

Separacja galwaniczna sygnałów analogowych

Artykuł poświęcony jest zagadnieniom związanym z separacją galwaniczną obwodów analogowych i sposobom jej realizacji. Opisano w nim sprzężenia pojemnościowe, indukcyjne i optyczne, separację z zastosowaniem przetwarzania oraz linearyzację charakterystyk elementów optoelektronicznych. Przedstawiono dostępne rozwiązania i ich właściwości.

słowa kluczowe: separacja galwaniczna, układy analogowe, PWM, linearyzacja

1. WSTĘP

Analiza rozwiązań stosowanych w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat w urządzeniach wyposażonych w interfejsy analogowe pozwala zaobserwować wyraźną tendencję do redukcji części analogowej tych urządzeń do niezbędnego minimum. Dzięki rozwojowi i dostępności przetworników AC i CA, procesorów sygnałowych i układów logiki programowalnej przetwarzanie, obróbka i przesyłanie realizowane są w coraz większym obszarze zastosowań w postaci cyfrowej. Ta sama tendencja dotyczy również układów separacji sygnałów, w szczególnych przypadkach jednak nadal zachodzi potrzeba realizacji separacji sygnałów analogowych. Realizacja układowa separacji obwodów analogowych, przede wszystkim ze względu na wymaganą liniowość, stanowi zwykle większą trudność niż w przypadku sygnałów dwustanowych. Stosowane rozwiązania uzależnione są od parametrów separowanych sygnałów (np. wymagana dokładność, liniowość, pasmo częstotliwości, amplituda) i wymagań dotyczących samej separacji (np. wymagane odstępki izolacyjne, wytrzymałość napięciowa) oraz funkcji, jaką ona spełnia.

2. SPRZĘŻENIA INDUKCYJNE I POJEMNOŚCIOWE

Najczęściej wykorzystywane rodzaje sprzężenia – pojemnościowe i indukcyjne – są liniowe oraz posiadają określone amplitudowe i fazowe charakterystyki

przenoszenia w funkcji częstotliwości. Charakterystyki sprzężeń wynikają z samych zastosowanych do ich realizacji elementów oraz reaktancji pasożytniczych, a ponadto sprzężenia te nie przenoszą składowej stałej. Jeżeli zatem separowany sygnał analogowy zawiera składową stałą i składowe wolnozmiennne i/lub charakterystyka przenoszenia sprzężenia nie pozwala przesyłać tego sygnału bezpośrednio ze względu na jej zbyt nierównomierny przebieg, jest konieczne stosowanie modulacji sygnałem wejściowym przebiegu nośnego po stronie pierwotnej i demodulacji po stronie wtórnej separacji. Dzięki temu jest możliwe takie przesunięcie w dziedzinie częstotliwości widma separowanego sygnału, przy którym stosunek jego szerokości do częstotliwości nośnej jest odpowiednio mały oraz odpowiada takiemu zakresowi częstotliwości, przy którym przebieg charakterystyk przenoszenia sprzężenia jest akceptowalnie równomierny. Rodzaj modulacji i demodulacji oraz odpowiednie rozwiązanie układowe różnią się w zależności od konkretnego przypadku, zawsze jednak wiążą się z większą komplikacją układową oraz z większym zapotrzebowaniem na energię.

W praktycznych rozwiązaniach częstotliwość nośnej jest zwykle większa niż 100 kHz, a częstotliwości przenoszonych sygnałów sięgają dziesiątek kHz. Ze względu na właściwości fizyczne, takie jak spadek pojemności sprzężenia wraz ze zwiększaniem odległości pomiędzy okładkami kondensatora oraz spadek indukcyjności wzajemnej wraz ze zwiększaniem odległości pomiędzy cewkami strony pierwotnej i wtórnej separacji, możliwości uzyskania wymaganych odstępów izolacyjnych i wytrzymałości na przebicie mogą być ograniczone. Postęp technologii

umożliwił realizację zarówno separacji indukcyjnej, jak i pojemnościowej wewnątrz analogowych układów scalonych. W przypadku scalonych, izolowanych wzmacniaczy instrumentalnych wykorzystanie do realizacji sprzężenia wewnętrznych transformatorów pozwala zachować rozdzielczość 12 do 16 bitów i pasmo przenoszenia do kilkuset kHz, ale ich maksymalne napięcie rzadko przekracza 10 kV, a często jest niższe. Scalone wzmacniacze wykorzystujące wewnętrzne sprzężenie pojemnościowe charakteryzują się niższą dokładnością, co najwyżej do 12 bitów, mniejszym pasmem przenoszenia i niższymi maksymalnymi napięciami, ale koszty ich wytworzenia są mniejsze. Separatory optyczne są szybkie, mają niskie koszty realizacji i wysokie napięcia (typowo od 4 do 7 kV), ale ze względu na znaczną nieliniowość nie są stosowane do bezpośredniej separacji analogowej wymagającej dużej dokładności [1].

