

doi:10.15199/48.2018.05.34

## Zastosowanie praktyczne izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych

**Streszczenie.** W artykule są przedstawione wyniki badań oraz określono możliwości, interpretacje, uwagi praktyczne projektowania obwodów separacji galwanicznej z zastosowaniem nowoczesnych izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych.

**Abstract.** The article presents the results of research, interpretations, practical considerations on design of galvanic separation circuits using modern digital isolators in intrinsically safe applications. Practical limitations, related to use of iCoupler® and ISO technology digital isolators in intrinsically safe applications, were defined. (**Digital isolators in intrinsically safe applications**).

**Słowa kluczowe:** separacja galwaniczna, izolatory cyfrowe, aplikacje iskrobezpieczne, ATEX, iskrobezpieczeństwo, prędkość transmisji, technologia iCoupler®, ISO.

**Keywords:** galvanic separation, digital isolators, intrinsically safe applications, ATEX, intrinsic safety, transmission speed, iCoupler®, ISO technology.

### Wstęp

Wykorzystanie izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych jest uwarunkowane spełnieniem wymagań określonych we właściwych normach:

1. PN-EN 60079-0:2013-03 + A11:2014-03 *Atmosfery wybuchowe -- Część 0: Urządzenia – Podstawowe wymagania* [1]
2. PN-EN 60079-11:2012 *Atmosfery wybuchowe - - Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i"* [2]
3. PN-EN 60079-25:2011 + AC:2014-08 *Atmosfery wybuchowe -- Część 25: Systemy iskrobezpieczne* [3].

Spełnienie wymagań narzuconych w wymienionych normach wiąże się z ograniczeniem poszczególnych parametrów pracy tych elementów do wartości określonych przez producenta, warunkującym ich bezpieczne stosowanie. Karty katalogowe izolatorów cyfrowych typu iCoupler® firmy Analog Devices, oraz typu ISO firmy Texas Instruments zawierają ograniczenia poszczególnych parametrów pracy tych elementów, warunkujące ich bezpieczne stosowanie:

- 1) moc wydzielona w obudowie,
- 2) lub prąd zasilania stron pierwotnej i wtórnej,
- 3) oraz prąd wejścia lub wyjścia izolatora stron pierwotnej i wtórnej.
- 4) napięcie zasilania, napięcie na wejściu, napięcie na wyjściu.

Powyższe warunki stosowania izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych są opisane w artykule [4]. Zastosowanie środków pozwalających spełnić te wymagania w przypadku opisywanych elementów implikuje ich pracę w nietypowych warunkach. Skutkuje to częściową i zależną od stopnia odstępstwa od warunków nominalnych degradacją funkcjonalności (zwłaszcza maksymalnej szybkości pracy). W dostępnej literaturze brakuje porównania rozwiązań, rozpoznania właściwości i parametrów dla aplikacji z wykorzystaniem izolatorów cyfrowych w szybkich interfejsach w urządzeniach/systemach iskrobezpiecznych, natomiast na rynku brakuje izolatorów dedykowanych dla takich aplikacji. Separacja była dotychczas stosowana głównie dla interfejsów zewnętrznych, do przesyłania danych na większe odległości z niezbyt dużymi prędkościami.

W artykule są przedstawione wyniki badań oraz określone są możliwości, warunki, ograniczenia stosowania izolatorów w podstawowych aplikacjach w wykonaniu iskrobezpiecznym [5]. W porównaniu do alternatywnych

rozwiązań separacji galwanicznej sygnałów cyfrowych scalone izolatory pozwalają realizować separację przy stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na energię w stosunku do oferowanych szybkości transmisji i liczby separowanych kanałów.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań określonych dla warunków stosowania w temperaturze otoczenia 40° C [5].

### Opis wykonywanych badań

Przeprowadzono badania izolatorów zrealizowanych w oparciu o technologie:

iCoupler® [6] firmy Analog Devices wykorzystująca sprzężenie indukcyjne,

ISO [7] firmy Texas Instruments wykorzystująca sprzężenie pojemnościowe.

W tabeli 1 są zamieszczone typy izolatorów poddanych badaniom.

