

doi:10.15199/48.2024.12.58

## Precyzyjny dwukanałowy modulator szerokości impulsów z układem próbkująco-pamiętającym

**Streszczenie.** W artykule opisano koncepcje budowy precyzyjnego modulatora szerokości impulsów. Dokonano przeglądu rozwiązań realizujących założoną koncepcję działania przetwornika. Zaprezentowane zostały wyniki symulacji komputerowych działania poszczególnych bloków przetwornika.

**Abstract.** The article describes the concept of building a precise pulse width modulator. A review of solutions implementing the assumed concept of transducer operation was performed. The results of computer simulations of the operation of individual transducer blocks are presented. (**Precise two-channel pulse width modulator with a sampling and hold system**)

**Słowa kluczowe:** modulacja szerokości impulsu, przetwornik napięcie-czas, symulacja komputerowa.

**Keywords:** pulse width modulation, voltage-time converter, computer simulation, electronic system design

### Wstęp

Sygnał o modulowanej szerokości impulsu w skrócie nazywany sygnałem PWM (z ang. pulse width modulation) jest sygnałem powszechnie znanym i wykorzystywanym w wielu dziedzinach techniki [1]. Może on służyć jako nośnik informacji [2]. Zaletą takiego rozwiązania jest duża odporność na zakłócenia. Innym zastosowaniem mogą być systemy sterowania bez sprzężenia zwrotnego. Systemy takie charakteryzują się dużą dynamiką. Do wykorzystania w systemach pomiarowych do modulatorów szerokości impulsów stawiane są wymagania wysokiej dokładności, stabilności oraz liniowości charakterystyki przetwarzania. Przykładowo, takim wymaganiom powinni odpowiadać modulatory stosowane we wzmacniaczach izolacyjnych [3], w których informacja pomiarowa z części wejściowej do części wyjściowej wzmacniacza przekazywana jest za pośrednictwem modulowanych impulsów. Istnieją również inne nie przytoczone tutaj implementacje sygnału o zmiennej szerokości impulsu.

Aby możliwe było wykorzystanie modulatora szerokości impulsów do zastosowań metrologicznych wymagane jest aby spełniał on określone wymagania. Mianowicie, powinien precyzyjnie modulować szerokość impulsów, które mają stały okres powtórzenia i można określić momenty czasu w których rozpoczynają się impulsy, a trwałość impulsów wyjściowych powinna odpowiadać wartości sygnału wejściowego w tych momentach czasowych. Oprócz tego, proces modulacji szerokości impulsów nie powinien powodować przerw w przetwarzaniu sygnału wejściowego. Ponadto, modulator powinien zapewnić odporność na zakłócenia szumowe w sygnale wejściowym, w szczególności zakłócenia okresowe pochodzące od sieci elektroenergetycznej. Dodatkowym wymaganiem jest odpowiednia dynamika pracy modulatora.

W artykule opisano projekt modulatora szerokości impulsów sterowany napięciowym sygnałem wejściowym. Wykorzystanie całkujących układów próbkująco-pamiętających jest jednym z rozwiązań mających na celu zapewnienie odpowiedniego poziomu odporności na zakłócenia szumowe. Ponadto przedstawiono różne koncepcje rozwiązań układów spełniających opisane założenia. Dostępne na rynku rozwiązania bazują w dużej mierze

Zastosowanie dwóch kanałów w jednym modulatorze wymusza zastosowanie dodatkowych elementów, takich jak układ cyfrowy łączący dwa ciągi impulsów wyjściowych w jeden, układ generatora sygnałów synchronizujących pracę obu kanałów i układy generowania dwóch sygnałów referencyjnych. Ze względu na stosunkową złożoność modulatora autor postanowił podzielić cały układ na bloki funkcjonalne. Schemat blokowy modulatora - Rys. 2.