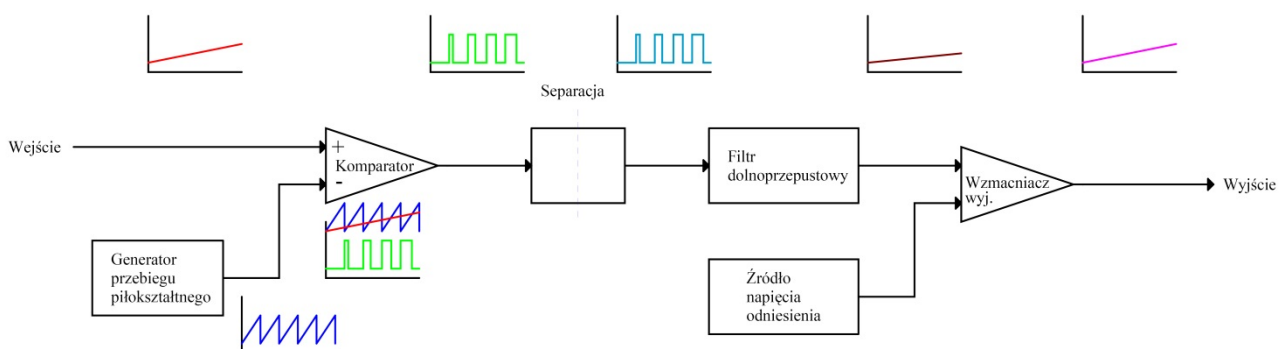
3. SPRZĘŻENIA OPTYCZNE

Na rynku dostępnych jest wiele różnych rodzajów elementów optoizolacyjnych. Najbardziej rozpowszechnionym z nich jest element zawierający diodę LED i fototranzystor. W roli fotodetektorów wykorzystywane są również optotryistory, optotriaki oraz tranzystory FET. Ich głównym zastosowaniem jest zapewnienie separacji sygnałów dwustanowych i pod takim względem zwykle zoptymalizowane są ich pa-

rametry, np. niewielkie czasy opóźnień, czy możliwość bezpośredniej współpracy z układami logicznymi. Uwzględniając aspekty istotne dla separacji analogowej, separujące elementy optoelektroniczne mogą przenosić składową stałą, zwykle jednak ich stałoprądowe charakterystyki przenoszenia są nieliniowe. Stosowane są dwa alternatywne sposoby wykorzystania nieliniowych elementów optoelektronicznych do separacji sygnałów analogowych: separacja z zastosowaniem przetwarzania oraz separacja z zastosowaniem linearyzacji charakterystyk elementów.

3.1. Separacja z zastosowaniem przetwarzania

Rozwiązaniem pozwalającym na użycie elementów optoelektronicznych o nieliniowej charakterystyce do przesyłania sygnału analogowego jest wykorzystanie ich w taki sposób, aby pracowały dwustanowo, przy zastosowaniu modulacji amplitudą sygnału analogowego szerokości przesyłanych impulsów o stałej częstotliwości (PWM) albo częstotliwości przesyłanych impulsów o stałej szerokości. Wadą tego rozwiązania jest większa komplikacja układu po stronie pierwotnej i wtórnej, natomiast istotną zaletę stanowi możliwość ograniczenia poboru mocy poprzez pracę przy minimalnym, wystarczającym do tego celu poziomie amplitudy. Przykładowy schemat blokowy układu separacji analogowej z przetwarzaniem przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu separacji analogowej z przetwarzaniem