Tabela 1. Izolatory cyfrowe poddane badaniom

Typ Interfejsu / Kierunkowość / Liczba wejść / wyjść strony pierwotnej Liczba wejść / wyjść strony wtórnej			Technologia	
			iCoupler®	ISO
I2C	Bi	/2/2 / 2/2	ADuM2250	ISO1540
USB	Bi	/2/2 / 2/2	ADuM4160	-
UART	Uni	/2/2 / 2/2	ADuM141	ISO7841
SPI				
CAN				
-----	Uni	/2/1 / 1/2	ADuM1301	-
-----	Uni	/1/1 / 1/1	ADuM2281	ISO7821F
-----	Uni	/1/0 / 0/1	ADuM1100	ISO721M

Unidirectional – komunikacja jednokierunkowa

Bidirectional – komunikacja dwukierunkowa

Dla celów porównawczych dwa układy: ADuM141 (technologia iCoupler®) i ISO7841 (technologia ISO) zostały przebadane w warunkach możliwie zbliżonych do katalogowych w pełnym zakresie prędkości transmisji. Przebadanie po jednym układzie dla każdej z technologii w warunkach zbliżonych do katalogowych uznano za wystarczająco reprezentatywne dla potrzeb referencyjnych. Pozostałe układy były badane wyłącznie w konfiguracji wraz z układami zabezpieczeń.

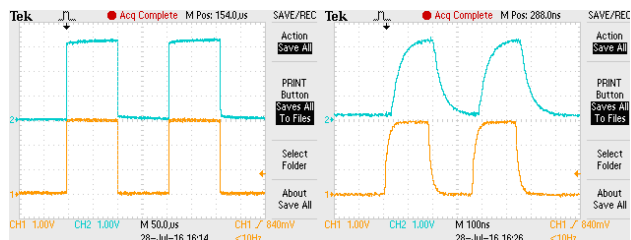
Przeprowadzono badania funkcjonalne poszczególnych izolatorów polegające na zastosowaniu ich do separacji wybranych, najczęściej stosowanych interfejsów dla typowych dla nich prędkości transmisji przy jednoczesnej kontroli poprawności. Sygnał testowy stanowiły pseudolosowe dane uzyskiwane z układu testowego. Badaniem i testom funkcjonalnym poddane zostały izolatory wielokanałowe, które umożliwiały przepływ danych następujących interfejsów: CAN, USB, SPI, I2C, UART (USART). Zastosowany zestaw umożliwia testowanie interfejsu SPI do 45 Mbps a prędkość interfejsu UART do wartości 5,626 Mbps, rozszerzonej ponad standard. Napięcia zasilania strony pierwotnej +VCCA i wtórnej +VCCB: 3,3 V.

### Badanie funkcjonalne izolatorów – test interfejsów

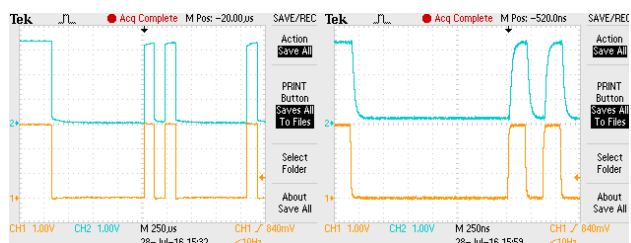
W trakcie testów izolatora cyfrowego dedykowanego dla interfejsu I2C ADuM2250 i ISO1540 przeprowadzono badania transmisji I2C dla prędkości 10 kbps – 400 kbps. Stwierdzono poprawną transmisję dla wszystkich testowanych prędkości.

Zastosowanie zabezpieczeń wymaganych do spełnienia wymagań norm dotyczących budowy iskrobezpiecznej zgodnie z parametrami znamionowymi izolatora dedykowanego dla interfejsu USB ADuM4160 powoduje utratę jego funkcjonalności. Układ bez zabezpieczeń realizuje poprawnie wymianę danych z prędkością 12 Mbps zakładaną przez producenta - firmę Analog Devices. W trakcie testów izolatora cyfrowego ADuM141 oraz ISO7841 przeprowadzono badania transmisji UART (USART) dla prędkości 9600; 19200; 57600; 115200; 230400; 460800; 921600 bps oraz 1; 2; 2,81; 5,626 Mbps (rys.1 oraz rys.2), oraz CAN dla prędkości 50; 62,5; 125; 250; 500; 1000 kbps. Stwierdzono poprawną transmisję dla wszystkich testowanych prędkości transmisji dla interfejsów UART (USART), CAN. W trakcie testów izolatora cyfrowego ADuM141 oraz ISO7841 przeprowadzono badania

transmisji SPI dla prędkości 0,350; 0,700; 1,4; 2,8; 5,642; 11,25; 22,5; 45 Mbps. Dla izolatora ADuM141 stwierdzono poprawną transmisję do prędkości 22,5 Mbps. Przy prędkości 22,5 Mbps transmisja przestaje poprawnie funkcjonować przy podłączeniu sond oscyloskopowych. Dla izolatora ISO7841 stwierdzono poprawną transmisję dla wszystkich prędkości w zakresie 0,350 Mbps – 22,5 Mbps. Przy prędkości 45 Mbps transmisja przestaje poprawnie funkcjonować przy podłączeniu sond oscyloskopowych.



