

doi:10.15199/48.2015.08.08

Konstrukcje generatorów mocy opracowanych do zastosowań laboratoryjnych

Streszczenie. Generatory mocy małej częstotliwości są wykorzystywane przez studentów w trakcie zajęć laboratoryjnych. W artykule przedstawiono konfiguracje układowe generatorów mocy, opracowanych na potrzeby laboratorium miernictwa i podstaw elektrotechniki. Omówiono budowę i wybrane wyniki badań dwóch opracowanych przyrządów.

Abstract. The low-frequency power generators are used by students during laboratory classes. The article presents the configurations of power generators developed for the laboratories of metrology and fundamentals of electrical engineering. The structures of generators and some selected results of tests of the two elaborated instruments were shown. (*The structures of the power generators designed for laboratory use*).

Słowa kluczowe: generator sygnału, wzmacniacz mocy, zabezpieczenie przeciwzwarciowe, sterownik mikroprocesorowy.

Keywords: signal generator, power amplifier, short circuit protection, microprocessor controller.

Wstęp

Generatory mocy mają liczne zastosowania w dydaktyce prowadzonej na Wydziale Elektrycznym AMG, między innymi w laboratoriach podstaw elektrotechniki i miernictwa. Wykorzystywane są one na stanowiskach laboratoryjnych, na których prowadzi się badania:

- charakterystyk elementów i przyrządów pomiarowych,
- zjawiska ferorezonansu prądów i napięć,
- mostków prądu przemiennego,
- właściwości oscyloskopów.

W tych zastosowaniach niezbędny jest generator sygnału sinusoidalnego o regulowanej amplitudzie, nieprzekraczającej 100 V i mocy wyjściowej nie większej niż 10 W. Parametry te nie są nazbyt krytyczne, jednakże problemem jest brak dostępności niedrogich generatorów o takich właściwościach. Zapotrzebowanie na generatory o podobnych parametrach jest stosunkowo niewielkie, stąd też ograniczona jest ich oferta na rynku. Zasadniczym problemem jest niedostateczna odporność oferowanych urządzeń na zwarcia na wyjściu wzmacniacza mocy. W trakcie zajęć laboratoryjnych sytuacje, w których dochodzi do zwarć zdarzają się sporadycznie i wynikają z reguły z nieostrożności lub niefrasobliwości studentów. Klasycznym przykładem są przypadki równoległego łączenia wyjścia generatora mocy i wyjścia autotransformatora, a następnie próby uruchamiania układu pomiarowego bez akceptacji prowadzącego zajęcia. Przypadki takie zdarzają się rzadko, jednakże nawet pojedyncze zdarzenie tego typu w ciągu semestru eliminuje praktycznie generator z użytkowania na dłuższy czas, nawet na kilka miesięcy.

Generator mocy jest źródłem napięcia sinusoidalnego o stosunkowo dużej mocy wyjściowej. W literaturze można znaleźć klasyfikacje generatorów uwzględniające wartość mocy sygnału wyjściowego P_{wy} . Przykładowo, w [1], ze względu na ten parametr, wyróżnia się generatory:

- małej mocy, dla $P_{wy} \leq 0,1$ W,
- średniej mocy, dla $P_{wy} \leq 10$ W,
- dużej mocy, dla $P_{wy} > 10$ W.

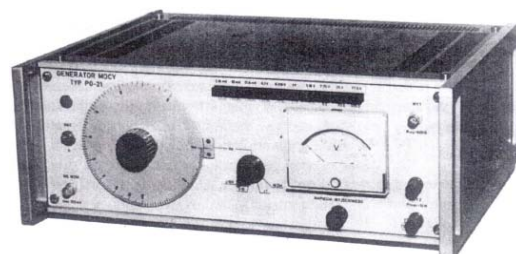
W odnośnych zastosowaniach, obok odporności na zwarcia, najważniejsze wymagania stawiane generatorom odnoszą się do:

- możliwości płynnego przestrajania w określonym zakresie częstotliwości sygnału wyjściowego, jej stabilności oraz odczytu jej bieżącej wartości,
- możliwości regulacji wraz z odczytem napięcia wyjściowego, jak również jego stabilności i

niezależności jego wartości od częstotliwości sygnału,

- niewielkich zniekształceń generowanych przebiegów.