3.2. Separacja z zastosowaniem linearyzacji charakterystyk elementów

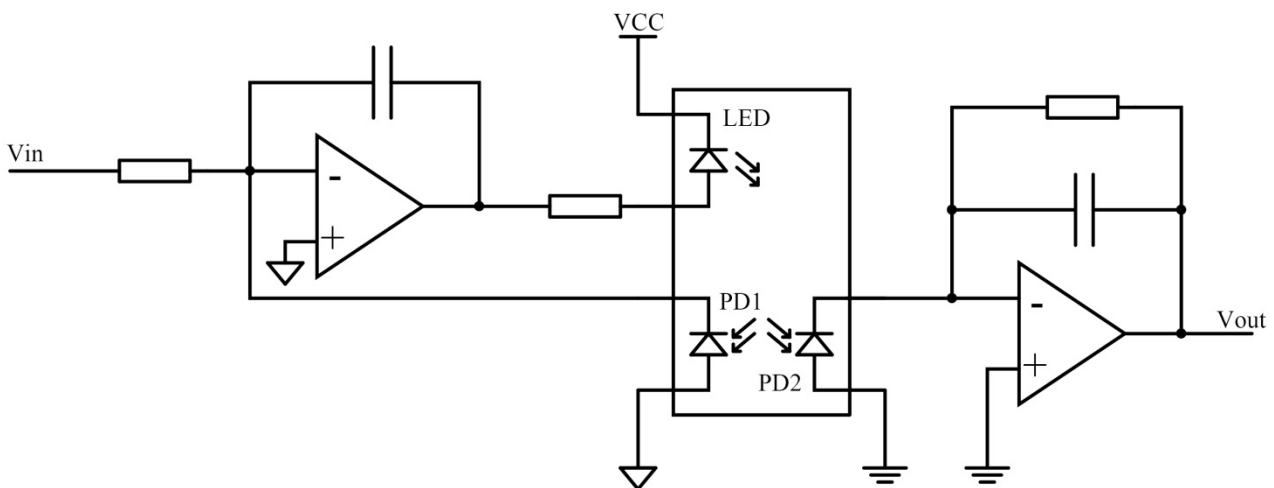
Elementy optoelektroniczne pozwalają zrealizować zarówno separację z wykorzystaniem przebiegu nośnego, jak też bez niego, ponieważ przenoszą one składową stałą i składowe wolnozmiennne. Wówczas jednak konieczne staje się zapewnienie liniowości charakterystyki amplitudowej przenoszenia w wyma-

ganym zakresie pracy. Do linearyzacji charakterystyk elementów optoelektronicznych stosowane są zarówno układy ze sprzężeniem w przód (ang. *feedforward*), jak też ze sprzężeniem zwrotnym (ang. *feedback*). Przy takim rozwiązaniu dokładność linearyzacji wynika głównie z podobieństwa charakterystyk elementów, a nie tylko z głębokości sprzężenia zwrotnego, co jest typowe dla układów ze sprzężeniem zwrotnym w ogólności.

4. KOMPENSACJA NIELINIOWOŚCI

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych optoizolatorów liniowych jest układ zawierający w swojej strukturze po stronie pierwotnej diodę LED i fotodiodę PIN sprzężenia zwrotnego, a po stronie wtórnej – wyjściową fotodiodę PIN. Dioda LED jest sprzężona optycznie z separowaną wyjściową fotodiodą PIN oraz separowaną fotodiodą sprzężenia zwrotnego. Fotodioda sprzężenia zwrotnego oświetlana jest przez niewielką część strumienia świetlnego diody LED, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie sygnału sprzężenia zwrotnego, wykorzystywanego do regulacji prądu wysterowania diody LED. Rozwiązanie to pozwala kompensować nieliniowość charakterystyki diody LED oraz czasową i termiczną zmienność tej charakterystyki, co stanowi bardzo istotną zaletę w porównaniu z układami kompensacji bazującymi wyłącznie na podobieństwie charakterystyk odpowiednio połączonych, osobnych elementów. Na wyjściowej fotodiodzie PIN uzyskiwany jest sygnał liniowo zależny od sterującego strumienia świetlnego wytworzonego przez diodę LED. Stabilność czasowa i temperaturowa współczynnika sprzężenia wyjścia z wejściem jest zapewniona poprzez zastosowanie dopasowanych fotodiod PIN, których prąd dokładnie odpo-