Rys.1. Oscylogramy sygnałów dla skrajnych prędkości transmisji interfejsu UART układu ADuM141 - z lewej dla 9600 bps, z prawej dla 5,625 Mbps



Rys.2. Oscylogramy sygnałów dla skrajnych prędkości transmisji interfejsu UART układu ISO7841 - z lewej dla 9600 bps, z prawej dla 5,625 Mbps

Tabela 2. Optymalne prędkości transmisji dla interfejsów I2C, SPI, UART, CAN, USB w układach zabezpieczeń

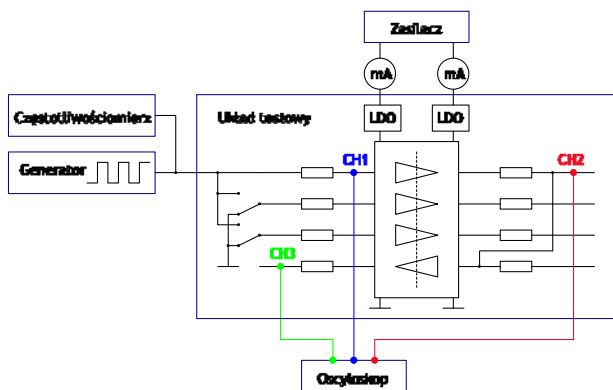
Układ	Technologia	Interfejs	Katalogowa prędkość transmisji danych	Pojemność wejściowa Ci [pF]	Poprawnie funkcjonujące prędkości transmisji w aplikacji iskrobezpiecznej
ADuM2250	iCoupler®	I2C	do 1 Mbps	4.0	10; 50; 100; 200; 400 kbps
ISO1540	ISO	I2C	do 1 Mbps	7.0	10; 50; 100; 200; 400 kbps
ADuM141	iCoupler®	SPI	dc do 150 Mbps	4.0	0,350; 0,700; 1,4; 2,8; 5,642; 11,25; 22,5 Mbps
ISO7841	ISO	SPI	dc do 100 Mbps	2.0	0,350; 0,700; 1,4; 2,8; 5,642; 11,25; 22,5; 45 Mbps
ADuM141	iCoupler®	UART	dc do 150 Mbps	4.0	9600; 19200; 57600; 115200; 230400; 460800; 921600 bps; 1; 2; 2,81; 5,626 Mbps
ISO7841	ISO	UART	dc do 100 Mbps	2.0	9600; 19200; 57600; 115200; 230400; 460800; 921600 bps; 1; 2; 2,81; 5,626 Mbps
ADuM141	iCoupler®	CAN	dc do 150 Mbps	4.0	50; 62,5; 125; 250; 500; 1000 kbps
ISO7841	ISO	CAN	dc do 100 Mbps	2.0	50; 62,5; 125; 250; 500; 1000 kbps
ADuM4160	iCoupler®	USB	1,5 Mbps 12 Mbps	4.0	Poprawna transmisja dla trybu FullSpeed 12 Mbps w układzie bez zabezpieczeń. Brak możliwości stosowania w aplikacjach iskrobezpiecznych

### Badanie poboru prądu i przebiegów czasowych w układach izolatorów

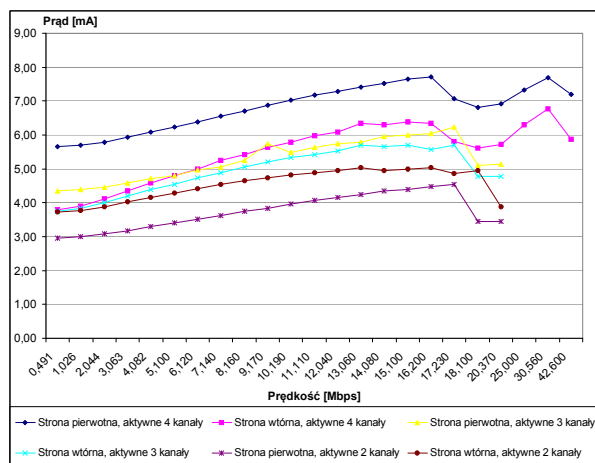
Badaniu poddane zostały izolatory jednokanałowe oraz wielokanałowe (2-, 3- i 4 kanałowe), w przypadku których jeden z kanałów miał wejście po stronie wtórnej i wyjście po

stronie pierwotnej, a pozostałe kanały miały wejścia po stronie pierwotnej i wyjścia po stronie wtórnej. Sygnał wyjściowy generatora dołączano poprzez układ zabezpieczeń do wybranej liczby wejść strony pierwotnej izolatora. W przypadku izolatorów posiadających kanały