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat w trakcie zajęć wykorzystywano kilka typów generatorów mocy. Najstarszymi urządzeniami były generatory typu PO-21A opracowane przez Kombinat Aparatury Badawczej i Dydaktycznej KABID w Warszawie [2]. Powszechnie przyjmuje się, że sprzęt elektroniczny podlega zużyciu technologicznemu, nie oznacza to jednak konieczności rezygnacji z użytkowania starych, sprawdzonych konstrukcji. Wykorzystywano do dziś jeden egzemplarz wyprodukowanego w roku 1978 (rys. 1). Generator PO-21A umożliwia płynną regulację napięcia wyjściowego w trzech podzakresach, około: 0 - 7,7 V przy rezystancji obciążenia nie mniejszej niż $R_L \geq 6 \Omega$, 0 - 25 V przy $R_L \geq 60 \Omega$ oraz 0 - 77 V przy $R_L \geq 600 \Omega$. Płynna regulacja częstotliwości odbywa się również w trzech podzakresach: 20 - 200 Hz, 200 - 2000 Hz oraz 2 - 20 kHz. Maksymalna moc wyjściowa wynosi 10 W. Wartość skuteczna napięcia wyjściowego podawana jest na wskaźniku analogowym, zaś częstotliwość użytkownik może zgrubnie określić z położenia pokrętki regulacji częstotliwości oraz przełącznika wyboru podzakresu. Generator był wielokrotnie narażony na zwarcia i przeciążenia w obwodach wyjściowych, jednakże za względu na przewymiarowane tranzystory mocy w stopniu wyjściowym oraz zabezpieczenie ich bezpiecznikami topikowymi, uszkodzeniu ulegały jedynie elementy zabezpieczające.



Rys. 1. Widok generatora mocy PO-21A

W ostatnich latach stały się dostępne na rynku niedrogie generatory sygnałowe z wyjściem mocy, oferowane przez tego samego dystrybutora, oznaczone jako JC5603P oraz 1642 [3]. Jak widać z rysunku 2, wizualnie ich obudowy nie różnią się, ponadto mają identyczne parametry zapisane w

kartach katalogowych. Są one w istocie generatorami funkcyjnymi, umożliwiającymi generację trzech rodzajów przebiegów: sinusoidalnego, trójkątnego i prostokątnego. Wartość międzyszczytowa napięcia na wyjściu mocy jest regulowana w zakresie od 0 V do 50 V, zaś maksymalna międzyszczytowa wartość prądu obciążenia wynosi 1 A. Przekroczenie dopuszczalnej wartości prądu jest sygnalizowane za pomocą diody LED. Częstotliwość napięcia na wyjściu mocy jest regulowana w zakresie od 0,1 Hz do 100 kHz.



Rys. 2. Widok płyt czołowych generatorów JC5603P oraz 1642

Jako generatory mocy w zastosowaniach na stanowiskach laboratoryjnych przyrządy te okazały się nieprzydatne ze względu na brak odporności nawet na krótkotrwałe przeciążenia (wbrew zapewnieniom dystrybutora). Spośród kilku egzemplarzy będących w zasobach pracowni, część jest w trakcie naprawy, zaś w odniesieniu do pozostałych – unika się ich użytkowania jako generatorów mocy.

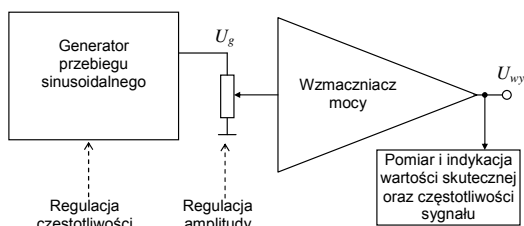
W ramach pracy dyplomowej, zrealizowanej przed kilkoma laty, został zaprojektowany i wykonany generator mocy [4], z wykorzystaniem podzespołów, głównie mechanicznych, uszkodzonego generatora mocy PO-21A. Przyrząd ten jest wykorzystywany w zajęciach laboratoryjnych.