wiada strumieniowi świetlnemu diody LED. Fotodioda w tym układzie może być wykorzystywana, jako element fotowoltaiczny albo jako element fotoprzewodzący (ang. *photoconductive*). Przy wykorzystaniu fotodiody, jako elementu fotowoltaicznego pracuje ona jako źródło prądowe, analogicznie jak dioda półprzewodnikowa spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Wartości prądu i napięcia wyjściowego zależą wtedy od rezystancji obciążającej oraz strumienia świetlnego. Przy wykorzystaniu fotodiody, jako elementu fotoprzewodzącego jest ona wstępnie spolaryzowana w kierunku zaporowym przez zewnętrzne źródło. Wartość prądu wyjściowego jest wówczas proporcjonalna bezpośrednio do strumienia świetlnego [12]. Jedną z korzyści, jakimi charakteryzuje się wykorzystanie diody, jako elementu fotoprzewodzącego, jest możliwość uzyskania szerszego pasma przenoszenia, rzędu 200 kHz, w porównaniu do pasma rzędu 40 kHz możliwego do uzyskania przy wykorzystaniu diody jako elementu fotowoltaicznego [7]. Przykładowe układy tego rodzaju to zgodne pod względem wyprowadzeń IL300 produkcji VISHAY oraz HCNR200 i HCNR201 produkcji AVAGO. Podstawowy układ pracy wzmacniacza separującego sygnał unipolarny z wejściem i wyjściem dla napięć dodatnich przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Podstawowy układ pracy wzmacniacza separującego sygnał unipolarny z wejściem i wyjściem dla napięć dodatnich (na podstawie [3])

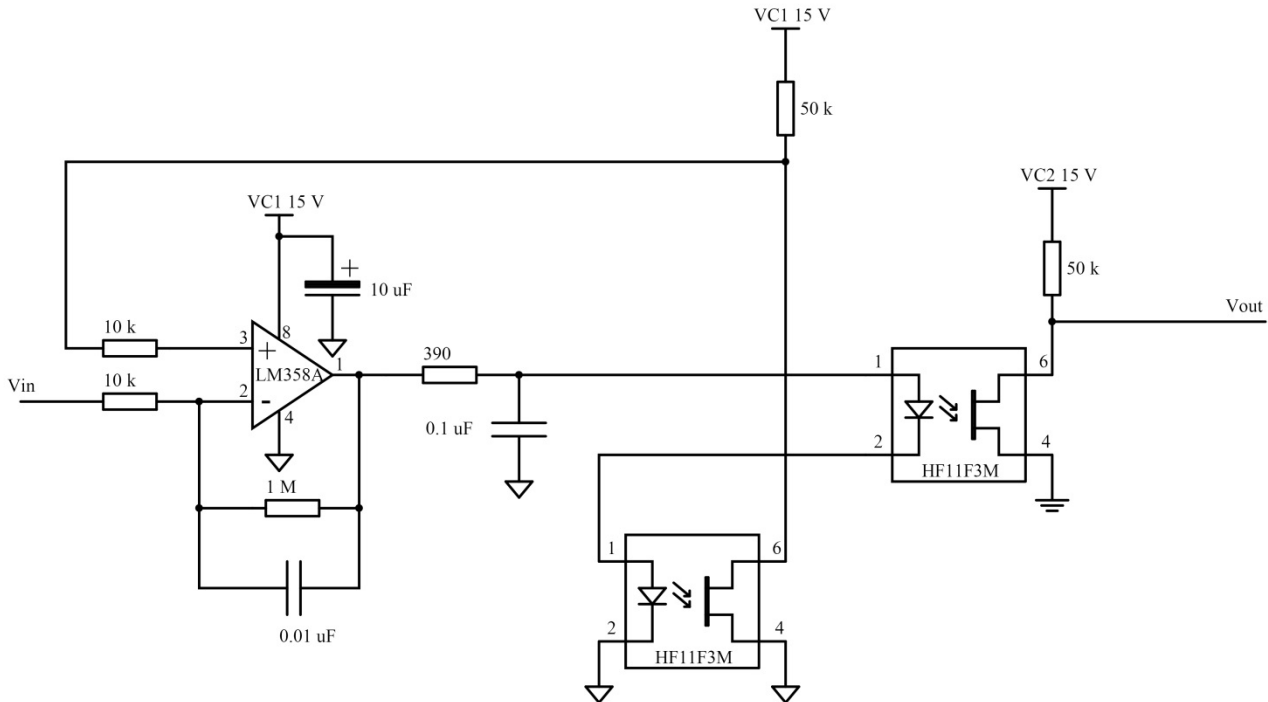
Dzięki prostej strukturze wewnętrznej układ jest bardzo uniwersalny pod względem funkcjonalnym i może być wykorzystywany w licznych konfiguracjach przedstawionych w karcie katalogowej [3].