w przeciwnych kierunkach, jedno z wyjść po stronie wtórnej dołączone było do wejścia po stronie wtórnej poprzez układ zabezpieczeń. Bezpośrednio do wejścia kanału po stronie pierwotnej dołączono częstotliwościomierz i kanał CH1 oscyloskopu. Kanał CH2 oscyloskopu dołączono po stronie wtórnej do wyjścia tego samego kanału izolatora za układem zabezpieczeń. W przypadku izolatorów wielokanałowych wyjście to dołączone było do wejścia po stronie wtórnej. Kanał CH3 oscyloskopu dołączony był po stronie pierwotnej do wyjścia zapętlonego kanału za układem zabezpieczeń. Pozostałe niewykorzystane wejścia po stronie pierwotnej podłączane były do potencjału masy strony pierwotnej. Pobór prądu po stronie pierwotnej i wtórnej zmierzono za pomocą multimetrów uniwersalnych włączonych przed stabilizatorami liniowymi zasilającymi strony: pierwotną i wtórna. Prąd pobierany przez stabilizator i diody Zenera układu zabezpieczeń są pomijalnie małe w stosunku do prądu pobieranego przez układ izolatora. Ponadto filtry w układzie zasilania uśredniają impulsowy charakter poboru prądu przez układ izolatora. Zastosowany układ zasilania odpowiada układowi najczęściej stosowanemu w rzeczywistych aplikacjach, zatem wyniki pomiaru prądu są reprezentatywne, pozwalając oszacować rzeczywisty pobór prądu oraz dobrać rezystor szeregowy.



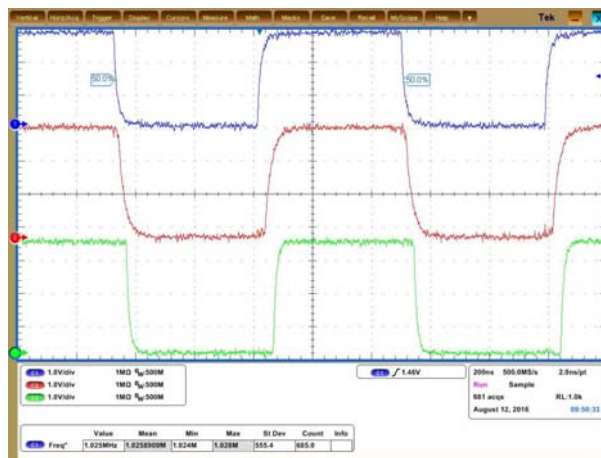
Rys.3. Ogólny schemat stanowiska wyznaczenia parametrów izolatorów



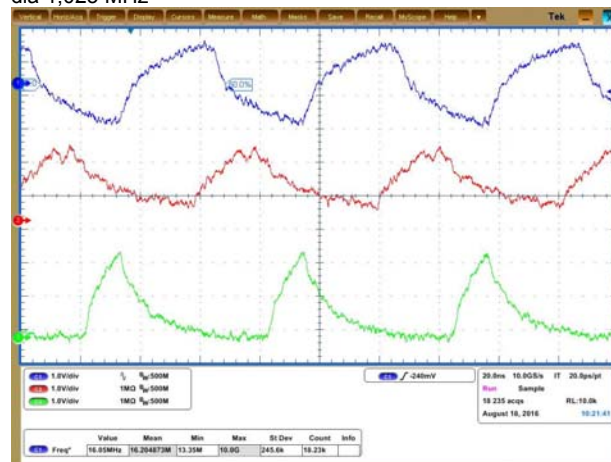
Rys.4. Wykres poboru prądu w zależności od prędkości i liczby aktywnych kanałów układu ADuM141

Wyznaczono charakterystyki poboru prądu w zależności od prędkości transmisji i liczby aktywnych kanałów. Wykorzystano prostokątny przebieg testowy uzyskiwany z generatora Silabs Si5351. Dodatkowo dla dwóch układów: ADuM141 i ISO7841 przeprowadzono analogiczne badania funkcjonalne oraz wyznaczono charakterystyki poboru prądu w układzie z ogranicznikami napięcia wejściowego, pozwalającymi na stosowanie ich przy napięciach na liniach