Obecnie na etapie montażu i uruchomienia jest prototyp nowego laboratoryjnego generatora mocy [5]. Jego konfiguracja różni się od konfiguracji poprzednio wykonanego generatora.

W artykule omówione zostaną zasadnicze cechy konstrukcyjne obu opracowanych generatorów oraz wybrane wyniki badań przeprowadzonych dla oceny ich właściwości.

Konfiguracje generatorów mocy

Generatory mocy są urządzeniami wytwarzającymi sygnały okresowe, najczęściej sinusoidalne napięcie U_{wy} , regulowane w określonym zakresie częstotliwości i amplitudy, przy określonej obciążalności prądowej. W konfiguracji generatora mocy można wyróżnić podstawowe bloki funkcjonalne, przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy generatora mocy

Bloki funkcjonalne generatora przebiegu sinusoidalnego mogą mieć różne konfiguracje. Ze względu na sposób generacji sygnału wyjściowego U_g można je podzielić na:

- generatory analogowe,
- generatory z syntezą cyfrową sygnału.

Generatory analogowe w zakresie częstotliwości akustycznych są zwykle realizowane jako układy z dodatkim sprzężeniem zwrotnym dla uzupełniania energii w układzie, przy wykorzystaniu elementów aktywnych

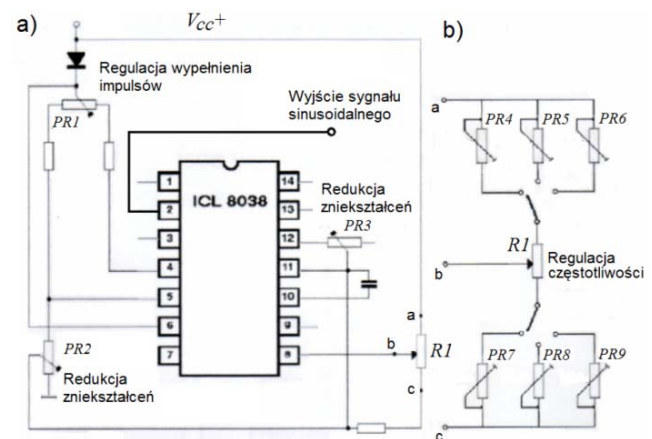
(tranzystory, wzmacniacze operacyjne) oraz elementów pasywnych (R , L , C , rezonatory kwarcowe). Stanowią one grupę klasycznych generatorów sygnałowych.

Bezpośrednia synteza cyfrowa DDS (ang. Direct Digital Synthesis) polega na cyfrowej generacji kolejnych próbek sygnału wyjściowego. Możliwa jest w ten sposób generacja praktycznie dowolnego sygnału, przy spełnieniu warunku Nyquista odnośnie relacji pomiędzy częstotliwością składowych generowanego sygnału i częstotliwością generowanych próbek.

Budowa i wybrane wyniki badań opracowanych generatorów mocy

Doświadczenia wynikające z użytkowania generatorów mocy w laboratoriach studenckich skłoniły do podjęcia próby opracowania oryginalnych konstrukcji przyrządów spełniających wymagania specyfikacji ich zastosowań. W efekcie, w ramach prac dyplomowych wykonano dwa egzemplarze generatorów mocy, różniące się budową i rozwiązaniami funkcjonalnymi. Łączy je zakres generowanych częstotliwości, podzielony na jednakowe podzakresy, jak również odporność stopni wyjściowych na zwarcia. Odporność tą uzyskano dzięki zastosowaniu wzmacniaczy mocy wyposażonych w elektroniczne (termiczne) układy zabezpieczenia przeciwzwarceniowego.