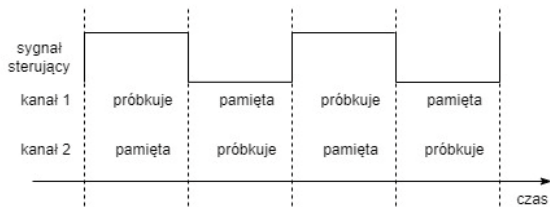
na znanym układzie timera 555. Jest to uniwersalny układ czasowy, produkowany przez różne firmy, posiadający wiele zastosowań- [4], [5]. Schematy układów elektronicznych podawane są przez producentów jako przykłady aplikacji układu w dokumentacji technicznej układu 555 [6] i opisywane w różnych źródłach, na przykład [7]. Drugą grupę przetworników stanowią dedykowane układy scalone. Układy takie mają zastosowanie między innymi w obszarze automotiv [8].

Przedstawione rozwiązania oferują dokładność rzędu kilku % i charakteryzują się istotną nieliniowością funkcji modulacji. Z tego powodu nie jest możliwe użycie ich w zastosowaniach metrologicznych lub w systemach sterowania wymagających dużej dokładności. Dlatego autor zaproponował układ przetwornika o lepszej dokładności i liniowości, który dodatkowo charakteryzuje się większą odpornością na szum w sygnale wejściowym.

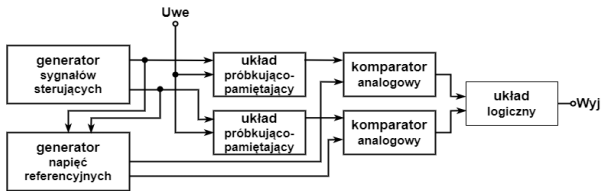
### Koncepcja budowy modulatora

Żeby zapewnić formowanie trwałości impulsów wyjściowych odpowiadających wartościom zmiennego sygnału wejściowego  $U(t_i)$  w okresie momenty czasowe ( $t_i = i \cdot T$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ,  $T$  – jest okresem) modulator powinien zawierać układ próbkująco-pamiętający. Układ taki zbudowany jest na bazie wzmacniacza operacyjnego, co zapewnia odpowiednią impedancję wejściową całego przetwornika- [9], [10]. Można także wykorzystać gotowe układy scalone dostępne na rynku na przykład układ serii LFX98x [11]. Następnie napięcie próbkowane porównywane jest z liniowo narastającym i opadającym napięciem referencyjnym w komparatorze analogowym. Sygnał na wyjściu komparatora jest ciągiem impulsów o zmiennym czasie trwania  $\tau_i$ , zależnym od napięcia wejściowego  $U(t_i)$ :  $\tau_i = k_m \cdot U(i \cdot T)$ , gdzie  $k_m$  jest współczynnikiem modulacji szerokości impulsów. Zastosowanie całkującego układu próbkująco-pamiętającego może zapewnić tłumienie szumów w sygnale wejściowym [12].

Ze względu na zasadę działania przetwornika próbkująco-pamiętającego, sygnał przez pewien czas jest pobierany a następnie przez kolejny odcinek czasu zapamiętywany. Czas, w którym można dokonać porównania w komparatorze jest ograniczony. Aby zwiększyć ilość informacji zawartej w sygnale wyjściowym oraz zmniejszyć ilość traconych informacji o sygnale wejściowym, a także zwiększyć dynamikę przetwornika zastosowano dwa kanały przetwarzające. Kanały działają w przesunięciu w fazie względem siebie jak pokazano to na Rys. 1. W stanie „pamięta” napięcie jest porównywane z napięciem referencyjnym.