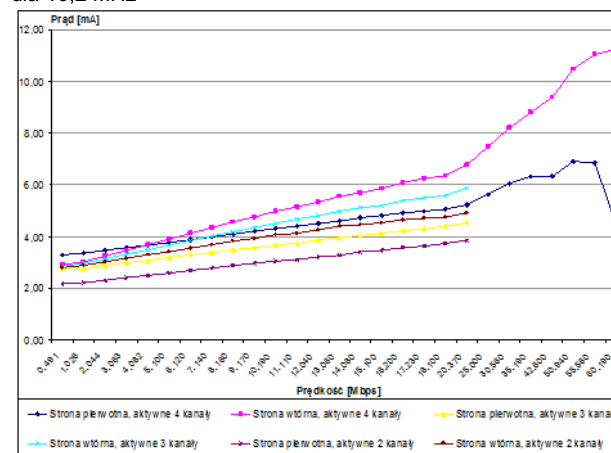
interfejsu mogących w rozumieniu normy przekroczyć maksymalne napięcia wejściowe tych układów. Napięcia zasilania strony pierwotnej +VCCA i wtórnej +VCCB: 3,3 V. Ogólny schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 3. Dla układu ADuM141 charakterystyki poboru prądu przedstawiono na rysunku 4, a oscylogramy na rysunkach 5 i 6.



Rys.5. Oscylogram czterokanałowego izolatora ADuM141 dla 1,025 MHz

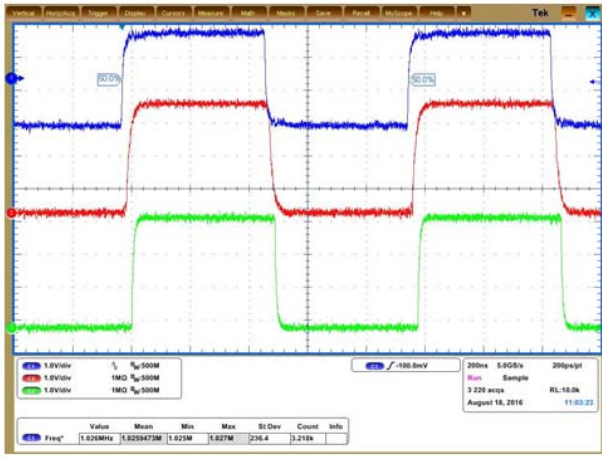


Rys.6. Oscylogramy czterokanałowego izolatora ADuM141 dla 16,2 MHz

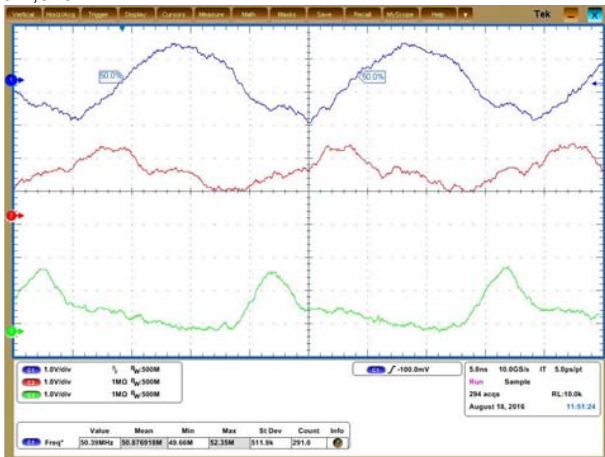


Rys.7. Wykres poboru prądu w zależności od prędkości i liczby aktywnych kanałów układu ISO7841

Dla układu ISO7841 charakterystyki poboru prądu przedstawiono na rysunku 7, a oscylogramy na rysunkach 8 i 9.



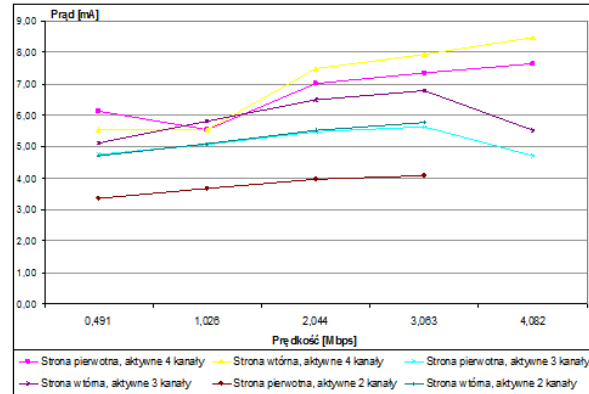
Rys.8. Oscylogram czterokanałowego izolatora ISO7841 dla 1,025 MHz



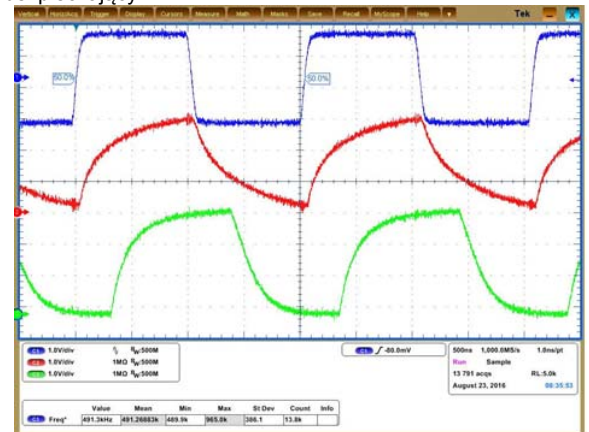
Rys.9. Oscylogram czterokanałowego izolatora ISO7841 dla 50,94 MHz