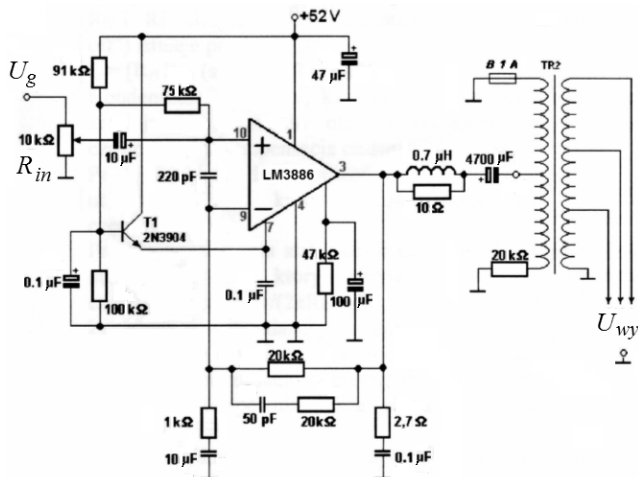
W pierwszej z opracowanych konstrukcji generatorów mocy [4] sygnał wytwarzany jest w układzie analogowym. Wykorzystano do tego układ ICL8038 Intersil [6]. Na rysunku 4.a przedstawiono konfigurację układu ICL8030 w opracowanym generatorze mocy, zaś na rysunku 4.b pokazano układ płynnej regulacji częstotliwości (potencjometr $R1$), z uwzględnieniem podziału pełnego zakresu 20 Hz - 20 kHz na trzy podzakresy: 20 - 200 Hz, 0,2 - 2 kHz oraz 2 - 20 kHz. Granice podzakresów ustalone są za pomocą regulowanych wartości rezystancji potencjometrów montażowych $PR4-PR9$ (rys.4.b). Kształt sygnału wyjściowego jest korygowany z wykorzystaniem potencjometrów montażowych $PR1-PR3$.



Rys. 4. Analogowy generator sygnału: a) układ aplikacyjny układu ICL8038, b) układ wyboru podzakresu i regulacji częstotliwości

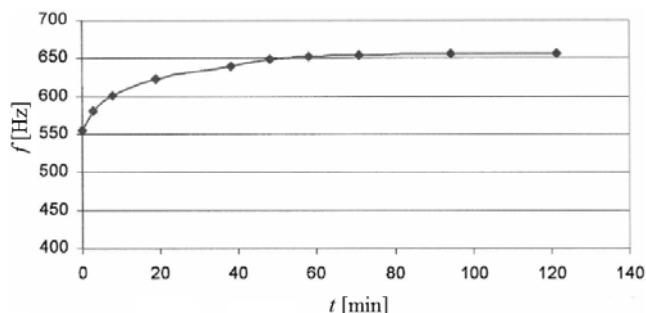
Na rysunku 5 przedstawiono konfigurację układu wyjściowego generatora. Jako stopień końcowy mocy zastosowano scalony wzmacniacz sygnałów audio typu LM3886 [7]. Jego wyjście połączone jest z wejściem transformatora, który odzyskano z uszkodzonego generatora PO21-A. Konfiguracja połączeń w opracowanym generatorze jest zmodyfikowana w stosunku do połączeń wzmacniacza końcowego mocy z takim transformatorem w generatorze PO-21A. Wyjściowe napięcie na wybranym odczepie transformatora można płynnie regulować w podzakresach identycznych jak w

generatorze PO-21A za pomocą potencjometru R_{in} (rys.5). Doświadczenia eksploatacyjne potwierdziły odporność generatora na zwarcia na jego wyjściu.



Rys. 5. Konfiguracja układu wyjściowego analogowego generatora mocy

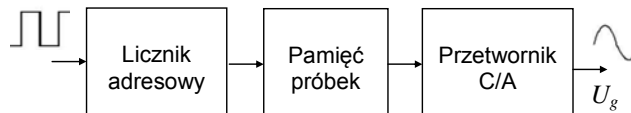
Badania układu wykazały małą stabilność krótkoterminową częstotliwości sygnału wyjściowego U_{wy} . Jak widać na rysunku 6, częstotliwość f sygnału stabilizuje się po czasie $t \approx 60$ min od włączenia zasilania. Wyniki dalszych pomiarów pokazały, że po tym czasie, długoterminowa niestabilność częstotliwości, mierzona w ciągu 7 godzin, nie przekracza wartości $\pm 0,05\%$ wartości nastawionej.