Rys. 1. Stany pracy dwukanałowego modulatora

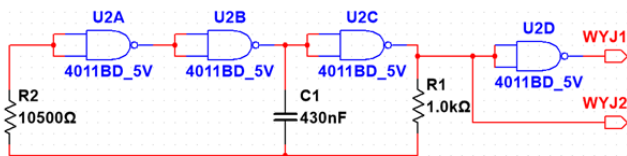


Rys. 2. Schemat blokowy modulatora

Układ generujący napięcie referencyjne (przebieg trójkątny) jest synchronizowany z układami próbkująco-pamiętającymi sygnałem z generatora sygnałów sterujących. Ponieważ występują tutaj dwa kanały, zdecydowano się na zastosowanie dwóch przebiegów sterujących. Są to przebiegi prostokątne o wypełnieniu 50% i przesunięte w fazie o 180°. Ponieważ elementy modulatora występują parami możliwe jest zastosowanie „podwójnych” elementów, na przykład w postaci jednego układu scalonego zawierającego dwa wzmacniacze operacyjne wykorzystywane w roli układów próbkująco-pamiętających lub dwukanałowego układu scalonego próbkująco-pamiętającego. Co w efekcie prowadzi do zmniejszenia różnic przetwarzania sygnałów w obu kanałach poprzez zmniejszenie wpływu, np. temperatury czy różnic produkcyjnych na pracę wzmacniaczy oraz innych elementów. Ogranicza również ilość elementów na obwodzie drukowanym, który jest docelowo planowany jako efekt końcowy prac.

### Symulacja modulatora

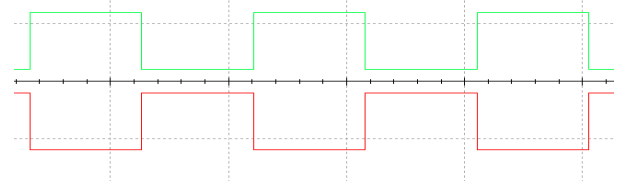
W pierwszym etapie w celu analizy pracy modulatora przeprowadzono szereg symulacji z wykorzystaniem specjalnego oprogramowania tj. LTspice i NI Multisim 14.3 [13], [14]. Obydwa programy służą do symulacji działania obwodów elektronicznych zarówno analogowych jak i cyfrowych. Do modelowania wykorzystywane są modele elementów. Modele takie mogą być dostarczone przez producentów elementów lub przygotowane we własnym zakresie. Standard SPICE jest powszechnie znany i rozwijany od 1972r. [15]



Rys. 3. Schemat generatora przebiegów sterujących – bramki NAND

Jak pokazano na Rys. 2 modulator składa się z kilku bloków funkcyjnych a każdy z nich można zrealizować na różne sposoby. Przedstawiono tutaj wybrane z realizacji i wyniki ich symulacji. Pierwszym opisywanym rozwiązaniem jest generator sygnałów sterujących/synchronizujących działanie pozostałych bloków zrealizowany na układach logicznych – bramkach NAND. Bramki takie wykonywane w technologii TTL lub CMOS produkowane są w postaci zestawu kilku bramek w jednej obudowie. Przykładem takiego układu scalonego może być układ 4011 zawierający

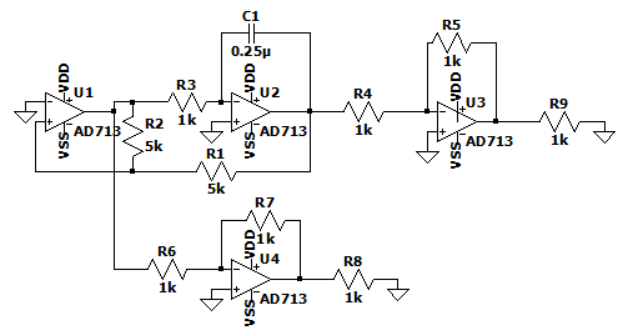
4 bramki NAND. Bramki wraz z dodatkowymi elementami – kondensator i rezystory tworzą generator przebiegu prostokątnego. Jest to znana w literaturze konfiguracja generatora astabilnego [16]. Tutaj wykorzystano dodatkową bramkę w celu negacji sygnału. Schemat układu i wyniki symulacji pokazano na Rys. 3 i Rys. 4.