W transoptorach analogowych wykorzystywane są również diody IRED i symetryczne, dwustronne fototranzystory FET, na przykład w transoptorach

serii H11FxM. Element ten może być wykorzystywany, jako rezystor z separowanym sterowaniem, jak również wyłącznik analogowy [6]. W celu uniknięcia zniekształceń sygnału, spowodowanych nieliniowością charakterystyki rezystancji wyjściowej w funkcji prądu diody IRED, elementy te mogą być wykorzystywane przy odpowiednio niewielkim zakresie

zmian jego amplitudy. Możliwe jest również zastosowanie ich do separacji sygnałów o większym zakresie amplitudy dzięki wykorzystaniu układu sprzężenia zwrotnego w celu skompensowania nieliniowości, w którym zastosowane są dwa transoptory tego typu. Przez szeregowo połączone diody LED obydwu transoptorów płynie wówczas

ten sam prąd, przy czym jeden z nich wykorzystywany jest do realizacji separacji, a wyjście drugiego pracuje w układzie sprzężenia zwrotnego układuysterowującego diody [5]. Przykład powyższego zastosowania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Układ kompensacji nieliniowości charakterystyki transoptora wykorzystujący podobieństwo charakterystyk (na podstawie [5])

Należy jednak zaznaczyć, że taki sposób kompensacji opiera się jedynie na podobieństwie charakterystyk, zatem ze względu na minimalne różnice charakterystyk zastosowanych elementów, nawet pochodzących z tej samej serii produkcyjnej, dokładność linearyzacji jest ograniczona. Korzystniejszym sposobem kompensacji jest opisane powyżej, dedykowane rozwiązanie ze zintegrowanymi w jednym elemencie dwoma fotodetektorami: jednym do realizacji separacji i drugim, przeznaczonym do realizacji sprzężenia zwrotnego. Sprzężenie w tym przypadku następuje poprzez rzeczywisty strumień świetlny, padający jednocześnie na fotodetektor wyjściowy i fotodetektor sprzężenia zwrotnego.

Rozwiązaniem w przypadku sprzężenia optycznego analogowego jest również transoptor ze stopniem wejściowym w postaci diody LED i wyjściowym w postaci komórki fotoprzewodzącej. Elementy te działają jak elektrycznie sterowany potencjometr, którego elementem wyjściowym jest rezystor. Napięcie na tym rezystorze może być złożone, DC i/lub AC, a amplituda może zawierać się pomiędzy