Rys. 6. Niestabilność krótkookresowa generatora mocy z analogowym generatorem sygnałowym

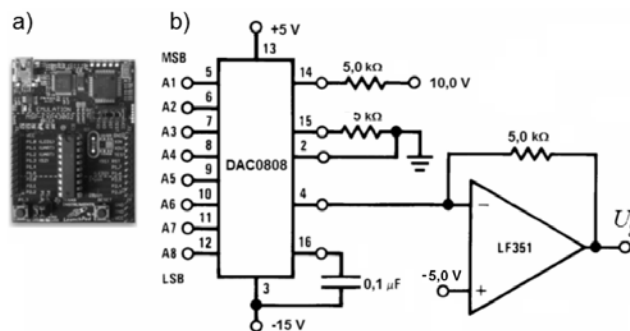
Pomiar częstotliwości sygnału wyjściowego realizowany jest z wykorzystaniem układów CMOS: liczników BCD typu 4553, generatora wzorcowego wraz z dzielnikiem częstotliwości 4060, przerzutników D w układzie 4013 oraz bramek NAND w układzie 4093. Wartości częstotliwości wyświetlane są na układzie sześciu wyświetlaczy LED (wspólna anoda). Wartość skuteczna wyjściowego napięcia generatora mocy mierzona jest z wykorzystaniem woltomierza napięcia stałego typu ICL7101 w oparciu o metodę przetwarzania AC/DC w pomiarze napięcia przemiennego. Przed podaniem na wejście woltomierza, mierzone napięcie sinusoidalne podlega prostowaniu dwupołkownikowemu, uśrednieniu oraz wzmacnieniu, z uwzględnieniem współczynników kształtu i szczytu. Wynik wyświetlany jest na 4-cyfrowym wyświetlaczu LED (wspólna katoda).

Ideę syntezy cyfrowej sygnału (DDS) zastosowano w drugim z opracowanych generatorów mocy [5]. Na rysunku 7 pokazano schemat funkcjonalny generatora DDS. Rozwiązanie układowe licznika adresowego i pamięci próbek może być zrealizowane z wykorzystaniem różnych technologii, od TTL/CMOS po technikę mikroprocesorową.



Rys. 7. Schemat blokowy generatora sygnałowego DDS

W układzie opracowanego generatora mocy próbki wartości chwilowych przebiegu napięciowego generowane są w układzie mikrokontrolera MSP430G2553 w module LaunchPad MSP-EXP430G2 (Texas Instruments) [8] (rys. 8.a). Moduł ten jest wyposażony w interfejs JTag, co ułatwia programowanie procesora (w środowisku IAR, poprzez interfejs USB). W pamięci mikrokontrolera umieszczono cyfrowe reprezentacje 64 wartości chwilowych sygnału, obejmujące okres sinusoidy. 8-bitowe dane wyprowadzane są z pamięci na port P2 modułu i dalej na wejścia (linie A1-A8) przetwornika cyfrowo-analogowego DAC0808 (National Semiconductor) [9] (rys. 8.b). Odstępów czasowych pomiędzy słowami kolejno wyprowadzanymi z pamięci, kontrolowane w programie mikroprocesora, determinują wartość częstotliwości napięcia na wyjściu przetwornika C/A. Amplituda sygnału wyjściowego U_g jest stała i wynosi 5 V.

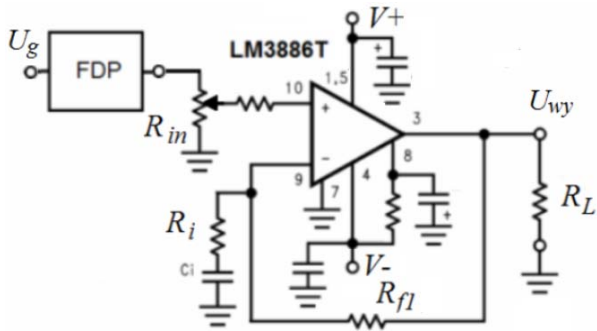


Rys. 8. Widok modułu LaunchPad (a) oraz schemat aplikacyjny przetwornika D/A typu DAC0808 (b)