### Badania izolatorów z wejściowymi ogranicznikami napięcia

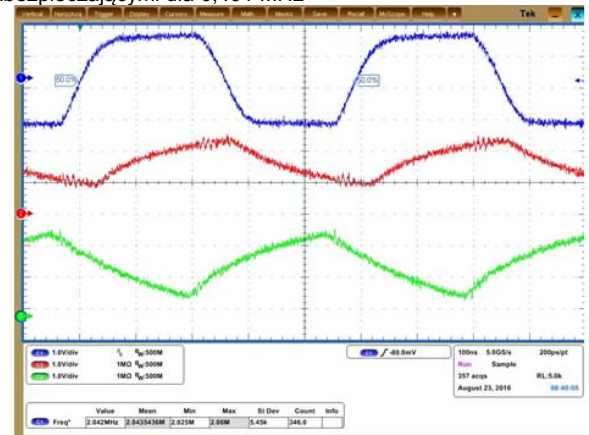
Istotnym ograniczeniem związanym z układami izolatorów cyfrowych jest maksymalne napięcie na ich wejściach/wyjściach, które nie może zostać przekroczone. W przypadku stosowania izolatorów w układach, w których może wystąpić wyższe napięcie konieczne staje się ograniczenie na liniach wejść/wyjść zarówno prądów, jak też napięć. Możliwym do zastosowania środkiem jest włączenie równoległych, diodowych ograniczników napięcia pomiędzy linie wejść/wyjść a zasilanie układu izolatora. Ponieważ napięcie zasilania izolatorów uzyskiwane jest z nieuszkodzalnego w rozumieniu normy PN-EN 60079-11 ogranicznika, zatem przy zapewnieniu nieuszkodzalności połączenia ograniczników z zasilaniem izolatora oraz z liniami wejść/wyjść napięcie na nich nie przekroczy sumy napięcia ogranicznika i napięcia przewodzenia diody. Badania funkcjonalne przeprowadzone w układzie z ogranicznikami wykazały poprawną transmisję do 2 Mbps w przypadku układów wykonanych w technologii iCoupler® oraz do 3,675 Mbps w przypadku układów wykonanych w technologii ISO. Dla układu ADuM141 z ogranicznikami charakterystyki poboru prądu przedstawiono na rysunku 10, a oscylogramy na rysunkach 11 i 12. Dla układu ISO7841 z ogranicznikami charakterystyki poboru prądu przedstawiono na rysunku 13, a oscylogramy na rysunkach 14 i 15. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość zastosowania diodowych ograniczników napięcia na liniach wejść/wyjść, jednak przy znacznym ograniczeniu maksymalnych prędkości transmisji do wartości podanych powyżej.



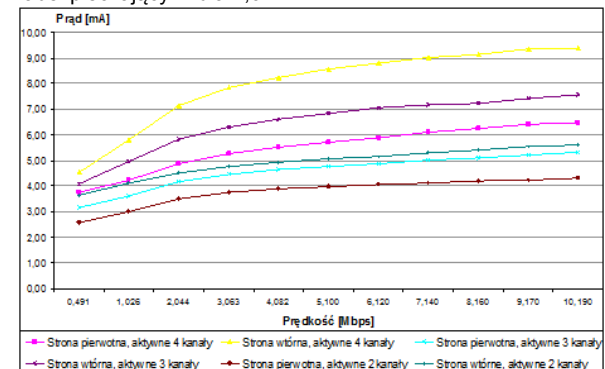
Rys.10. Wykres poboru prądu w zależności od prędkości i liczby aktywnych kanałów układu ADUM141 z diodami zabezpieczającymi



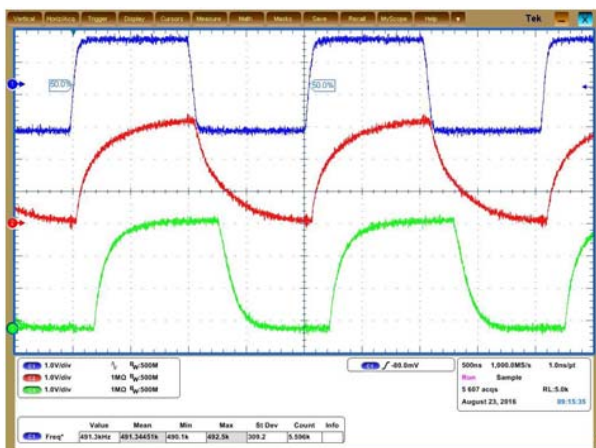
Rys.11. Oscylogram izolatora ADuM141 układ z diodami zabezpieczającymi dla 0,491 MHz