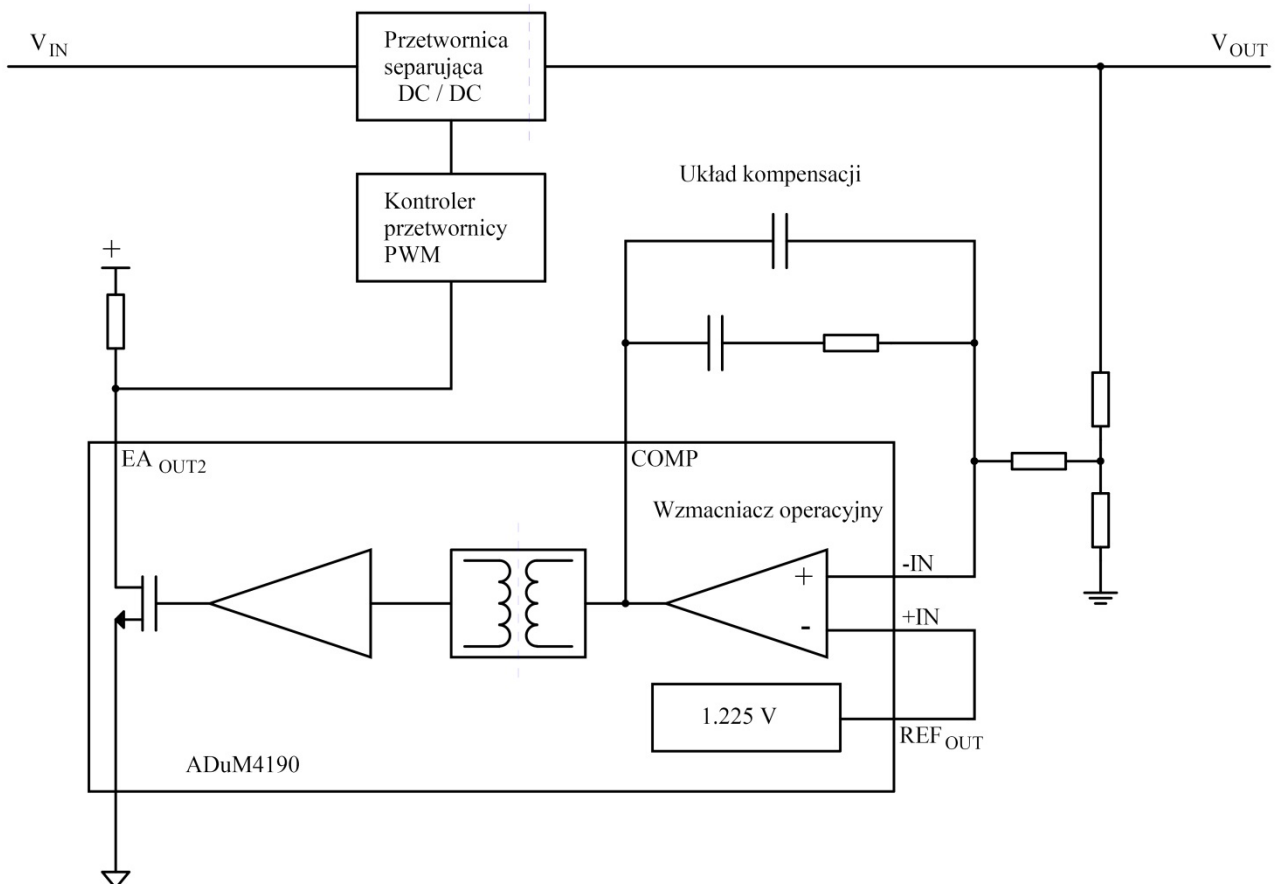
0 a wartością maksymalną, wynikającą z parametrów dopuszczalnych. Ponieważ wejście wpływa na amplitudę złożonego przebiegu na wyjściu w sposób proporcjonalny, element ten może spełniać funkcję analogowego elementu sterującego z separacją optyczną. Charakterystyka przenoszenia tego typu transoptora (rezystancja wyjściowa w zależności od prądu wejściowego) posiada duży zakres dynamiczny, a w dodatku rezystancja wyjściowa zmienia się w sposób zbliżony do liniowego w zakresie dwóch lub więcej dekad. Elementy tego typu przejawiają jednak niekorzystną cechę, którą jest zjawisko histerezy, efekt pamięci, polegający na tym, że rezystancja wejściowa zależy nie tylko od aktualnej wartości chwilowej prądu wejściowego, ale również od wartości, jaką wcześniej prąd ten przez dłuższy czas przyjmował. Czynnikiem determinującym charakterystykę histerezy, charakterystykę zależności rezystancji od temperatury, nachylenie charakterystyki przenoszenia i czas odpowiedzi jest materiał zastosowany w wyjściowym fotorezystorze. Stosując

transoptory tego rodzaju, należy uwzględnić występowanie powyższych zależności [10].

5. DOSTĘPNE NA RYNKU GOTOWE ROZWIĄZANIA

Separacja obwodów analogowych jest realizowana również całkowicie wewnątrz struktury układów scalonych. Firma Analog Devices wykorzystuje do realizacji izolowanego wzmacniacza błędów ADuM4190, dedykowanego głównie do zastosowań w sprzężeniu zwrotnym impulsowych układów zasilania, technologię iCoupler, wykorzystaną wcześniej w bogatej ofercie separatorów cyfrowych [2, 4]. Do realizacji sprzężenia zwrotnego w przetwornicach powszechnie wykorzystywane są transoptory, których współczynnik przenoszenia zmienia się z czasem oraz pod wpływem temperatury. Zastosowanie wzmacniacza z separacją, którego charakterystyka nie zmienia się pod wpływem tych czynników, umożliwi uzyskanie lepszej odpowiedzi impulsowej, większej gęstości mocy i poprawy stabilności sterowanego nim układu zasilania. In Układ charakteryzuje się szerokim zakresem napięć zasilania stron pierwotnej i wtórnej, od 3 do 22 V, szerokością pasma 400 kHz,