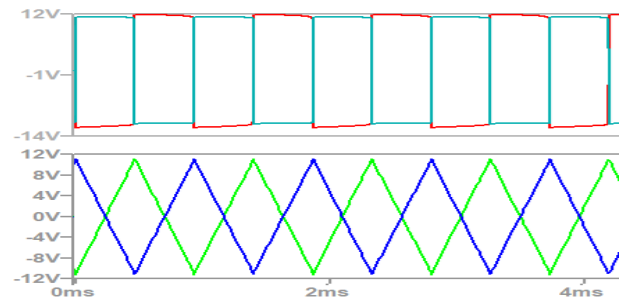
Rys. 4. Wyniki symulacji – generator z bramek NAND

Sygnały wyjściowe z generatora są przesunięte w fazie o 180°, dzięki czemu mogą być bezpośrednio wykorzystane do sterowania modulatorem. Dodatkowo po scałkowaniu, na przykład za pomocą wzmacniacza operacyjnego w układzie integratora sygnały te stają się napięciem referencyjnym dla komparatorów wykorzystywanych w dalszej części układu. Do wad tego rozwiązania należy zaliczyć kłopotliwy dobór elementów R i C od wartości których zależy częstotliwości generowanych sygnałów. Trudne do realizacji może okazać się dobranie takich wartości rzeczywistych elementów aby otrzymać żądaną częstotliwość która jest kluczowa dla precyzyjnego określania punktów czasu do których można przypisać impuls. Ponadto generowanie napięć referencyjnych wymaga użycia dodatkowych elementów.

Innym rozwiązaniem pozwalającym na zmniejszenie liczby elementów elektronicznych użytych do budowy modulatora szerokości impulsów jest wykonanie generatora na bazie wzmacniaczy operacyjnych. Obecnie dostępne są na rynku układy scalone integrujące nawet 4 wzmacniacze operacyjne w jednej obudowie [17]. Taki układ pozwala na znaczącą redukcję elementów i ścieżek na obwodzie drukowanym modulatora. Schemat układu i wyniki symulacji sygnałów sterujących oraz sygnałów referencyjnych pokazano na Rys. 5 i Rys. 6.

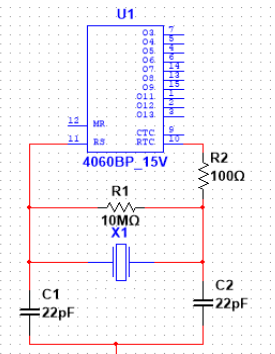


Rys. 5. Schemat generatora przebiegów sterujących i napięć odniesienia



Rys. 6. Wyniki symulacji sygnałów sterujących i referencyjnych – generator zbudowany ze wzmacniaczy operacyjnych

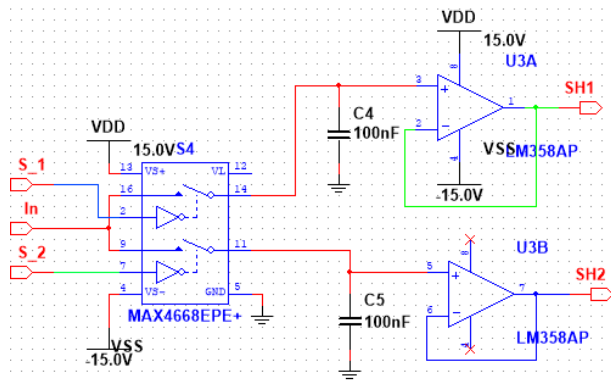
Proponowane tutaj rozwiązanie ogranicza liczbę elementów lecz wciąż nie rozwiązuje problemu precyzyjnego określenia momentów czasowych dla impulsów i stabilnej, określonej częstotliwości sygnałów. Dlatego autor proponuje wykorzystanie oscylatora kwarcowego i licznika działającego w roli dzielnika częstotliwości i układu formowania impulsów. Oscylatory kwarcowe posiadają określone na etapie produkcji częstotliwości, częstotliwości te są pewnymi standardowymi wartościami, dlatego aby otrzymać żadaną częstotliwość sygnału należy użyć dzielnik częstotliwości. Przykładowym dzielnikiem wykorzystanym w symulacji był układ CD4060BP [18]. Schemat układu generatora z oscylatorem kwarcowym i licznikiem pokazano na Rys. 7.



