

Nowoczesne technologie separacji galwanicznej sygnałów cyfrowych i ich przewidywane zastosowania w urządzeniach iskrobezpiecznych

Artykuł przedstawia przyczyny zmian w podejściu do separacji. Na przykładzie rozwiązań firmy Analog Devices i Texas Instruments ukazano nowoczesne technologie separacji galwanicznej sygnałów cyfrowych. Omówiono sprzężenie indukcyjne w technologii iCoupler a Texas Instruments oraz sprzężenie pojemnościowe w technologii ISO. Zaprezentowane zostały również przewidywane możliwości wykorzystania tego rodzaju separacji w urządzeniach iskrobezpiecznych.

słowa kluczowe: optoelektronika, iskrobezpieczeństwo urządzeń, separacja galwaniczna.

1. WPROWADZENIE

Stosowanie separacji zawsze stanowiło dla konstruktorów uciążliwość, było ono jednak konieczne i wynikało z różnych przyczyn [6]. Ograniczenie szybkości komunikacji, duże zużycie energii oraz ilość miejsca zajmowanego na obwodzie drukowanym stanowiły utrudnienia związane ze stosowaniem separacji i w wielu przypadkach było niepraktyczne.

Duże znaczenie dla projektantów miało pojawienie się nowoczesnych transoptorów – około 45 lat temu. Izolacja zapewniona przez transoptory pozwoliła zastosować sprzężenie zwrotne w obwodach sterowania zasilania, przerwać pętlę uziemienia w komunikacji i sterowanie tranzystorami mocy od dodatniej strony zasilania oraz realizować układy kontroli prądu.

W latach 70. nastąpił wzrost liczby urządzeń optoelektronicznych. Miało to istotny wpływ na rozwój standardów komunikacyjnych, takich jak RS-232, RS-485, i przemysłowych, w tym pętle prądowe 4-20 mA, DeviceNet i Profibus. Parametry i ograniczenia elementów optoelektronicznych stosowanych do realizacji separacji znacząco wpływały na wiele właściwości wymienionych standardów komunikacji.

W latach 80. oraz 90. ubiegłego wieku postęp w technologii separacji miał charakter ciągły aż do 2000 roku, kiedy wprowadzono pierwszy z nowych

układów scalonych separacji. Te nowe elementy opierały się na sprzężeniu indukcyjnym poprzez transformatory zawarte w układach scalonych, materiałach GMR (*ang.: Giant magneto-resistive* – gigantyczna magnetorezystancja), a następnie również poprzez różnicowe sprzężenie pojemnościowe.

Nowe technologie są w stanie pracować przy znacznie wyższych szybkościach transmisji oraz znacznie niższych poziomach energii niż starsze rozwiązania – transoptory. Standardy pozostały jednak niezmienione i wiele możliwości nowych urządzeń, takich jak wysokie szybkości, nie zostały w pełni wykorzystane, ponieważ istniejące standardowe interfejsy ich nie potrzebują.

Wykorzystanie przy produkcji separatorów cyfrowych standardowych obudów i procesów technologicznych wytwarzania typowych dla układów scalonych do realizacji zawartych w tych separatorach układów kodowania i dekodowania upraszcza rozszerzenie ich funkcjonalności. Dzięki temu są one kompatybilne z typowymi układami cyfrowymi.

Niskie zużycie energii, wsparcie dla niskich napięć i wysokiego poziomu integracji stały się głównymi zaletami konstrukcji separatorów innych niż optyczne. Innowacja ta pozwala separować znacznie wyższe szybkości lub zużywać znacznie mniej energii oraz umożliwia obsługę najbardziej wymagających nowych standardów interfejsów.

Obecnie zużycie energii w separatorach cyfrowych, choć jest znacznie niższe niż w transoptorach, musi być dwa do trzech rzędów wielkości niższe, aby umożliwić wdrożenie ich w nowych zastosowaniach [2].

Z wymienionych wcześniej względów dotychczas separacja stosowana była dla interfejsów do przesyłania danych na większe odległości z niezbyt dużymi szybkościami. Separacja wysokiej wydajności, jaką zapewniają scalone cyfrowe separatory, pozwala w prosty i oszczędny sposób separować również interfejsy szybkie i o charakterze typowo lokalnym, np. I2C, SPI, USB, I2S, SDIO. Układy separacji posiadają niezależnie od siebie zasilane strony separacji napięciami 5 V albo 3,3 V i wynikające z nich napięcia stanów logicznych. Zatem dodatkową korzyścią jest możliwość realizacji konwersji napięć poziomów logicznych.

2. PORÓWNANIE TECHNOLOGII SEPARACJI

Źródłem postępu w elementach separujących jest połączenie zalet systemu kodowania danych i wydajności medium stosowanego do ich transferu. Obydwa te czynniki wpływają na zużycie energii. W przypadku zastosowania danego rodzaju separacji zrealizo-

wanego w określonej technologii i wynikającego z nich medium wpływ na zużycie energii ma system kodowania.

Systemy kodowania i dekodowania można podzielić na:

- kodowania i dekodowania zboczny,
- kodowania i dekodowania poziomu.

System oparty na kodowaniu poziomu musi stale wydankować energię przez barierę separacji, aby utrzymać dominujący stan wyjściowy, natomiast do reprezentowania recesywnego stanu wyjściowego nie wysyła żadnej energii przez barierę.

W optoizolatorach przekazywanie energii odbywa się za pośrednictwem światła, które ma niską skuteczność w stosunku do bezpośredniego wytwarzania pól elektrycznych lub magnetycznych i słabą efektywność detekcji w elemencie odbierającym. Transoptory oparte na prostym tranzystorze lub diodzie PIN muszą zużywać dużo energii, wytwarzając światło celem utrzymania na wyjściu odpowiednich parametrów napięcia/prądu, ale odbiornik zużywa mało energii, aby odbierać sygnał. Ilustrują to dane zawarte w tab. 1. – transoptor wykorzystujący diodę PIN / fototranzystor charakteryzuje się wysokim prądem wejściowym i niskim prądem wyjściowym.