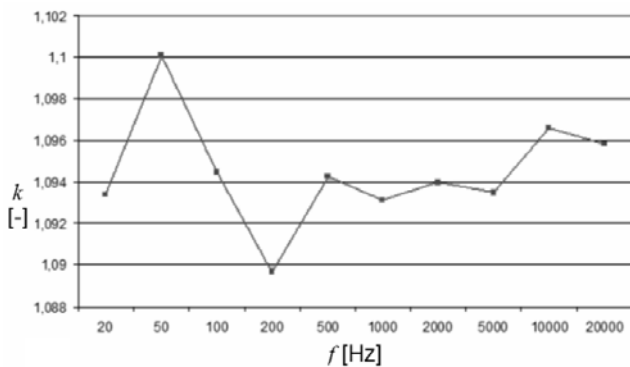
Linia P1.1 modułu LaunchPad jest wykorzystywana do płynnej regulacji częstotliwości w jednym z trzech podzakresów, wybieranych przełącznikiem połączonym z liniami P1.2 i P1.3: 20 - 200 Hz, 0,2 - 2 kHz oraz 2 - 20 kHz (regulacja częstotliwości z rozdzielczością, odpowiednio: 1 Hz, 10 Hz i 100 Hz). Linia P1.0 jest skonfigurowana jako wejście 10-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC), wbudowanego w strukturę mikrokontrolera. Na linię tą podawany jest sygnał z wyjścia generatora mocy, po uprzednim wyprostowaniu dwupołkownikowym i uśrednieniu. Jest on wykorzystywany do programowego wyznaczenia wartości skutecznej napięcia wyjściowego.

Wzmacniacz końcowy mocy zrealizowano z wykorzystaniem układu LM3886 [7] (rys. 9), podobnie jak we wcześniej opracowanym generatorze mocy. Na wejście wzmacniacza mocy podawany jest sygnał z generatora DDS, za pośrednictwem filtra dolnoprzepustowego FDP II-rzędu (częstotliwości odcięcia przełączane wraz z podzakresem częstotliwości, odpowiednio: 300 Hz, 3 kHz i 30 kHz). Wyjście generatora mocy stanowi w tym rozwiązaniu bezpośrednio wyjście wzmacniacza LM3886 (rys. 9). Regulacja amplitudy sygnału wyjściowego jest realizowana za pomocą rezystora R_{in} . Za pośrednictwem rezystorów R_{fl} oraz R_i nastawiono wzmacnienie napięciowe wzmacniacza. Przy zasilaniu wzmacniacza napięciami V^+ i V^- , odpowiednio ± 35 V, wartość skuteczną napięcia wyjściowego U_{wy} można regulować w zakresie od 0 do ok. 25 V. Wartość częstotliwości sygnału wyjściowego oraz jego wartość skuteczną są pokazywane na wyświetlaczu

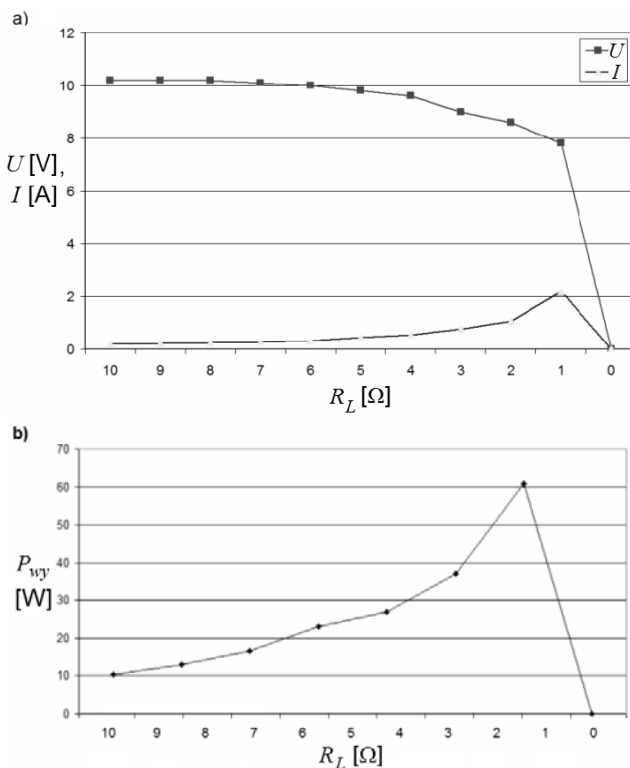
LCD typu EA DIP204-4NLED (Electronic Assembly), sterowanym sygnałami na liniach P1.4-7 z modułu LaunchPad.



