tablicach 3 i 4 można sformułować wnioski dotyczące błędu nieliniowości:

▪ najmniejszym błędem nieliniowości charakteryzował się przetwornik, w którym cewka wykonana była z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.655, a największą wartość tego błędu można zaobserwować dla jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.657B. Duża wartość błędu nieliniowości w przypadku światłowodu G.657B – odpornego na zginanie z depresyjnym płaszczem [8] może wynikać z jego konstrukcji oraz propagacji światła w światłowodach jednomodowych, gdzie również fragment płaszczka bierze udział w transmisji, ze względu na tzw. cienki rdzeń, którego średnica zawiera się w przedziale od 8 μm do 9 μm [8];

▪ wraz ze wzrostem liczby zwojów cewki światłowodowej maleje błąd nieliniowości, przy zadanym stężeniu molowym domieszki GeO₂ w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej (dla danej wartości stałej Verdetta światłowodu), co oznacza, że charakterystyka statyczna przetwornika

rzeczywistego dąży do charakterystyki statycznej przetwornika idealnego.

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] Romaniuk R., Szkło nieliniowe dla fotoniki. Część 5. Szklą Verdetta – Faradaya, *Elektronika*, nr 10 (2008)
- [3] Szwedowski A., Romaniuk R., Szkło optyczne i foniczne. Właściwości techniczne, *WNT*, Warszawa (2009)
- [4] Torbus S. A., Badanie i analiza właściwości metrologicznych polarymetrycznych czujników natężenia prądu ze światłowodową cewką pomiarową, *Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy*, Bydgoszcz (2012)
- [5] Bohnert K., Gabus P., Nehring J., Brändle H., Temperature and Vibration Insensitive Fiber-Optic Current Sensor, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 20, No. 2, February (2002)
- [6] http://www.artisan-scientific.com/info/Exfo_FLS2600_Manual.pdf
- [7] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/08509-90016.pdf>
- [8] Torbus S. A., Ratuszek M., Zastosowanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 do realizacji cewki pomiarowej polarymetrycznego czujnika natężenia prądu, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4a (2012)

Autorzy: dr inż. Sławomir Andrzej Torbus, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, E-mail: slator@utp.edu.pl; Patryk Dutkiewicz - student, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, E-mail: directx91@o2.pl;