Tabela 1.

Porównanie zużycia mocy przez pojedynczy kanał różnych rodzajów separacji w odniesieniu przy $V_{dd} = 3,3 \text{ V}$ i szybkości 100 kbps [2]

Technologia	Prąd wejściowy [mA]	Prąd wyjściowy [mA]
Transoptor cyfrowy wysokiej szybkości	2,5	8,5
Transoptor wysokiej szybkości wykorzystujący diodę PIN/ fototranzystor	8	1,2
Separator cyfrowy ze sprzężeniem pojemnościowym	1,25	1
Separator cyfrowy ze sprzężeniem indukcyjnym	0,5	0,23
Separator cyfrowy ze sprzężeniem indukcyjnym bardzo niskiej mocy	0,01	0,01

Szybsze transoptory cyfrowe charakteryzują się zmniejszoną ilością światła niezbędnego do utrzymania stanu dzięki aktywnemu wzmocnieniu dodanemu do odbiornika. Dzięki temu średni prąd wymagany przez diody jest mniejszy, ale odbiorniki mają stosunkowo duży prąd spoczynkowy, więc zużycie energii nie zostało znacząco zmniejszone, a tylko przeniesione na stronę odbiornika. Obniżenie wymaganej mocy potrzebuje zwiększenia skuteczności elementu LED i odbiornika lub zmiany sposobu kodowania, co wpływa na osiągnięcie dotychczasowych postępów w rozwoju technologii transoptorów [2].

Na rynku dostępne są nowoczesne rozwiązania separacji sygnałów cyfrowych.

Przykładem wykorzystującym sprzężenie pojemnościowe jest seria układów *ISO* Texas Instruments, natomiast sprzężenie indukcyjne – seria układów *iCoupler* Analog Devices.

Są to funkcjonalnie zbliżone do siebie, konkurencyjne rozwiązania, które znacząco przewyższają powszechnie stosowane dotychczas transoptory pod względem miniaturyzacji, szybkości transmisji, zużywanej energii i pewności działania [5].

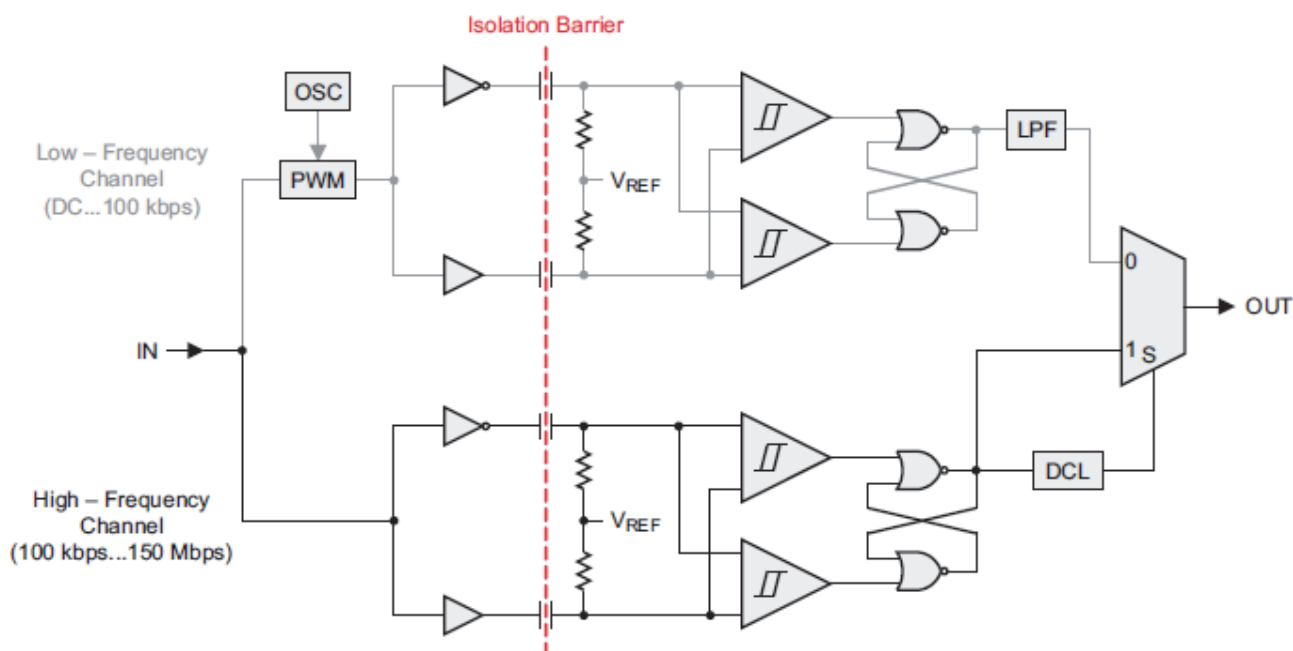
Zarówno sprzężenie indukcyjne zastosowane przez Analog Devices, jak i pojemnościowe zastosowane przez Texas Instruments nie przenosi składowej stałej sygnału. W obydwu przypadkach konieczne było zastosowanie układów, które po stronie pierwotnej

kodują informację o kierunkach zboczy lub o stanie logicznym przesyłanego sygnału jako zmiany prądu dla sprzężenia indukcyjnego albo jako zmiany napięcia dla sprzężenia pojemnościowego, oraz odpowiednich układów odtwarzających na tej podstawie przebieg wejściowy po stronie wtórnej.

Ze względu na brak możliwości przenoszenia składowej stałej sprzężenia pojemnościowe albo indukcyjne były rzadziej wykorzystywane do separacji sygnałów dwustanowych, wykorzystywano do tego celu przede wszystkim sprzężenia optyczne.

3. SPRZĘŻENIE POJEMNOŚCIOWE W TECHNOLOGII ISO

Seria układów ISO Texas Instruments wykorzystuje do separacji sprzężenia pojemnościowe. Pojedynczy kanał danych w tym rozwiązaniu składa się z dwóch równoległych kanałów: szybkiego kanału AC o paśmie przenoszenia od 100 kbps do 150 Mbps oraz kanału o niskiej szybkości, od DC do 100 kbps. Strukturę pojedynczego kanału separatora pojemnościowego przedstawiono na rys. 1.