Rys. 7. Schemat generatora z oscylatorem kwarcowym i licznikiem

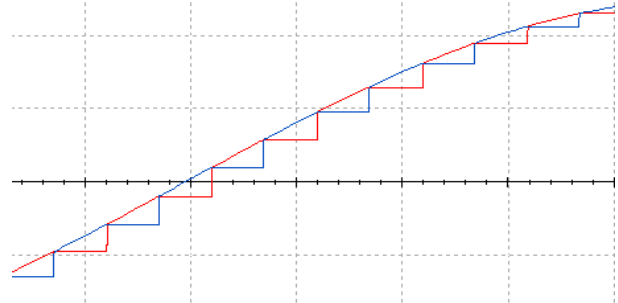
Prezentowany układ jest implementacją schematu z noty katalogowej układu CD4060 [18], [19]. Wykorzystano tutaj oscylator kwarcowy o częstotliwości rezonansu 4,096 MHz i jeden z dzielników, dzielnik +4096 dzięki czemu otrzymano sygnał o częstotliwości 1 kHz. W celu wygenerowania drugiego przebiegu sterującego wykorzystano bramkę NAND. Tak jak wcześniej to opisano sygnały referencyjne dla komparatorów otrzymać można po scałkowaniu sygnałów prostokątnych. Jak deklarują producenci oscylatorów, stabilność generowanych sygnałów jest na poziomie 30 ppm [20], co jest wartością wystarczającą dla przedstawionych zastosowań.

Kolejnym symulowanym elementem układu był układ próbkująco-pamiętający. Wykonano symulację dwóch kanałów przetwarzania. Każdy z kanałów składał się z wzmacniacza operacyjnego i kondensatora. Elementem łączącym oba kanały i sterującym pracą wzmacniaczy jest podwójny przełącznik sterowany z opisanych wcześniej źródeł sygnałów. Schemat układu próbkująco-pamiętającego pokazano na Rys. 8, a wyniki symulacji w postaci przebiegu czasowego sygnału na jego wyjściu pokazano na Rys. 9.



Rys. 8. Schemat układu próbkująco-pamiętającego

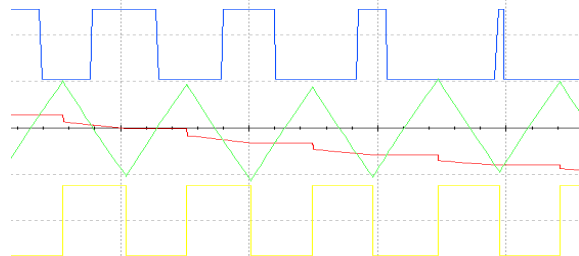
Pokazany na Rys. 8 układ to prosty układ próbkująco-pamiętający zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym [10]. Podczas stanu wysokiego sygnału sterującego ładowany jest kondensator na wejściu WO. W stanie logicznego 0 wysoka impedancja wejściowa wzmacniacza uniemożliwia rozładowanie kondensatora a napięcie na wyjściu wzmacniacza jest równe napięciu kondensatora. Układ działa cyklicznie, dzięki dwóm sygnałom sterującym kanały działają w przesunięciu w fazie co widać na Rys. 9.



Rys. 9. Przebieg czasowy sygnału na wyjściu układów próbkująco-pamiętających

Ze względu na brak modeli SPICE zintegrowanych układów próbkująco-pamiętających nie przeprowadzono symulacji działania takich układów. Można jednak przypuszczać, że działanie tych układów nie będzie w znacznym stopniu różnić się od prezentowanych wyników i nie wpłynie na końcowy wynik symulacji całego modulatora szerokości impulsów.

Przebiegi czasowe napięć dla kanału 1 modulatora pokazano na Rys. 10. Odpowiednio kolorami zaznaczono sygnały: kolor żółty – napięcie sterujące, zielony – napięcie referencyjne, czerwony – napięcie z wyjścia układu próbkująco-pamiętającego i niebieski – wyjście komparatora.