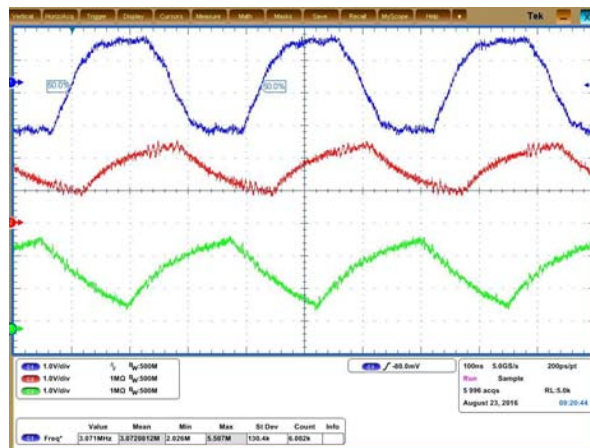
Rys.12. Oscylogram izolatora ADuM141 układ z diodami zabezpieczającymi dla 2,044 MHz



Rys.13. Wykres poboru prądu w zależności od prędkości i liczby aktywnych kanałów układu ISO7841 z diodami zabezpieczającymi.



Rys.14. Oscylogram izolatora ISO7841 układ z diodami zabezpieczającymi dla 0,491 MHz



Rys.15. Oscylogram izolatora ISO7841 układ z diodami zabezpieczającymi dla 3,063 MHz

Tabela 3. Gwarantowane prędkości transmisji w układach zabezpieczeń

Układ	Technologia	Liczba kanałów	Katalogowa prędkość transmisji danych	Pojemność wejściowa Ci [pF]	Maksymalna prędkość transmisji w układzie badań z rysunku 3
ADuM141	iCoupler®	4	dc do <b>150</b> Mbps	4.0	16,20 MHz
ADuM1301	iCoupler®	3	dc do <b>90</b> Mbps	4.0	23,16 MHz
ADuM2281	iCoupler®	2	dc do <b>100</b> Mbps	4.0	25,00 MHz
ADuM1100	iCoupler®	1	dc do <b>100</b> Mbps	4.0	23,16 MHz
ISO7841	ISO	4	dc do <b>100</b> Mbps	2.0	50,94 MHz
ISO7821F	ISO	2	dc do <b>100</b> Mbps	2.0	42,60 MHz
ISO721M	ISO	1	dc do <b>150</b> Mbps	1.0	73,15 MHz

### Uwagi i Wnioski

Układy wejściowe izolatorów cyfrowych typu iCoupler® oraz ISO zrealizowane są w technologii CMOS. Jest wymagane, aby niewykorzystywane wejścia były podłączone do zasilania lub masy. Niespełnienie tego zalecenia w aplikacji będzie powodowało nieokreślone zmiany stanu w niewykorzystanym kanale izolatora oraz zwiększony pobór prądu. Ze względu na dodatkowe obciążenie pojemnościowe wnoszone przez połączenia oraz układ pomiarowy (sondy i oscyloskop, zminimalizowane poprzez zastosowanie sond z dzielnikiem 1:10), uzyskane na oscylogramach przebiegi czasowe przy większych prędkościach nie są miarodajne. Podczas badań funkcjonalnych poszczególnych interfejsów poprawna transmisja przy większych prędkościach możliwa była tylko po odłączeniu dodatkowego obciążenia wnoszonego przez układ pomiarowy. W przypadku większości układów ISO pojemność wejściowa wynosi 2 pF, a w przypadku większości układów ADuM pojemność wejściowa wynosi 4 pF. Dla pojemności wejścia zastosowanego oscyloskopu wynoszącej 10 pF i sondy z dzielnikiem 1:10 w najkorzystniejszym przypadku obciążenie pojemnościowe wnoszone przez układ pomiarowy będzie wynosiło 1,0 pF. Po uwzględnieniu dodatkowej pojemności doprowadzeń pojemność włączona równolegle przekracza pojemność samego układu izolatora.

Istotnym parametrem do uwzględnienia przy stosowaniu izolatorów cyfrowych są pojemności wejściowe, co jest

widoczne szczególnie w aplikacjach z diodowymi ogranicznikami napięcia na wejściach i wyjściach układu transmisji. W przypadku większości układów ISO pojemność wejściowa wynosi 2 pF, a w przypadku większości układów ADuM pojemność wejściowa wynosi 4 pF. Przy stosowaniu izolatorów w aplikacji jest zalecane nie przekraczanie pojemności obciążenia powyżej 15 pF. Testy producentów izolatorów są wykonywane dla typowego obciążenia wejścia układami CMOS Ci = 15 pF.