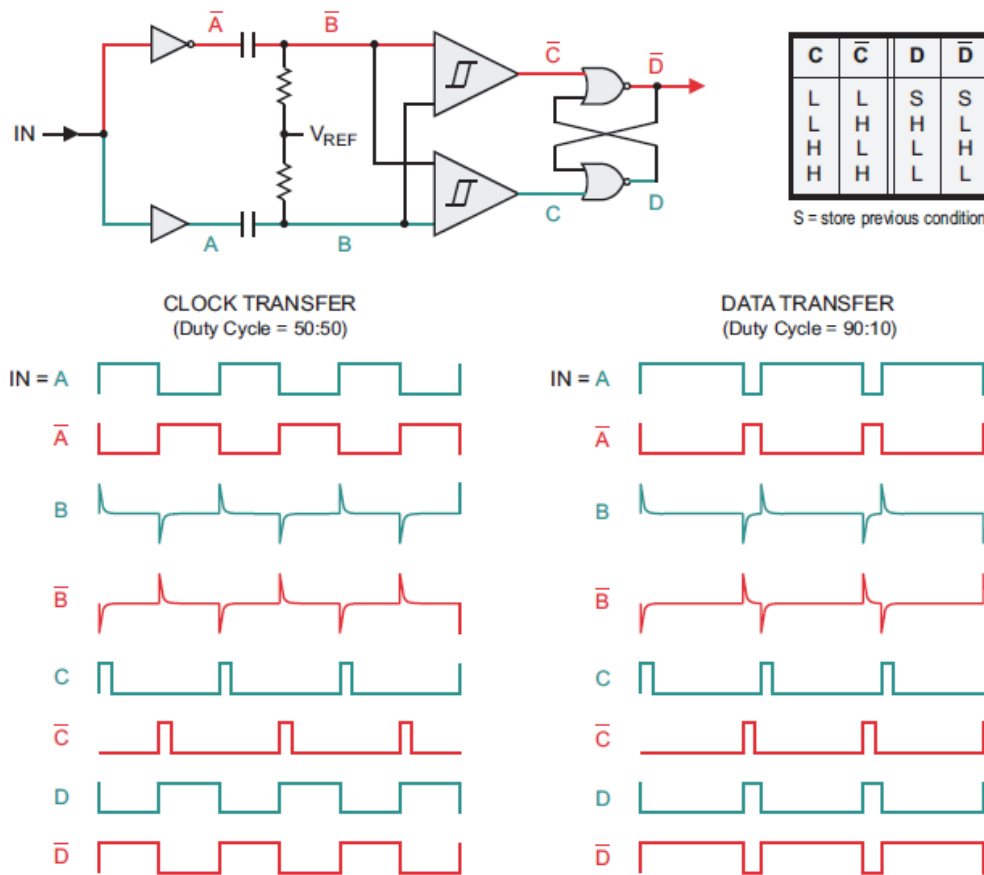


Rys. 1. Struktura pojedynczego kanału separatora pojemnościowego [9]

3.1. Opis kanału dla przebiegów szybkozmiennych (AC)

Sygnał wejściowy doprowadzony jest w kanale AC bezpośrednio do wejść dwóch buforów jednocześnie: odwracającego i nieodwracającego. Na wyjściu jednego z buforów sygnał ma zatem postać prostą, a na wyjściu drugiego – zanegowaną (rys. 1). Wyjścia buforów są dołączone przez układy różniczkujące RC (pojemność stanowi separację włączoną szeregowo) do wejść dwóch komparatorów, które ze stanów przejściowych o przeciwnej fazie na wyjściach układów różniczkujących wypracowują krótkie impulsy na wyjściu uzależnionym od kierunku zbocza sygnału wejściowego. Tak długo, jak na wejściu nieodwracającym komparatora napięcie jest wyższe niż na wejściu odwracającym, jego wyjście przyjmuje stan wysoki. Wyjścia komparatorów dołączone są do

odpowiednich wejść SET i RESET przerzutnika RS zrealizowanego na brankach logicznych NOR. Przerzutnik RS tego typu jest przerzutnikiem odwracającym, zatem stan wysoki (aktywny) na wejściu C powoduje ustawienie stanu wysokiego na wyjściu /D, a stan wysoki na wejściu /C – ustawienie stanu wysokiego na wyjściu D. Ponieważ impulsy na wyjściach komparatorów charakteryzują się bardzo krótkimi czasami trwania, możliwe jest wystąpienie stanu niskiego na obu wejściach przerzutnika, który zachowuje wówczas na swoich wyjściach stan poprzedni. Sygnał na wyjściu /D przerzutnika ma taką samą fazę i kształt, jak sygnał wejściowy kanału. Schemat oraz przebiegi czasowe w poszczególnych punktach kanału dla przebiegów szybkozmiennych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat oraz przebiegi czasowe w poszczególnych punktach kanału dla przebiegów szybkozmiennych [9]

Do wyjścia przerzutnika kanału AC jest dołączony układ decyzyjny w postaci „watchdoga” mierzącego czas pomiędzy przełączeniami sygnału. W przypadku, kiedy czas pomiędzy dwoma kolejnymi przełączeniami przekracza długość maksymalnego okna czasowego, co ma miejsce w przypadku przesyłania wolnozmiennego sygnału, wyjściowy multiplexer jest przełączany z kanału AC dla przebiegów szybkozmiennych na kanał DC dla przebiegów wolnozmiennych.