Rys.10. Przebiegi czasowe napięć dla 1 kanału modulatora

Jak można zauważyć impuls na wyjściu komparatora trwa przez zbyt długi czas. Komparator przetwarza napięcie w stanie pamiętania i próbkowania (stan przejściowy), a sygnał użyteczny jest tylko w czasie „pamiętania”, więc kiedy sygnał sterujący jest w stanie niskim. Dodatkowo drugi kanał pracuje w taki sam sposób z przesunięciem o połowę cyklu pracy. Ponieważ są to sygnały cyfrowe, możliwe było zastosowanie układu bramek w celu skrócenia czasu trwania impulsów do pożądanego czasu i dodatkowo połączenia dwóch kanałów w jeden ciąg impulsów. W tym celu stworzono tabelę prawdy dla przetwornika, którą pokazano w tabeli 1. Ponieważ sygnały sterujące są względem siebie negacją, dla uproszczenia w tabeli podano tylko jeden sygnał sterujący.

Tabela 1. Tabela stanów pracy modulatora

K1K2\S1	0	1
00	0	0
01	0	1
11	1	1
10	1	0

W tabeli 1 K1 to sygnał z wyjścia komparatora kanału 1, K2 komparatora w kanale 2, a S1, S2 to sygnały sterujący pracą obydwu kanałów. Po minimalizacji funkcji logicznych za pomocą tablic Karnauga otrzymujemy funkcję stanów modulatora [21]. Wynikiem działania funkcji jest sygnał wyjściowy modulatora.

$$(1) \quad W = K1 \cdot \overline{S1} + K2 \cdot S1$$

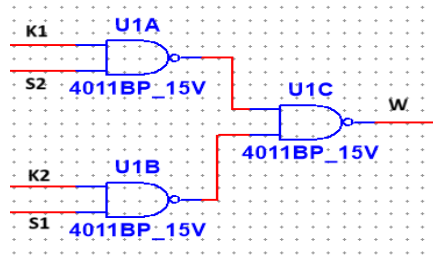
Podstawiając za zanegowany sygnał S1 sygnał S2 otrzymuje się:

$$(2) \quad \overline{S1} = S2$$

który następnie zostaje przekształcony korzystając z prawa podwójnej negacji Bool'a i negacji sumy De Morgana, otrzymując funkcję przetwarzania stanów logicznych modulatora [21].

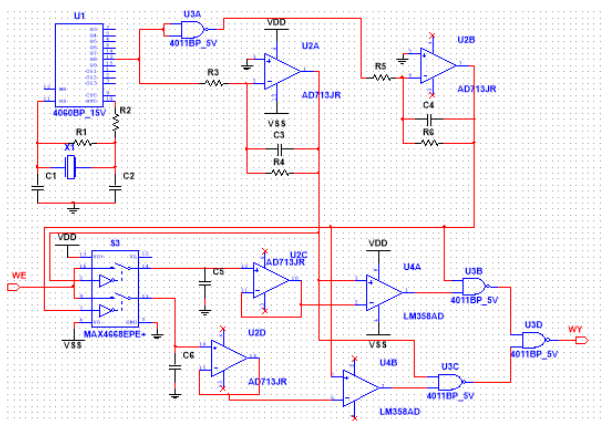
$$(3) \quad W = \overline{K1 \cdot S2 \cdot K2 \cdot S1}$$

Dzięki wykonanym zabiegom możliwa jest realizacja układu z wykorzystaniem tylko trzech bramek NAND. Jest to korzystne ze względu na możliwość wykorzystania jednego układu scalonego zawierającego 4 bramki NAND, takiego jak 4011. Wykorzystanie czwartej bramki NAND zostało opisane przy opisie generatora sterującego z oscylatorem kwarcowym. Na Rys. 11 pokazano fragment schematu z układem bramek realizującym opisywaną funkcję.



Rys. 11. Układ logiczny realizujący funkcję przetwarzania modulatora

Schemat całego układu modulatora pokazano na Rys. 12. Jest to jedna z możliwych realizacji modulatora, w dalszych pracach badawczych planowane jest sprawdzenie czy wybrane elementy spełniają założenia projektu.



Rys. 12. Schemat modulatora szerokości impulsów

### Podsumowanie

Opisane w artykule prace miały na celu zaprojektowanie precyzyjnego modulatora szerokości impulsów z układem próbkująco-pamiętającym. Zaproponowano koncepcję budowy takiego układu oraz wskazano elementy kluczowe dla działania układu. Opisano różne układy realizujące

poszczególne funkcje modulatora i omówiono ich wady i zalety. Praca miała na celu wsparcie procesu projektowania modulatora, co zostało osiągnięte.

Dalsze prace będą polegały na realizacji rzeczywistego układu i wykonaniu pomiarów w laboratorium. W dalszej perspektywie planowane są dalsze badania nad przetwornikiem oraz możliwościami wykorzystania uśredniania wagowego w celu redukcji zakłóceń okresowych.

**Autor:** mgr inż. Piotr Kubiszyn, Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: p.kubiszyn@prz.edu.pl

### LITERATURA

- [1] Kohlhase K., Pulse Width Modulation (PWM): What Is It? How Can I Use It?, dostęp online: <https://www.digikey.pl/pl/blog/pulse-width-modulation>
- [2] Stork M., Using pulse width modulation with carrier frequency changing for transmission of two separate signals. *Analogue Integrated Circuits and Signal Processing* 106(3), (2021), 535–542
- [3] Jasielski J., Kuta S., Stosowane metody zasilania i izolacji galwanicznej sterowników bramkowych tranzystorów mocy w mostkowych stopniach końcowych wzmacniaczy klas D i falowników, *Sci, Tech. Innov.* 2(1), (2018), 31-41
- [4] Mróz M., Układ NE555 – wszystko, co powinienś wiedzieć, (2023), dostęp online: <https://botland.com.pl/blog/uklad-ne555-wszystko-co-powinienes-wiedziec/>
- [5] Górski K., Timer 555 w przykładach, Wydawnictwo BTC, (2004)
- [6] xx555 Precision Timers, Texas Instruments (2014)
- [7] How to Generate PWM Using IC 555 by Swagatam. (2022). dostęp online: <https://www.homemade-circuits.com/how-to-use-ic-555-for-generating-pwm/>
- [8] Switch mode Pulse Width Modulation Control Circuit TL494, NCV494, Onsemi, (2023)
- [9] Pini A., Analog Fundamentals: How Sample and Hold Circuits Work and Ensure ADC Accuracy, dostęp online: <https://www.digikey.pl/pl/articles/analog-fundamentals-sample-and-hold-circuits-work-adc-accuracy>
- [10] Układ Sample/Hold na bazie wzmacniacza operacyjnego, Nowe Technologie, (2022), dostęp online: <https://nerdownia24.pl/nowe-technologie/uklad-sample-hold-na-bazie-wzmacniacza-operacyjnego>
- [11] Texas Instruments LFX98x Monolithic Sample-and-Hold Circuits.
- [12] Dorzhovets M., Kubiszyn P., Weight Averaging of Pulse Width Modulated Signal, Proceedings of the The 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany, 07-09 September 2023, Vol. 1, 362-367
- [13] Brocard G., The Spice XVII Simulator, Swiridoff (2021)
- [14] Noga K. M., Radwański M., Multisim. Technika cyfrowa w przykładach. Wydawnictwo BTC, Legionowo (2009)
- [15] Dobrowolski A., Pod maską SPICE'a. Metody i algorytmy analizy układów elektronicznych. Wydawnictwo BTC, Warszawa (2004)
- [16] Pieńkoś J., Turczyński J., Układy scalone TTL w systemach cyfrowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa (1980)
- [17] Precision, High Speed, BIFET Quad Op Amp AS713, nota katalogowa, Analog Devices
- [18] CMOS 14-Stage Ripple-Carry Binary Counter/Divider and Oscillator, nota katalogowa, Texas Instruments
- [19] Accurate 1 kHz Square Wave Crystal Oscillator Circuit, dostęp online: <https://www.electroniccircuits.com/electronic-circuits/accurate-1-khz-square-wave-crystal-oscillator-circuit/>
- [20] Crystal Resonators, UM-1, Um-4, UM-5, HC-49/T, HC-49/U, HC-50/T, HC-50/U, nota katalogowa
- [21] Traczyk T., Wstęp do teorii algebry Bool'a. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (1970)