W izolatorach dedykowanych dla niektórych interfejsów, w których istotne są zależności czasowe lub o liniach dwukierunkowych (I2C, USB, SPI) ważnym aspektem jest właściwie podłączenie stron izolatora względem strony inicjującej komunikację.

W przypadku projektowania systemu / urządzenia jest zalecane ograniczenie ogranicznikami napięć układów zasilania, transmisji do wartości  $\leq 6,0$  V co pozwala zastosować układy technologii ISO [4], która wykazuje wyższe prędkości transmisji niż technologia iCoupler® w tych samych warunkach (tabela 2 i 3). W wypadku stosowania ograniczników napięcia do wartości 7,0 V należy stosować układy w technologii iCoupler® a nie technologię ISO wraz z diodowymi ogranicznikami napięcia na liniach wejść/wyjść. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość zastosowania diodowych ograniczników napięcia na liniach wejść/wyjść, jednak przy znacznym ograniczeniu maksymalnych prędkości transmisji. Dla rozwiązania z diodowymi ogranicznikami napięcia dopuszczalne w rozumieniu normy wartości napięć na liniach interfejsu

będą uzależnione od topologii układu, wartości elementów i parametrów diod zastosowanych w ogranicznikach.

Układy izolatorów cyfrowych technologii iCoupler® oraz ISO są przeznaczone do przesyłania sygnałów lokalnie, zwykle w obrębie obwodu drukowanego, ewentualnie w obrębie urządzenia. W typowym zastosowaniu izolatory te stosowane są lokalnie w danym urządzeniu np.: pomiędzy mikrokontrolerem a transceiverem danej magistrali.

### Podsumowanie

W dotychczasowych rozwiązaniach brak uprzedniej znajomości parametrów separacji realizowanych w oparciu o scalone separatory w aplikacjach iskrobezpiecznych stanowił znaczną niedogodność. Uzyskane wyniki umożliwiły opracowanie uniwersalnych zaleceń projektowych dotyczących stosowania układów scalonych separatorów w aplikacjach iskrobezpiecznych oraz pozwoliły określić w jakim zakresie wymagane środki pozwalające stosować je w tych aplikacjach ograniczają ich funkcjonalność, zwłaszcza w zakresie uzyskiwanej szybkości transmisji. Staje się to szczególnie przydatne na wczesnych etapach realizowanych projektów, ponieważ pozwala wybrać sprawdzone rozwiązanie, spełniające jednocześnie wymagania formalne i funkcjonalne.

*Praca finansowana ze środków wewnętrznych w ramach pracy statutowej nr 301 0 146 6 4110 02.*

**Autorzy:** mgr inż. Sławomir Chmielarz, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Slawomir.Chmielarz@ibemag.pl](mailto:Slawomir.Chmielarz@ibemag.pl); mgr inż. Tomasz Molenda, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Tomasz.Molenda@ibemag.pl](mailto:Tomasz.Molenda@ibemag.pl); mgr inż. Piotr Szymała, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Piotr.Szymala@ibemag.pl](mailto:Piotr.Szymala@ibemag.pl); mgr inż. Piotr Loska, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Piotr.Loska@ibemag.pl](mailto:Piotr.Loska@ibemag.pl).

### LITERATURA

- [1] PN-EN 60079-0:2013-03 + A11:2014-03, Atmosfery wybuchowe -- Część 0: Urządzenia -- Podstawowe wymagania, 2015-08-27
- [2] PN-EN 60079-11:2012, Atmosfery wybuchowe -- Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "I", 2015-02-05
- [3] PN-EN 60079-25:2011 + AC:2014-08, Atmosfery wybuchowe - - Część. 25: Systemy iskrobezpieczne, 2016-01-13
- [4] Chmielarz S., Molenda T., Szymała P., Korski W., Warunki stosowania izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych, *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*, 529 (2017), n.1, 86-92
- [5] Niepublikowane sprawozdanie z pracy statutowej: 301 0 146 6 4110 02
- [6] Scott W. iCoupler®, Digital Isolators Protect RS-232, RS-485, and CAN Buses in Industrial, Instrumentation, and Computer Applications [online], *Analog Dialogue*, 39-10, October (2005), [dostęp 18.11.2015]. Dostępny w Internecie, <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/39-10/iCoupler.pdf>
- [7] Kugelstadt T., Industrial data-acquisition interfaces with digital isolators, *Analog Applications Journal*, 3Q 2011, [dostęp 18.11.2015]. Dostępny w Internecie, <http://www.ti.com/lit/an/slyt426/slyt426.pdf>