zakresem temperatur pracy od 40 do 125°C oraz wytrzymałością izolacji 5000 V rms. Napięcie odniesienia dla wzmacniacza błędów o dokładności 1% jest zapewnione przez wewnętrzne, precyzyjne źródło 1,225 V. Wejścia odwracające i nieodwracające wzmacniacza po stronie pierwotnej są dostępne na zewnątrz celem dołączenia napięcia sprzężenia zwrotnego z wyjścia sterowanej przez układ izolowanej przetwornicy przez odpowiedni dzielnik napięciowy. Wyjście tego wzmacniacza również jest dostępne na zewnątrz, co umożliwi dołączenie elementów kompensacji RC. W strukturze układu napięcie wyjściowe wzmacniacza po stronie pierwotnej wykorzystywane jest do modulowania szerokości impulsów przesyłanych przy wykorzystaniu transformatora separującego, analogicznie jak w separatorach cyfrowych iCoupler. Po stronie wtórnej sygnał PWM jest przetwarzany na napięcie sterujące wyjściowym wzmacniaczem błędów, którego sygnał wyjściowy dostępny jest po stronie wtórnej zarówno bezpośrednio, jak i poprzez dodatkowy tranzystorowy stopień wyjściowy [2]. Zastosowanie oraz funkcjonalny schemat blokowy wzmacniacza ADuM4190 przedstawiono na rys. 4.

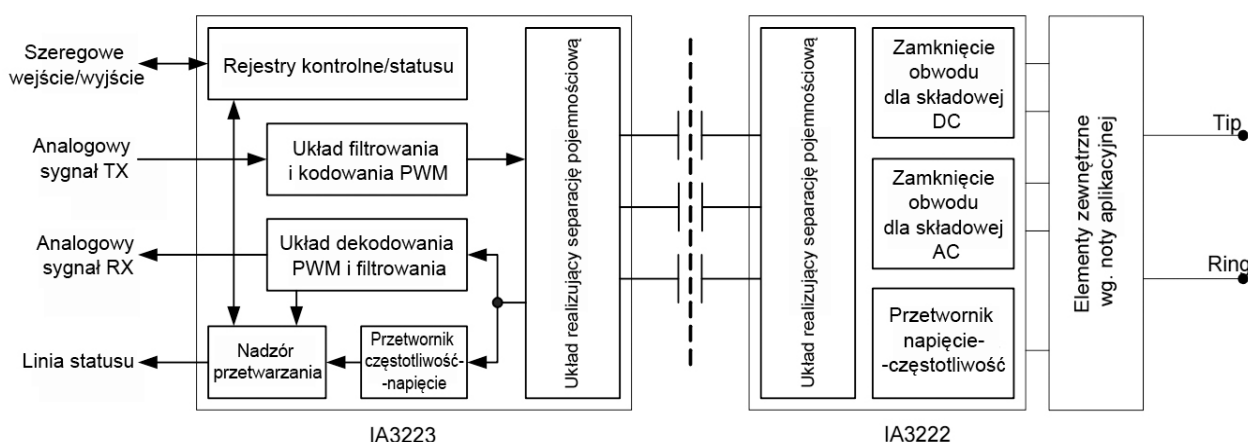


Rys. 4. Zastosowanie oraz funkcjonalny schemat blokowy wzmacniacza ADuM4190 (na podstawie [2])

6. SEPARATION IN TELEPHONE AND WARNING SYSTEMS

W aplikacjach takich jak urządzenia i systemy iskrobezpieczne, wymagających zachowania odstępów izolacyjnych niemożliwych do uzyskania wewnątrz układów scalonych, bardzo praktycznym rozwiązaniem są dedykowane układy interfejsów,

przystosowane do dołączenia zewnętrznych, dyskretnych elementów separujących. Przykładem takiego rozwiązania są układy scalone IA3222 i IA3223 firmy Silabs [11], pozwalające zrealizować separowany interfejs linii telefonicznej. Funkcjonalny schemat blokowy interfejsu z zastosowaniem tych układów przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Funkcjonalny schemat blokowy interfejsu z zastosowaniem układów IA3222 i IA3223 [11]

Sprzężenie pojemnościowe, będące separacją galwaniczną pomiędzy układem kodeka IA3223 a układem interfejsu liniowego IA3222, stanowią trzy kondensatory o pojemności nominalnej 0,7 pF, umieszczone w odpowiednich liniach pomiędzy układami. Bardzo niewielka wymagana pojemność sprzężenia znacząco ułatwia zapewnienie wymaganych odstępów izolacyjnych. Układy te stosowane są do galwanicznej separacji sygnałów analogowych z dwukierunkową transmisją w systemach łączności telefonicznej i alarmowej, przykładowo w barierach TBI firmy COMONET. Tak jak w przypadku bariery opisanej w rozdz. 2., bariera ta realizuje nie tylko separację galwaniczną dla dwukierunkowej separacji sygnałów analogowych, ale również transmituje sygnały, np. zamknięcia pętli, czy zmianę biegunowości zasilania [8].