Rys. 9. Konfiguracja wzmacniacza mocy LM3886T oraz jego połączenie filtrem FDP i z generatorem DDS



Rys. 10. Charakterystyka amplitudowo - częstotliwościowa wzmacniacza mocy



Rys. 11. Wyniki badania obciążalności wzmacniacza mocy: a) przebieg zmian napięcia i prądu obciążenia w funkcji rezystancji obciążenia, b) zmiany mocy wyjściowej w funkcji rezystancji obciążenia

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyki amplitudowo - częstotliwościowej

wzmacniacza mocy $k=f(f)$, wyznaczonej w zakresie pracy generatora. Badania przeprowadzono przy zasilaniu ± 20 V, napięciu wejściowym o amplitudzie równej 1 V, wzmacnieniu napięciowym wzmacniacza ok. 1 oraz przy rezystancji obciążenia $R_L = 50 \Omega$.

Na rysunku 11 przedstawiono charakterystyki ilustrujące zmiany napięcia U i prądu wyjściowego I wzmacniacza mocy przy zmianach rezystancji obciążenia R_L od wartości 10Ω do zwarcia na wyjściu generatora, przy początkowym napięciu wyjściowym równym 10,2 V. W trakcie zmniejszania wartości rezystancji obciążenia, przy $R_L=1 \Omega$ przebieg na wyjściu wzmacniacza stał się zniekształcony (niesinusoidalny), a jego amplituda wyniosła ok. 7,8 V.

Po wzroście temperatury (wg. [7] - powyżej 165°C) nastąpiło zadziałanie zabezpieczenia termicznego i w efekcie wzmacniacz został wyłączony. Po ochłodzeniu i spadku temperatury (do ok. 155°C [7]) zabezpieczenie termiczne wyłącza się. Bezpośrednie zwarcie do masy wyjścia wzmacniacza powodowało chwilowy wzrost prądu zasilania do wartości ok. 2,5 A, a po wzroście temperatury zadziałanie zabezpieczenia termicznego i wyłączenie wzmacniacza.

Podsumowanie

Pod względem konstrukcyjnym drugi z opracowanych generatorów ma znacznie prostszą budowę. Operacje związane z pomiarami i generacją sygnału prowadzone są programowo, w układzie mikrokontrolera w module LaunchPad.

Stabilność amplitudy i częstotliwości sygnału generowanego w przyrządzie wyposażonym w generator DDS jest znacznie większą niż w analogowym generatorze sygnału.

Wykorzystanie w obydwu zrealizowanych generatorach mocy wzmacniaczy końcowych wyposażonych w skuteczne zabezpieczenie przeciwzwarciowe pozwala na stosowanie tych przyrządów na stanowiskach laboratoryjnych.

LITERATURA

- [1] Parchański J., Miernictwo elektryczne i elektroniczne, WSiP, 2006
- [2] Dane katalogowe KABiD: Generator PO-21A, Instrukcja obsługi, 1978
- [3] Dane katalogowe firmy NdN: www.ndn.com.pl
- [4] Okoń M., Projekt i wykonanie generatora mocy małej częstotliwości, Praca dyplomowa inżynierska, Biblioteka KEO AM w Gdyni, 2004
- [5] Jurek K., Opracowanie generatora laboratoryjnego o mocy 50W z zabezpieczeniem wyjścia, Praca dyplomowa inżynierska (w przygotowaniu)
- [6] Dane katalogowe Intersil: ICL8038.pdf, April 2001
- [7] Dane katalogowe National Semiconductor: LM3886.pdf, October 2003
- [8] Dane katalogowe Texas Instruments: www.ti.com/ww/en/launchpad/launchpads-msp430-msp-exp430g2.htm
- [9] Dane katalogowe: DAC0808LCN-National-Semiconductor-datasheet-21138.pdf, May 1999

Autorzy: dr inż. Romuald Maśnicki, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: romas@am.gdynia.pl; Krzysztof Jurek, student Wydziału Elektrycznego, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: yuras91@gmail.com