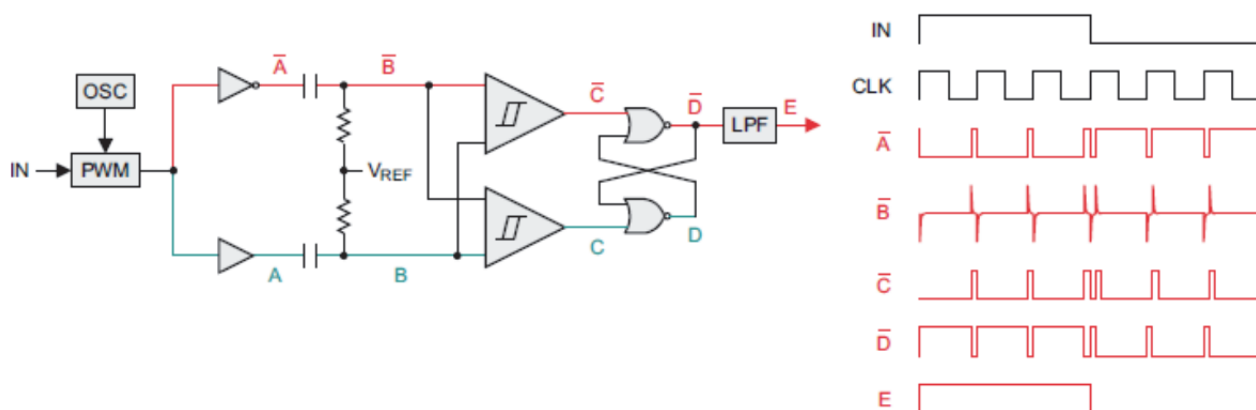
3.2. Opis kanału dla przebiegów wolnozmiennych

Aby przesyłać przebiegi wolnozmiennie przez separację pojemnościową w kanale dla przebiegów wolnozmiennych, sygnał wejściowy wykorzystywany jest do modulowania szerokości impulsu (PWM) wewnętrznego generatora. Zmodulowany przebieg jest przesyłany przez taki sam układ, jak w kanale AC, przy czym na wyjściu przerzutnika RS zastosowano filtr dolnoprzepustowy RC celem wyeliminowania składowej o częstotliwości nośnej. Częstotliwość nośna oraz działanie modulatora dobrane zostały w taki sposób, że przy stanie wysokim na wejściu

kanału współczynnik wypełnienia na wyjściu modulatora wynosi 90%, a przy stanie niskim – odpowiednio 10%. Schemat oraz przebiegi czasowe w poszczególnych punktach kanału dla przebiegów wolnozmiennych przedstawiono na rys. 3.

Różnicą w działaniu kanałów jest to, że składowa wysokiej częstotliwości kanału niskiej szybkości /D jest filtrowana przez filtr dolnoprzepustowy RC, zanim sygnał ten zostanie doprowadzony do multiplexera wyjściowego E (rys. 3).

W ofercie Texas Instruments dostępnych jest wiele wariantów układów wykorzystujących technologię separacji ISO. Różnią się one między sobą liczbą kanałów (1, 2, 3, i 4) i kombinacjami kierunków transmisji, dzięki czemu obszar ich zastosowań pokrywa wiele wykorzystywanych powszechnie interfejsów cyfrowych. Wszystkie układy ISO wykorzystują logikę CMOS z pojedynczym zasilaniem 3 V / 5 V. Nominalny zakres napięć zasilania zawiera się pomiędzy 3,3 a 5 V dla zasilania obydwu separowanych stron i dopuszczalna jest dowolna kombinacja tych wartości. Stosując cyfrowe separatory ISO, należy mieć na względzie fakt, że układy te nie są zgodne ze specyfikacją żadnego standardowego interfejsu, a jedynie mają na celu zapewnienie separacji



Rys. 3. Schemat oraz przebiegi czasowe w poszczególnych punktach kanału dla przebiegów wolnozmiennych [9]

dla cyfrowych linii sygnałowych 3 V / 5 V. W przypadku separacji interfejsów SPI, RS-232 i RS-485 separator jest stosowany pomiędzy układem kontrolera (np. mikrokontrolera czy układu UART) a transceiverem magistrali albo innym układem, niezależnie od standardu samego interfejsu.

Oprócz uniwersalnych, niezależnych układów wykorzystujących technologię separacji *ISO* Texas Instruments stosuje ją również w układach transceiverów RS-485 poprzez zintegrowanie w jednym układzie scalonym transceivera RS-485 i układu separacji *ISO*. Dzięki takiemu rozwiązaniu jest możliwa realizacja separacji transmisji RS-485 przy minimalnej liczbie elementów, tylko poprzez zastosowanie transceivera magistrali z wewnętrzną separacją i oddzielnymi zasilaniami strony kontrolera i strony magistrali [9].

4. SPRZĘŻENIE INDUKCYJNE W TECHNOLOGII *iCOUPLER*

Cyfrowe separatory *iCoupler* Analog Devices wykorzystują jako element sprzęgający mikrotransformatory zintegrowane w układzie scalonym do przesyłania danych przez wysokiej jakości poliamidową barierę izolacyjną.

W separatorach *iCoupler* wykorzystywane są dwie podstawowe metody przesyłania danych: unipolarna i różnicowa. Wybór jednej z powyższych metod stanowi kompromis umożliwiający optymalizację charakterystyki elementu.

W przypadku komunikacji unipolarnej jedno z wyprowadzeń strony pierwotnej transformatora dołączone jest do potencjału odniesienia. Zmiany stanu logicznego sygnału wejściowego są kodowane za pomocą impulsów, które mają zawsze dodatnią polaryzację względem poziomu odniesienia po stronie nadajnika. Metoda ta jest również określana nazwą „jeden impuls-dwa impulsy”, ponieważ narastające

zbcze sygnału wejściowego jest kodowane za pomocą dwóch następujących po sobie impulsów, a opadające zbcze – za pomocą pojedynczego impulsu. Odbiornik po drugiej stronie bariery izolacyjnej odbiera impulsy i podejmuje decyzje, czy został przesłany jeden impuls, czy dwa i na tej podstawie odtwarza przebieg wejściowy.

Różnicowa metoda przesyłania danych wykorzystuje transformator w rzeczywisty sposób różnicowy. W tym rozwiązaniu pojedynczy impuls przesyłany jest przy każdym zboczu sygnału wejściowego, ale polaryzacja tego impulsu zależy od tego, czy zbcze sygnału wejściowego było narastające, czy opadające. Odbiornik również jest w pełni różnicowy i aktualizuje stan wyjścia na podstawie polaryzacji impulsu.

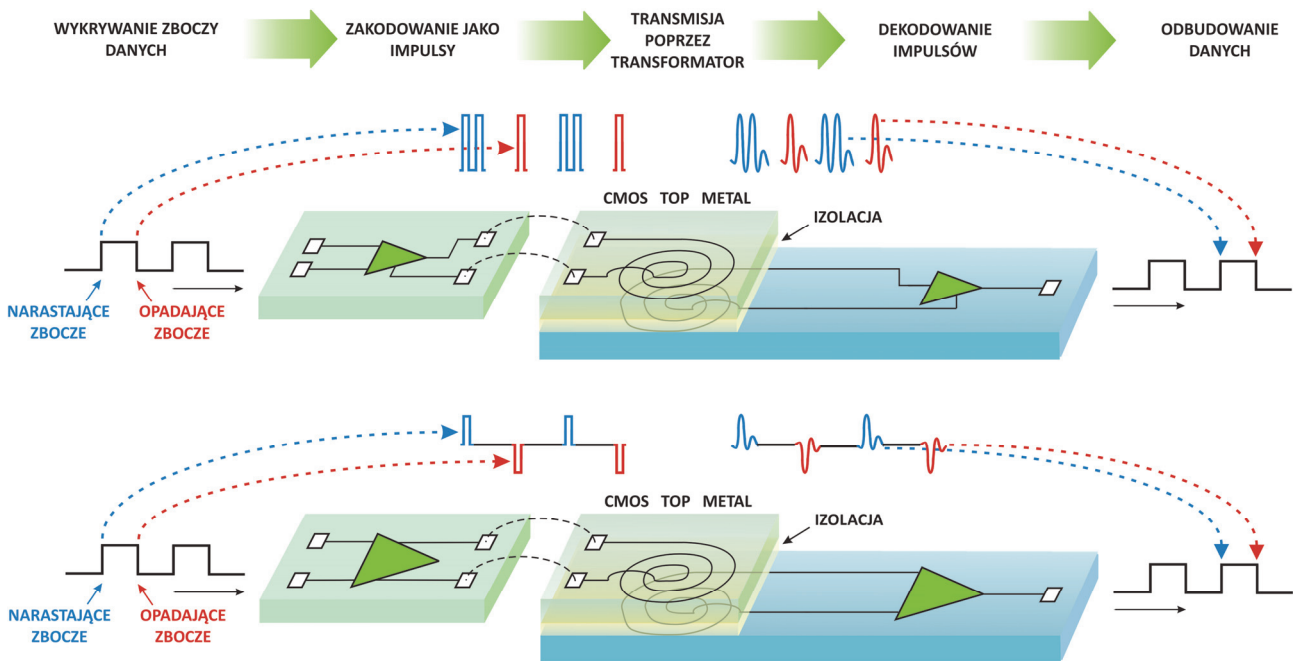
Jedną z głównych zalet rozwiązania unipolarnego jest niższy pobór energii przy małej szybkości przesyłanych danych. Jest to spowodowane tym, że różnicowy odbiornik potrzebuje większego prądu polaryzacji w porównaniu z bramką CMOS z wejściem Schmitta wykorzystywaną w rozwiązaniu unipolarnym. Jednakże różnicowe rozwiązanie charakteryzuje się niższym poborem energii przy wyższych szybkościach transmisji, co jest spowodowane dwiema przyczynami: mniejszym poziomem wysterowania i mniejszą liczbą impulsów. Poziom wysterowania transformatora może być zredukowany, ponieważ odbiornik musi określić tylko polaryzację zamiast obecności pojedynczego albo podwójnego impulsu. Uśredniając, unipolarne rozwiązanie potrzebuje 1,5 impulsu na zbcze, podczas gdy rozwiązanie różnicowe potrzebuje jednego impulsu na zbcze (redukcja o 33%).

Zmniejszony poziom wysterowania i mniejsza liczba impulsów również obniżają emisję promieniowaną. Emisja jest generowana poprzez ścieżki obwodów drukowanych podczas pobierania impulsów prądu ze źródła zasilania. Ponieważ układy wykorzystujące rozwiązanie różnicowe przesyłają mniej impulsów i energia każdego impulsu jest mniejsza, to promieniowana emisja jest znacząco niższa.

Układy z różnicowym przesyłaniem danych posiadają jeszcze dwie inne zalety nad układami z przesyłaniem unipolarnym: krótszy czas propagacji oraz odporność na zaburzenia. Pojedyncze i podwójne impulsy w układach unipolarnych muszą być wytworzone w odpowiedniej zależności czasowej, a odbiornik musi analizować te impulsy w określonym oknie czasowym. Wymagania te narzucają ograniczenia czasowe na kodowanie i dekodowanie, co ostatecznie wpływa na opóźnienie propagacji sygnału w separatorze. Stanowi to ograniczenie całkowitej przepustowości, jaką element może osiągnąć.

Rozwiązanie różnicowe ma mniej ograniczeń, ponieważ zawsze jest wykorzystywany pojedynczy impuls, opóźnienia propagacji są mniejsze i przepustowość większa.

Ponieważ odbiornik różnicowy niezawodnie wykrywa różnicowe sygnały wysyłane przez nadajnik, rozwiązanie to eliminuje niepożądane zakłócenia o charakterze sumacyjnym, które są typowe w układach z separacją, co znacząco zwiększa odporność na krótkotrwałe zaburzenia sumacyjne (CMTI). Różnicowy odbiornik jest również mniej podatny na zaburzenia zasilania, co także poprawia odporność układów na zaburzenia. Diody LED wykorzystywane w transoptorach są z natury zasilane unipolarnie, co skutkuje niższą odpornością CTMI, jaką charakteryzują się transoptory. Różnicowe przesyłanie danych zapewnia dodatkowe zalety separatorów *iCoupler* w odniesieniu do transoptorów. Obydwa sposoby kodowania przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Porównanie kodowania za pomocą liczby impulsów i za pomocą polaryzacji impulsów (oprac. wł. na podst. [3])

Tabela 2.

Porównanie cech różnych sposobów kodowania w układach *iCoupler* [1]

Kodowanie za pomocą liczby impulsów	Kodowanie za pomocą polaryzacji zbroczy (różnicowe)
– bardzo niskie zużycie energii przy małej szybkości przesyłanych danych	– niższe zużycie energii przy wysokich częstotliwościach, – wyższe zużycie energii przy niskich częstotliwościach
– krótki czas propagacji	– krótszy czas propagacji
– duża szybkość transmisji	– większa szybkość transmisji
– wysoka odporność na zaburzenia o charakterze sumacyjnym („common mode”)	– lepsza odporność na zaburzenia
	– mniejsza liczba przesyłanych impulsów
	– niższa emisja
– sprzężenie niezależne od grubości izolacji	

Metodologia przesyłania danych jest jednym ze środków przy optymalizacji wydajności cyfrowych separatorów. Dysponując elementem z rzeczywistym, różnicowym sprzężeniem opartym o technologię *iCoupler*, można zapewnić dużą elastyczność w tym zakresie, niedostępną zwykle dla rozwiązań opartych na transoptorach czy sprzężeniu pojemnościowym [3].

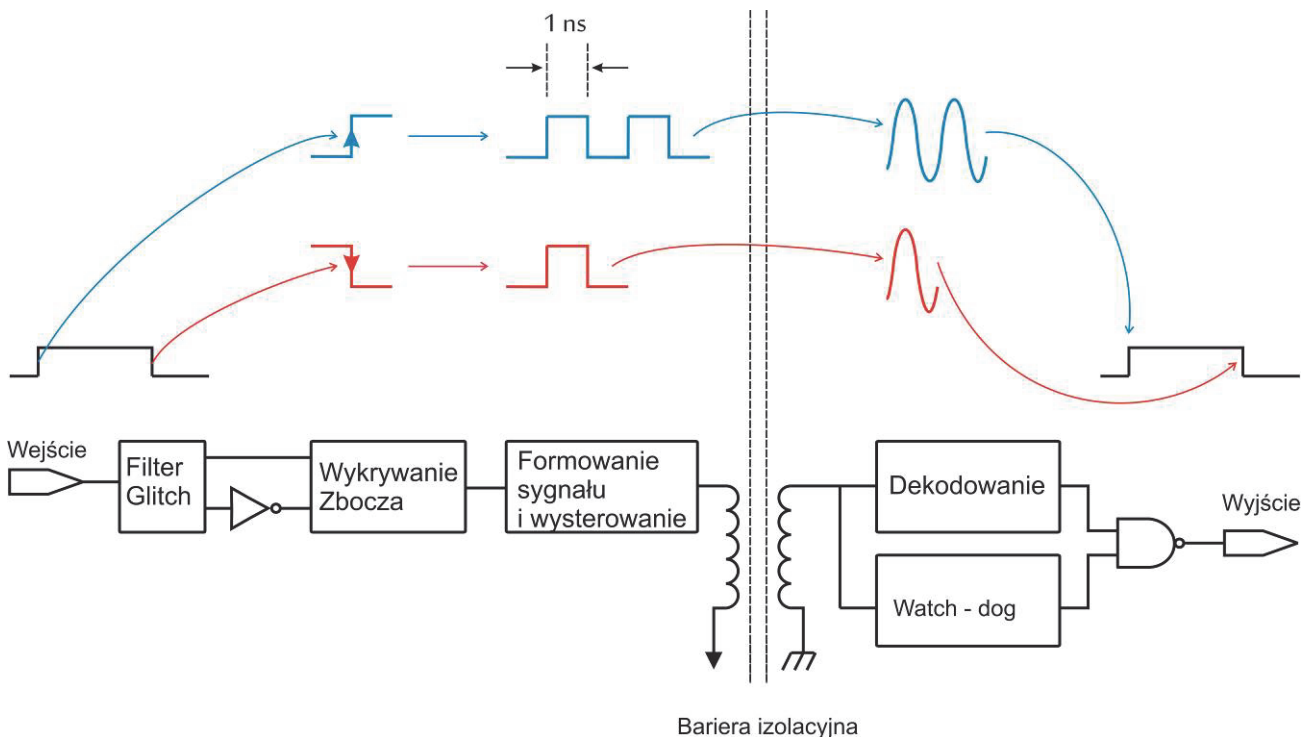
Każdy ze sposobów kodowania danych charakteryzuje się odmiennymi właściwościami i lepiej sprawdza się w określonych zastosowaniach. Zestawienie charakterystycznych cech kodowania za pomocą liczby impulsów i kodowania różnicowego zamieszczono w tab. 2.

Szczegółowy opis kodowania za pomocą liczby impulsów

Dla zapewnienia spójności danych i odporności na zakłócenia w technologii *iCoupler* na wejściu są stosowane filtry glitch, co podyktowane jest ograniczeniem szkodliwych skutków szumów na każdym wejściu linii sygnału.

Celem przesłania danych przez barierę izolacyjną w separatorach cyfrowych wykonanych w technologii *iCoupler* dane są kodowane za pomocą krótkich impulsów jednonanosekundowych. Zbocza narastające sygnału wejściowego kodowane są jako dwa kolejne impulsy, a zbocza opadające – jako pojedyncze

impulsy. Obwód odbiornika dekoduje te impulsy oraz na ich podstawie odtwarza po stronie wtórnej zbocza narastające i opadające. Ten rodzaj kodowania przy użyciu wąskich impulsów w standardzie CMOS zużywa o rząd wielkości mniej energii niż transoptory, które stale pobierają energię w czasie włączenia diody LED. We wszystkich separatorach cyfrowych *iCoupler* obwód odświeżania ponawia ostatni impuls danych, jeśli w ciągu 1 μs nie następuje zmiana stanu sygnału wejściowego. Rozwiązanie to zapewnia poprawność wartości stałej podczas załączania i gwarantuje korekcję błędów danych w zakresie 1 μs. Produkty *iCoupler* zawierają również rozwiązanie „fail-safe” dające pewność, że wyjście domyślnie przyjmuje stan bezpieczny w przypadku zaniku zasilania po stronie wejściowej. Znajdujący się po stronie wtórnej timer „watchdog” ustawia na wyjściu bezpieczny stan domyślny w przypadku braku nowych danych lub impulsów odświeżania w okresie 3 μs. Każdy układ posiada domyślny stan wyjścia, stały albo ustawialny. Ma to na celu ochronę układów dołączonych do wyjścia przed błędnymi stanami, które mogłyby doprowadzić do uszkodzenia [4]. Opisany sposób kodowania za pomocą liczby impulsów przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Kodowanie za pomocą liczby impulsów (oprac. wł. na podst. [5])

W wielu separatorach cyfrowych sprzężonych pojemnościowo sposób działania jest bardzo podobny do transoptora. W tych elementach, aby wysłać sy-

gnał poprzez parę kondensatorów różnicowych, jest wykorzystywana wysoka częstotliwość generatora. Generator podobnie jak diody transoptora zużywa

energię, kiedy jest włączony, wysyłając stan aktywny, i nie zużywa energii, kiedy jest wyłączony, wysyłając stan recesywny. Odbiornik posiada aktywny wzmacniacz, który zużywa energię dla zapewnienia prądu polaryzacji niezależnie od odbieranego stanu. Jak pokazano w tab. 1., z powodu wysokiej wydajności sprzężenia kondensatorów łączny pobór prądu jest znacznie niższy niż w przypadku optoizolatora.

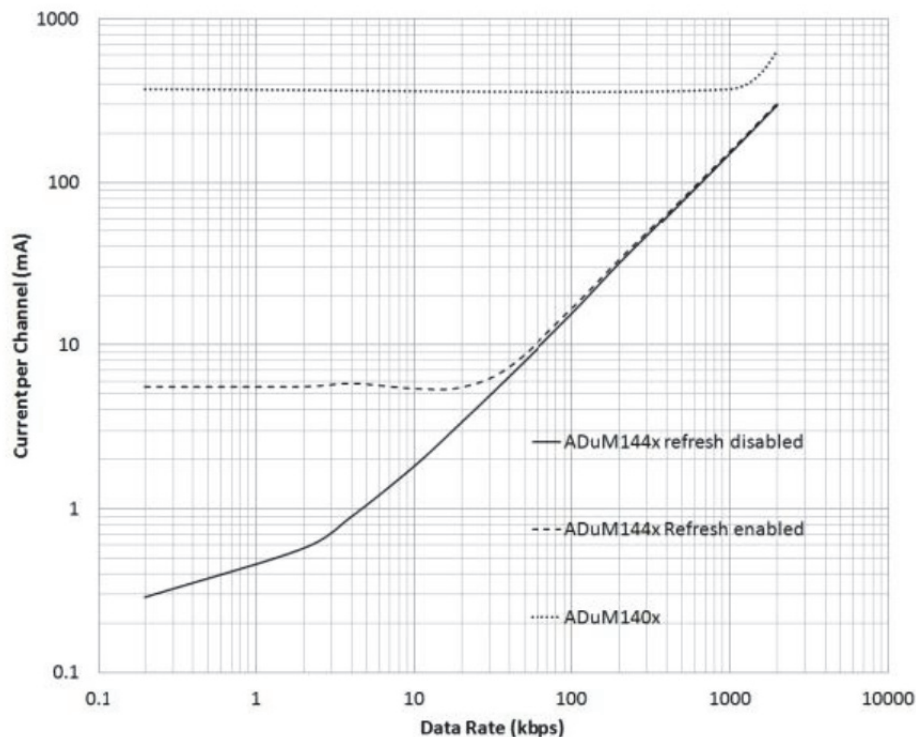
Należy zauważyć, że poziom mocy w separatorach cyfrowych będzie zbliżony, jeśli zastosuje się sprzężenie indukcyjne zamiast sprzężenia pojemnościowego. W tym przypadku ma znaczenie przede wszystkim sposób kodowania, który określa minimalny poziom mocy, szczególnie przy niskich szybkościach transmisji danych.

Separatory cyfrowe oparte o technologię *iCoupler* Analog Devices, takie jak z serii ADuM140x, wykorzystują sposób kodowania za pomocą liczby impulsów.

Impulsy te są pewne i pozwalają uzyskać dobry współczynnik sygnału do szumu, ale są bardzo krótkie (tylko 1 nS czasu trwania), zatem energia przypadająca na impuls jest niewielka. Rozwiązanie to sprawdza się dobrze, gdy linie danych nie zmieniają stanu, stan wyjścia jest wówczas utrzymywany w przerzutniku i energia prawie nie jest zużywana. Oznacza to, że zużycie energii jest po prostu energią dostarczaną do strumienia impulsów, scałkowaną w czasie, powiększoną o energię niezbędną dla prądu polaryzacji. Wraz ze spadkiem szybkości transmisji

danych moc spada liniowo aż do wartości stałej. Należy podkreślić, że jest to sposób kodowania, który zapewnia zmniejszenie zużycia energii, a niezwiązany z konkretnym medium transmisji danych. Sposób ten może być realizowany w układach pojemnościowych lub nawet optycznych.

Samo rozwiązanie z kodowaniem impulsów nie stanowi idealnego środka zapewniającego niski pobór energii. Jego wadą jest to, że jeżeli nie ma zmian stanu logicznego na wejściu, to żadne dane nie są wysyłane na wyjście. Oznacza to, że jeżeli istnieje różnica poziomu składowej stałej wynikająca z sekwencji startowej, to stan logiczny wyjściowy może nie być zgodny ze stanem wejściowym. W układach serii ADuM140x rozwiązano ten problem poprzez zastosowanie „watchdoga” po stronie wejściowej, który wysyła ponownie stan wejścia, jeśli nie wykryto na nim aktywności przez ponad 1 μ S. Rezultatem takiego rozwiązania jest to, że ten sposób kodowania nie umożliwia zmniejszenia zużycia energii, gdy szybkość transmisji danych jest mniejsza niż 1 Mbps. Element ten pracuje efektywnie przy szybkości transmisji co najmniej 1 Mbps, więc zużycie energii nie zmniejsza się przy niższych szybkościach transmisji danych. Mimo to sposób kodowania impulsów zapewnia niższe średnie zużycie energii w porównaniu do systemów wykorzystujących stały poziom, jak pokazano w tab. 1.



Rys. 6. Całkowity pobór prądu na jeden kanał dla układów ADuM144x i ADuM140x przy $V_{dd} = 3.3$ V [2]

Sposób kodowania impulsowego w separatorach serii ADuM140x został zoptymalizowany dla wysokiej szybkości transmisji danych, a nie dla względnie najniższego zużycia energii. Ten sposób kodowania posiada znaczny potencjał do dalszego zmniejszenia mocy, szczególnie w zakresie szybkości transmisji od DC do 1 Mbps. W tym zakresie szybkości transmisji znajduje się zdecydowana większość układów separacji, zwłaszcza te, w których istotny jest niski pobór energii.

W czterokanałowych (ADuM144x) i dwukanałowych (ADuM124x) rodzinach układów opartych o technologię iCoupler zostały wprowadzone następujące innowacje:

1. Został realizowany w technologii CMOS niższego napięcia;
2. Wszystkie obwody polaryzacji zostały zweryfikowane i tam, gdzie to było możliwe, polaryzacja została zminimalizowana lub wyeliminowana;
3. Częstotliwość odświeżania obwodu została zmniejszona z 1 MHz do 17 kHz;
4. Obwód odświeżania może być całkowicie wyłączony dla zapewnienia najniższego możliwego zużycia energii.

Zużycie prądu w zależności od częstotliwości w odniesieniu do separatorów serii ADuM140x jest przedstawione na rys. 6.

Kolano krzywych z powodu odświeżania można łatwo zobaczyć dla 1 Mbps dla separatorów serii ADuM140x i dla 17 kbps dla separatorów serii ADuM144x, kiedy odświeżanie jest włączone. ADuM144x ma typowy pobór prądu na kanał 65 razy niższy dla 1 kbps i około 1000 razy niższy, jeśli odświeżanie jest całkowicie wyłączone [2].

5. PODSUMOWANIE

Istotną różnicę w stosunku do stosowanych dotychczas rozwiązań wykorzystujących sprzężenia pojemnościowe i indukcyjne do przesyłania sygnałów dwustanowych stanowi zintegrowanie w jednym elemencie wszystkich układów przetwarzania, formowania, kodowania i dekodowania. W dotychczasowych rozwiązaniach powyższe układy były realizowane w oparciu o elementy dyskretne, co wiązało się z większą zawodnością, na ogół gorszymi uzyskiwanymi parametrami funkcjonalnymi, większą zajmowaną powierzchnią obwodu drukowanego, większą zużywaną energią oraz większymi kosztami.

W przypadku urządzeń iskrobezpiecznych rozwiązania bazujące na elementach dyskretnych pozwalają jednak zastosować sam element separujący (trans-

formator albo kondensatory) o odpowiednich parametrach i konstrukcji zgodnych z normą PN-EN 60079-11 [7]. Możliwe jest wówczas zastosowanie takiej separacji do oddzielenia obwodów iskrobezpiecznych od nieiskrobezpiecznych. Wymagania dla kondensatorów zawarte są w punkcie 8.6.1 normy, a dla transformatorów – w punkcie 8.3.

Optymalnym dla urządzeń iskrobezpiecznych rozwiązaniem byłoby zintegrowanie w elemencie scalonym wyłącznie wszystkich układów przetwarzania, formowania, kodowania i dekodowania, podczas gdy sam element separujący pozostałby nadal elementem dyskretnym. Wówczas separacja składałaby się z układów scalonych formowania sygnału po obu jej stronach, pomiędzy którymi znajdowałyby się nieuszkodzalne w rozumieniu normy elementy separujące.

Opisane sposoby kodowania są możliwe do zaimplementowania również w separacji optycznej światłowodowej. W przypadku umieszczenia światłowodu w strefie zagrożonej wybuchem jest konieczne spełnienie wymagań normy PN-EN 60079-28 [8]. Takie układy scalone mogłyby być tańsze w opracowaniu i produkcji, byłyby również znacznie prostsze technologicznie (nie zawierałyby elementów separacji, których realizacja w strukturze układu scalonego zawsze jest kłopotliwa). Parametry takiej separacji na pewno nie byłyby tak wysokie jak układu scalonego, ale korzyści w postaci redukcji poboru energii i minimalizacji układu separacji byłyby znaczne. Rynek rozwiązań dla urządzeń iskrobezpiecznych prawdopodobnie jest jednak zbyt mały, aby opracowanie takich układów było opłacalne dla któregoś z producentów.

Literatura

1. Analog Devices iCoupler and isoPower Isolation Products Overview. The World Leader in High Performance Signal Processing Solutions, April 2013.
2. Cantrell M. Ultralow Power Opening Applications to High Speed Isolation MS-2644 -2014 Analog Devices.
3. Carr D. Differential Data Transfer: What's the Difference? – 2012 Analog Devices.
4. Digi-Key Corporation, iCoupler [online], dostępny w Internecie: <http://dkc1.digikey.com/no/en/tod/ADI/icoupler-technology/icoupler-technology.html> (dostęp: listopad 2014).
5. Krakauer D. Anatomy of a Digital Isolator MS-2234 October 2011 Analog Devices.
6. Molenda T., Chmielarz S.: *Iskrobezpieczeństwo a kompatybilność elektromagnetyczna – wybrane zagadnienia*. „Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa”, 2012, nr 8(498).
7. PN-EN 60079-11:2012. *Atmosfera wybuchowe. Cz. 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa „i”*.
8. PN-EN 60079-28:2010. *Atmosfera wybuchowe. Cz. 28: Zabezpieczenie urządzeń oraz systemów transmisji wykorzystujących promieniowanie optyczne*.
9. Texas Instruments Digital Isolator Design Guide SLLA284 – January 2009.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.