7. PODSUMOWANIE

Separacja sygnałów analogowych jest bardziej skomplikowana niż separacja sygnałów cyfrowych. Występuje obecnie silna tendencja do przeprowadzania konwersji analogowo cyfrowej sygnału oraz rea-

lizacji separacji po stronie cyfrowej. Wraz ze wzrostem liczby kanałów analogowych koniecznych do odseparowania uwidaczniają się zalety realizacji separacji po stronie cyfrowej, ponieważ pozwala ona przesyłać szeregowo jednym separowanym kanałem cyfrowym dane z większej liczby kanałów analogowych, które w innym przypadku wymagałyby osobnego układu separacji dla każdego z nich albo zastosowania modulacji i różnych częstotliwości nośnych dla poszczególnych kanałów przy jednym układzie separacji. Pomimo szybkiego rozwoju techniki cyfrowej, w niektórych zastosowaniach rozwiązania analogowe związane z separacją nadal są jednak wykorzystywane. Na przykład w aplikacjach wymagających działania ciągłego i jednocześnie niskiego poboru energii łatwiej osiągnąć powyższe założenia, stosując niskomocowy układ analogowy z separacją, niż np. procesor sygnałowy albo układ FPGA i realizując separację sygnału w postaci cyfrowej. Innym obszarem ich zastosowań, ze względu na możliwość zapewnienia minimalnych czasów zadziałania, są układy zabezpieczeń, których realizacja z przetwarzaniem, separacją i analizą po stronie cyfrowej wprowadzałaby zbyt duże opóźnienia. Dostępne na rynku elementy pozwalają dobrać rozwiązanie separacji analogowej stosownie do potrzeb.

Literatura

1. Analog Devices Inc. Engineeri: *Linear Circuit Design Handbook*, 1st Edition, 10.04.2008, pp. 2.33.
2. Analog Devices Inc.: *High Stability Isolated Error Amplifier Data Sheet ADuM4190*, Rev. 0 2013.
3. Avago Technologies: *High-Linearity Analog Optocouplers Data Sheet HCNR200 and HCNR201*, 01.07.2014.
4. Chmielarz S., Molenda T.: *Nowoczesne technologie separacji galwanicznej sygnałów cyfrowych i ich przewidywane zastosowania w urządzeniach iskrobezpiecznych*. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 3(523), 2015, 59-67.
5. Haidar S.: *Use a photoelectric-FET optocoupler as a linear voltage-controlled potentiometer* [online], dostępny w Internecie: <http://www.edn.com/design/analog/4368893/Use-a-photoelectric-FET-optocoupler-as-a-linear-voltage-controlled-potentiometer>.
6. Fairchild Semiconductor Corporation: *Photo FET Optocouplers Data Sheet H11F1M, H11F2M, H11F3M*, Rev. 1.0.5 2007.
7. IXYS Integrated Circuits Division: *LOC Series Linear Optocouplers Application Note: AN-107*, 10.09.2013.
8. Miśkiewicz K., Wojacek A., Dzierżko J.: *Nowe elementy systemu telekomunikacyjnego HETMAN*. Mechanizacja i Automatyza-cja Górnictwa 10(452), 2008, pp. 36-41
9. Miśkiewicz K., Wojacek A.: *System telefonii iskrobezpiecznej TELOS*. Mechanizacja i Automatyza-cja Górnictwa 10(441), 2007, pp. 28-32
10. PerkinElmer Optoelectronics: *Photoconductive Cells and Analog Optoisolators (Vactrols®)*, CA-274 Rev A 1001 2001.
11. Silicon Laboratories Inc.: *DAA Chipset with Analog Interface Data Sheet IA3222/23*, Rev. 5.0 2011.
12. Vishay Semiconductors: *Linear Optocoupler, High Gain Stability, Wide Bandwidth Data Sheet IL300*, Revision: 08-Apr-05.

mgr inż. TOMASZ MOLEND
mgr inż. SŁAWOMIR CHMIELARZ
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG