ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z. 186 Nr kol. 1611

Paweł KIELAN, Zbigniew WYSOCKI
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

GENERATOR FALI SINUSOIDALNEJ Z DYNAMICZNĄ ZMIANĄ CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. Artykuł prezentuje założenia projektowe, realizację oraz wyniki testów generatora fali sinusoidalnej umożliwiającego automatyczną zmianę częstotliwości w czasie 1 s. Generator służyć ma do badania przekaźników częstotliwościowych stosowanych w systemach automatyki elektroenergetycznej.

SINUSOIDAL WAVE GENERATOR WITH DYNAMIC FREQUENCY CHANGE

Summary. The following paper presents the design assumption, realization and test results for sinusoidal waveform generator enabling automatic change of frequency within the time period 1 s. Generator is dedicated to test frequency relays applied in control circuits for electrical power systems.

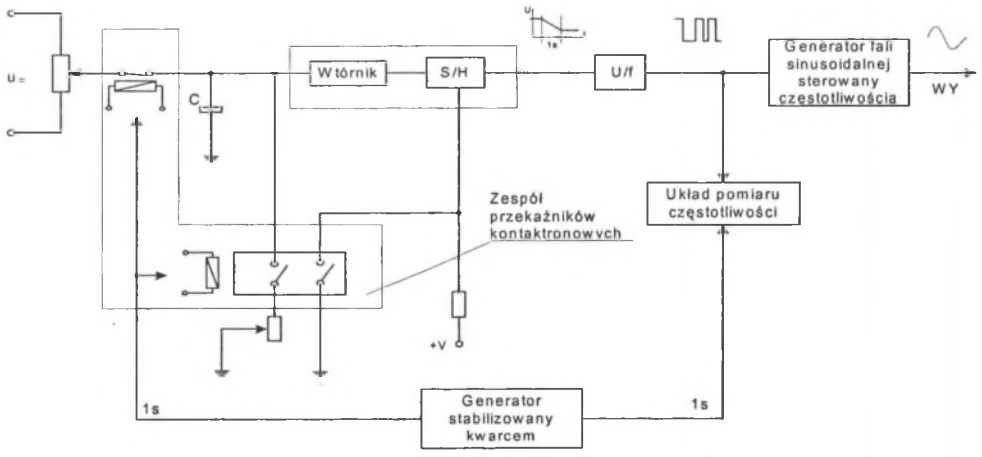
1. WPROWADZENIE

Awaria podstawowego elementu systemu elektroenergetycznego (np.: turbogenerator dużej mocy, transformator blokowy, linia przesyłowa) może doprowadzić do deficytu generowanej mocy czynnej, którego efektem jest obniżanie się częstotliwości. W celu niedopuszczenia do nadmiernego spadku częstotliwości systemu elektroenergetycznego, które to zjawisko jest z wielu względów szkodliwe, konieczne jest dorywcze wyłączenie z pracy grupy mniej ważnych odbiorów, na czas potrzebny do przywrócenia normalnej pracy systemu. W tym celu wykorzystuje się automatyczny układ tzw. Samoczynnego Częstotliwościowego Odciążania (SCO), którego głównym elementem jest pomiarowy przekaźnik Rf kontrolujący wartość częstotliwości. W przypadku znacznej prędkości obniżania się częstotliwości, niezbędne jest przejście systemu do tzw. pracy wyspowej, opartej na działaniu specjalistycznej automatyki wyposażonej w przekaźniki częstotliwościowe RΔf, monitorujące dynamikę $\Delta f/\Delta t$ zmian częstotliwości w czasie jednej sekundy. Przekaźnik Rf jest przekaźnikiem tzw. niedomiarowym, bowiem uaktywnia operację wyłączania mniej ważnych odbiorów, gdy mierzona przez niego częstotliwość systemu elektroenergetycznego staje się mniejsza od

ustalonej wcześniej częstotliwości progowej f_p (tzw. nastawa przekaźnika). W przypadku przekaźnika RΔf, działanie automatyki 'wyspowej' rozpoczyna się z chwilą, gdy mierzona dynamika $\Delta f/\Delta t$ systemu przekracza wartość nastawy $(\Delta f/\Delta t)_p$. Przekaźnik RΔf nazywany jest w związku z tym przekaźnikiem nadmiarowym. W celu zapewnienia poprawnego działania ww. automatyk systemowych, przekaźniki częstotliwościowe muszą być przed oddaniem do eksploatacji poddane specjalistycznym badaniom, których najistotniejszy fragment dotyczy sprawdzenia ich nastaw (wartości progowe). Badanie to wymaga doprowadzenia do wejściowego obwodu pomiarowego przekaźnika napięcia sinusoidalnego o częstotliwości regulowanej statycznie dla RF i dynamicznie dla RΔf. Napięcie w celu testowania przekaźnika RF można uzyskać przez odpowiednie wzmocnienie sygnału wyjściowego, wybranego generatora fali sinusoidalnej o regulowanej płynnie częstotliwości. Spełnienie wymagania związanego ze sprawdzaniem nastaw przekaźnika RΔf jest trudniejsze, z uwagi na ograniczoną dostępność do specjalistycznych, dedykowanych generatorów fali sinusoidalnej zapewniających automatyczną, dynamiczną zmianę częstotliwości sygnału. W dalszych punktach pracy przedstawiono założenia projektowe, realizację i wyniki badań dokładności działania generatora fali sinusoidalnej, który w połączeniu z odpowiednim wzmacniaczem może być wykorzystany do wymaganych testów przekaźników Rf i RΔf.

2. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE GENERATORA

Główny problem związany z projektem generatora w celu testowania przekaźników częstotliwościowych, RF i RΔf, wiąże się z zapewnieniem automatycznej zmiany częstotliwości sygnału wyjściowego z wymaganą dynamiką określaną w Hz/s. W prezentowanym projekcie przyjęto rozwiązanie tego problemu opisane w dokumencie [6], którego idea przedstawiona schematycznie na rys. 1 polega na wykorzystaniu napięcia z rozładowującego się w czasie jednej sekundy kondensatora, w celu generowania fali sinusoidalnej o częstotliwości zmieniającej się proporcjonalnie do napięcia na kondensatorze.



Rys. 1. Idea generowania fali sinusoidalnej z dynamiczną zmianą częstotliwości
Fig. 1. Idea of sinusoidal waveform generation with dynamic change of frequency

Analiza parametrów technicznych przekaźników częstotliwościowych RF i RΔf oraz możliwości szerszego wykorzystania generatora zadecydowały o następujących, podstawowych założeniach projektowych:

- quasi-statyczna regulacja częstotliwości w zakresie (30 ÷ 70) Hz,
- regulacja napięcia sygnału wyjściowego w przedziale (0 ÷ 5) V,
- automatyczna, dynamiczna zmiana częstotliwości sygnału w zakresie (0,1 ÷ 9,9) Hz/s.

Uzyskanie generatora fali sinusoidalnej o powyższych parametrach, zgodnie z ideą przedstawioną na rys.1, wymagało dokonania analizy możliwych rozwiązań jego podstawowych podzespołów:

- układ generacji fali sinusoidalnej (ugfs) o przestrajanej napięciem stałym częstotliwości,
- układ generacji impulsu prostokątnego (ugip) o czasie trwania równym jednej sekundzie,
- układ 'kluczy' (uk) zwiernych i przełącznych,
- układ pomiaru częstotliwości (upcz).

W odniesieniu do układu ugfs rozpatrzono dwa możliwe warianty:

- połączenie przetwornika U/f z częstotliwościowo sterowanym generatorem fali sinusoidalnej,
- wykorzystanie scalonego generatora funkcyjnego, sterowanego napięciem stałym.

Możliwości pozyskania elementów, a nade wszystko parametry techniczne (np. liniowość zmiany częstotliwości, generowanie prostokątnej repliki fali sinusoidalnej, niezbędnej dla pomiaru częstotliwości) zdecydowały o wyborze rozwiązania układu ugfs bazującego na scalonym generatorze funkcyjnym.

Analizując rozwiązania układu ugip:

- dokładniejsze, bazujące na generatorze fali prostokątnej stabilizowanym rezonatorem kwarcowym, lecz czasochłonne w realizacji (m. in. konieczność wykonania dzielnika częstotliwości),
- proste, wykorzystujące monostabilny generator scalony (mgs),

zdecydowano, z uwagi na to, że projekt dotyczył li tylko modelu urządzenia, o przyjęciu do realizacji rozwiązania z mgs.

W przypadku układu 'kluczy', porównanie (z punktu widzenia czasu przełączeń) rozwiązania z kontaktronami i scalonym układem analogowym wykonanym w technologii CMOS w sposób jednoznaczny wykazało wyższość wariantu półprzewodnikowego.

Rozważając problem pomiaru częstotliwości, zrezygnowano - z uwagi na brak w projekcie generatora z rezonatorem kwarcowym - z metody konwencjonalnej (dekada zliczająca impulsy kHz w czasie jednej sekundy) na rzecz rozwiązania z wykorzystaniem mikrokontrolera, który umożliwia programowanie w systemie ISP i zapewnia bezpośrednie sprzężenie z siedmiosegmentowymi wyświetlaczami.

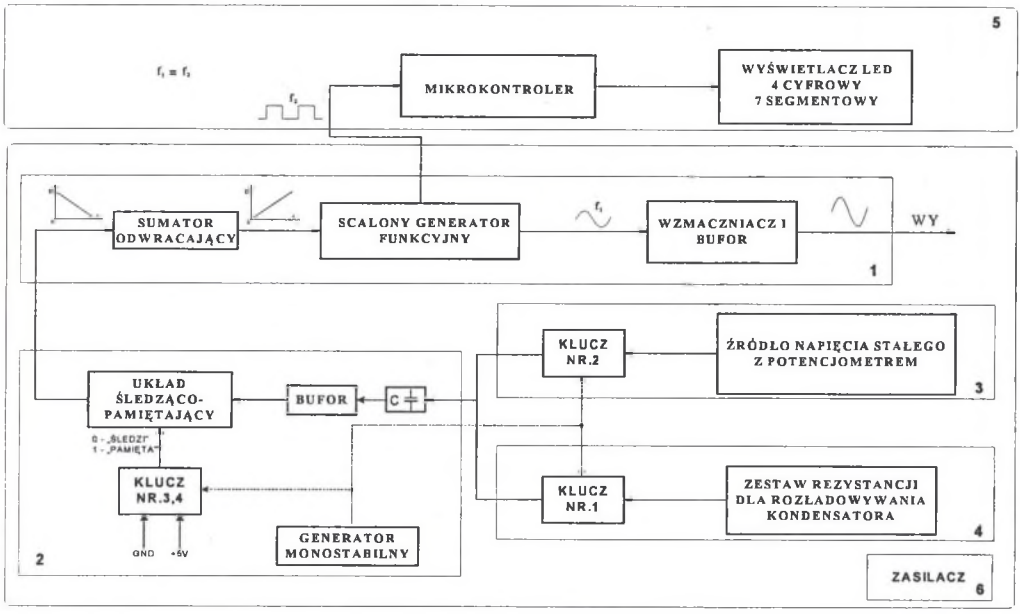
Wyniki powyższych prac zadecydowały, że do praktycznej realizacji wybrano projekt generatora GSΔf o schemacie blokowym przedstawionym na rys. 2.

2.1. Opis projektu generatora

W projekcie generatora GSΔf (rys. 2) wyszczególnić można niżej wymienione, główne zespoły i układy:

- zespół generatora fali sinusoidalnej,
- zespół sterowania,
- układ ładowania kondensatora,

- układ nastaw dynamiki Δu/Δt,
- układ pomiaru częstotliwości,
- układ zasilania.



Rys.2. Schemat blokowy generatora GSΔf
Fig.2. GSΔf generator block diagram

Zespół generatora fali sinusoidalnej składa się z sumatora odwracającego, generatora funkcyjnego, wtórnika oraz wyjściowego wzmacniacza. Zespół ten dzięki właściwościom generatora funkcyjnego wytwarza żądany przebieg sinusoidalny o pulsacji proporcjonalnej do napięcia na kondensatorze C oraz jego prostokątną replikę wykorzystywaną do pomiaru częstotliwości.

Zespół sterowania, w skład którego wchodzą: kondensator elektrolityczny, wtórnik separujący, układ śledząco-pamiętający, klucze analogowe (zwierne i rozwierne) oraz monostabilny generator impulsu o czasie trwania równym jednej sekundzie, pełni zadanie napięciowego sterowania generatorem funkcyjnym w dwu opisanych w p. 2.2 trybach pracy.

Układ ładowania kondensatora zapewnia płynną zmianę napięcia wejściowego generatora funkcyjnego dzięki zastosowaniu precyzyjnego, wieloobrotowego potencjometru oraz odłączania kluczem analogowym źródła napięcia stałego na czas rozładowywania kondensatora.

Układ nastaw dynamiki Δu/Δt umożliwia zmianę stałej czasowej rozładowywania kondensatora na drodze selektywnego wyboru i przyłączenia do kondensatora, jednego z dziesięciu zróżnicowanych, co do wartości, rezystorów rozładowujących.

Układ pomiaru częstotliwości (upcz) zapewnia pomiar oraz wyświetlanie wartości częstotliwość generowanego przebiegu sinusoidalnego z wykorzystaniem mikrokontrolera i wyświetlacza LED.

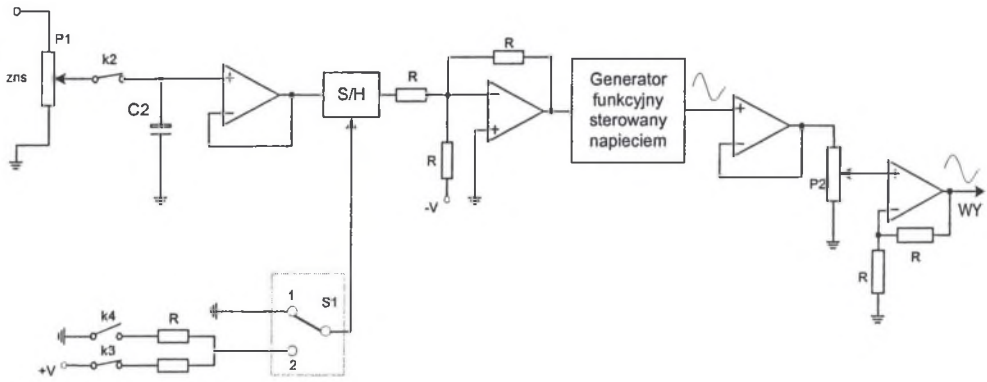
2.2. Zasada działania generatora

Generator GSΔf działać będzie w dwóch trybach:

- tryb płynnej, ręcznej regulacji częstotliwości (prcz) sygnału wyjściowego,
- tryb dynamicznej, automatycznej zmiany częstotliwości (dzcz) sygnału wyjściowego.

Tryb prcz przeznaczony jest do testowania przekaźników Rf reagujących na określoną wartość częstotliwości, natomiast tryb dzcz ma umożliwić badanie przekaźników RΔf monitorujących dynamikę zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym.

Zasadę działania generatora GSΔf w trybie prcz i dzcz przybliżają odpowiednio rys. 3 i rys. 4.



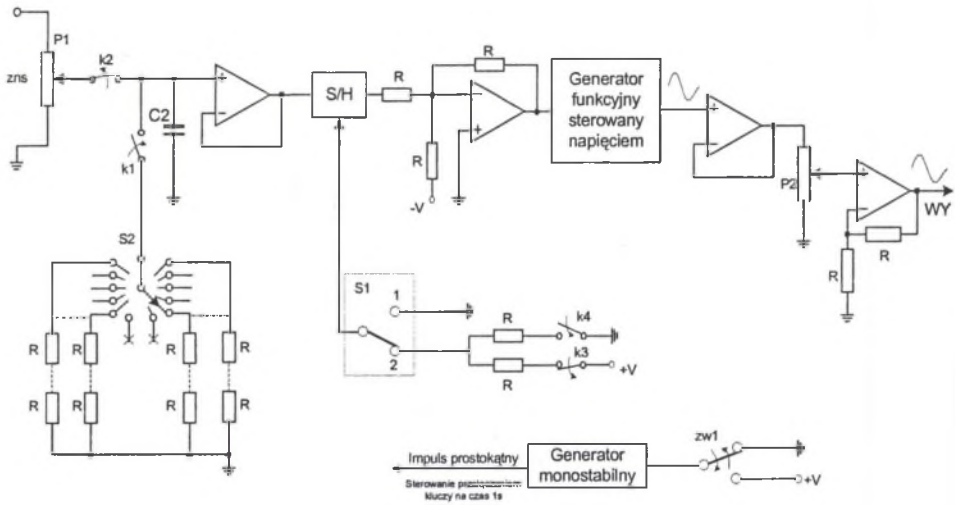
Rys. 3. Schemat blokowy obrazujący zasadę działania generatora GSΔf w trybie prcz
Fig. 3. Block diagram of GSΔf generator operating in prcz mode

Napięcie z kondensatora *C2* ładowanego poprzez zamknięty klucz analogowy k2 z źródła napięcia stałego (zns) przekazywane jest na wejście wtórnika współpracującego z układem śledząco-pamiętającym (S/H). Układ S/H będący w stanie śledzenia, steruje przez sumator odwracający generatorem funkcyjnym (GF). Częstotliwość sygnału wyjściowego GF jest proporcjonalna do wartości napięcia na suwaku potencjometru P1.

Dynamiczna zmiana częstotliwości Δf/Δt dokonywana jest z wyjściowego poziomu f_{pocz}, uzyskanego wstępnie dla trybu prcz pracy generatora. Przełączając *S1* z pozycji 1 na 2, układ S/H przechodzi (przy otwartym kluczu k4) w stan pamiętania. Uruchamiając zestykiem migowym generator monostabilny, steruje się poszczególne klucze analogowe w sposób zapewniający:

- odłączenie źródła napięcia stałego od kondensatora C2 (otwarcie klucza k2 na czas jednej sekundy),
- rozładowywanie kondensatora C2 przez, ustalający wybraną dynamikę Δu/Δt, rezystor z zestawu S2 (zamknięcie klucza k1 na czas jednej sekundy),
- wprowadzenie układu S/H w stan śledzenia (zamknięcie klucza k4 z równoczesnym otwarciem k3 na czas jednej sekundy).

Generator funkcyjny sterowany przez jedną sekundę dynamicznie zmieniającym się napięciem kondensatora C2, 'odpowiada' proporcjonalną do Δu/Δt zmianą częstotliwości Δf/Δt.

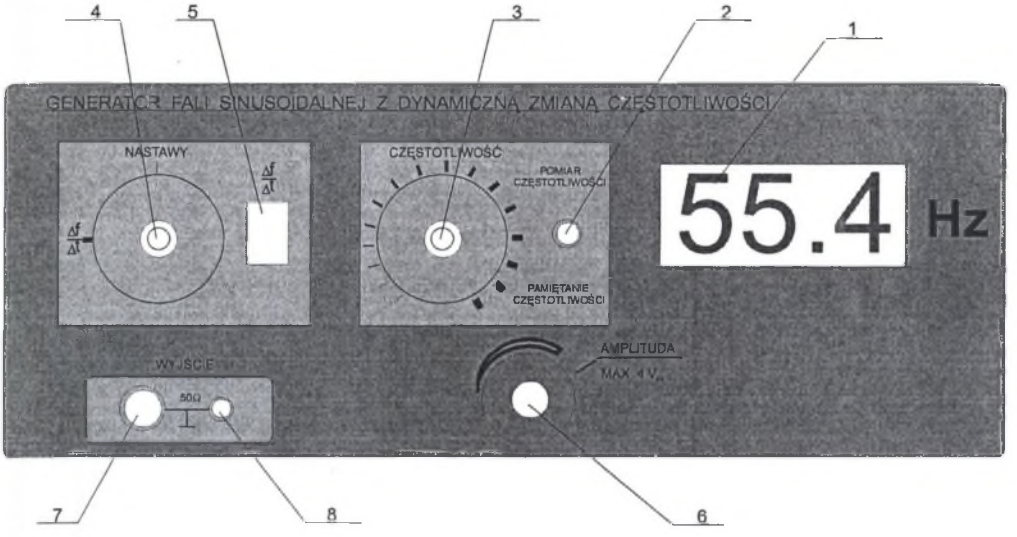


Rys. 4. Schemat blokowy obrazujący zasadę działania generatora GSΔf w trybie dzcz
Fig. 4. Block diagram of GSΔf generator operating in dzcz mode

3. PRAKTYCZNA REALIZACJA PROJEKTU

Praktyczna realizacja generatora GSΔf, którego widok płyty czołowej przedstawia rys.5, bazuje na następujących ważniejszych elementach i podzespołach elektronicznych:

- *generator funkcyjny* - monolityczny układ ICL 8038 firmy INTERSIL zapewniający liniową zmianę częstotliwości generowanego sygnału sinusoidalnego (trójkątnego i prostokątnego) przez regulację wejściowego napięcia stałego,
- *układ śledząco-pamiętający* - monolityczny, bipolarny układ SCH5320 firmy BURR-BROWN, z wewnętrznym kondensatorem pamiętającym i możliwością dołączenia dodatkowego kondensatora zewnętrznego,
- *generator* monostabilny – zbudowany w oparciu o układ czasowy NE555,
- *klucze analogowe* – monolityczny układ ADG 513 firmy ANALOG DEVICES,
- *mikrokontroler* - układ AT89S8252 firmy ATMEL umożliwiający wykorzystanie standardu ISP.



Rys. 5. Widok płyty czołowej generatora GSΔf
Fig. 5. GSΔf generator front panel

4. BADANIA GENERATORA GSΔf

Badania GSΔf, przeprowadzone z wykorzystaniem cyfrowego rejestratora, dotyczyły:

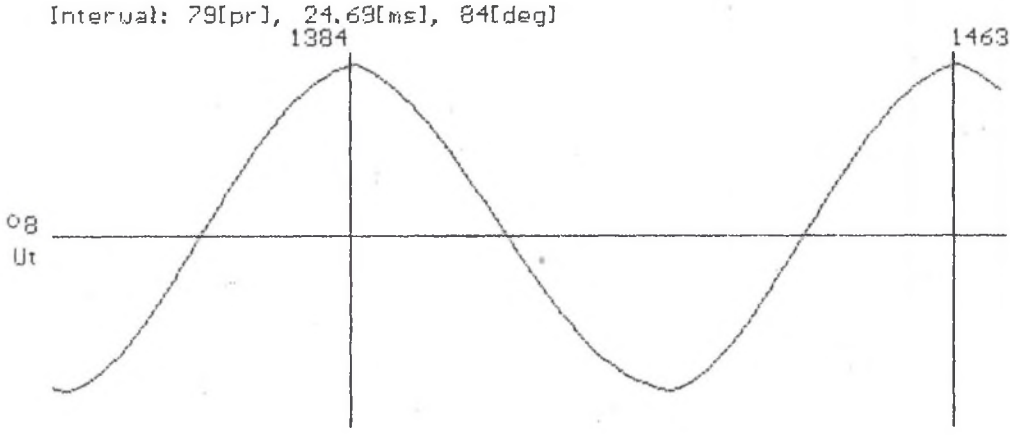
- sprawdzenia poprawności autonomicznego pomiaru częstotliwości sygnału wyjściowego generowanego w trybie prcz,
- porównania wybranej nastawy Δf/Δt z uzyskiwaną w trybie dzcz dynamiką zmian częstotliwości sygnału wyjściowego generatora.

W ramach punktu pierwszego rejestrowano przebiegi dla nastawionych (w oparciu o autonomiczny wyświetlacz) kilku różnych częstotliwości, a następnie obliczano rzeczywistą częstotliwość zgodnie z zależnością:

$$f_r = \frac{1}{T} \tag{1}$$

w której: T – okres rejestrowanego przebiegu.

Przykład rejestrogramu przebiegu wyjściowego generatora dla nastawionej częstotliwości f =40,5 Hz przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Rejestrogram przebiegu o nastawionej częstotliwości f = 40,5 Hz
Fig.6. Signal recording for frequency set to f = 40.5 Hz

Nastawione częstotliwości przebiegu sinusoidalnego prezentowane na autonomicznym wyświetlaczu generatora oraz odpowiadające im częstotliwości obliczone z zależności (1) przy oparciu się na uzyskanych rejestrogramach, zebrano w tabeli 1.

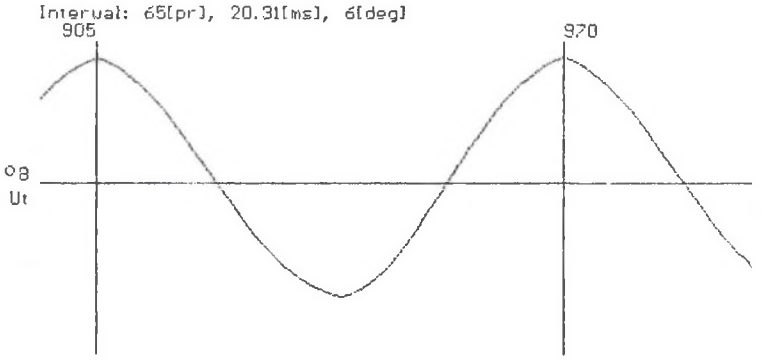
Tabela 1

Porównanie nastawionej częstotliwości sygnału wyjściowego generatora z obliczeniową

Nastawiona częstotliwość przebiegu w Hz	**Okres rejestrowanego przebiegu w ms**	**Częstotliwość obliczeniowa f_r przebiegu w Hz**
40,5	24,69	40,50
45,0	22,19	45,06
50,0	20,00	50,00
55,1	18,13	55,16

W odniesieniu do punktu drugiego badań, z uwagi na stosunkowo małą częstotliwość próbkowania rejestratora (3200 Hz), dokonano rejestracji sygnału wyjściowego (f_{pocz} = 50 Hz) generowanego w trybie dzcz dla jednej, dość dużej wartości nastawy $\Delta f/\Delta t$ = 5,0 Hz/s. Przykładowy rejestrogram napięcia wyjściowego generatora po czasie t = 0,28 s od chwili rozpoczęcia zmiany częstotliwości f zamieszczono na rys. 7.

Częstotliwości sygnału wynikające z kilku rejestrogramów, wyznaczone na podstawie wzoru (1), zebrano w tabeli 2. Wykres zmiany częstotliwości sygnału wyjściowego generatora GSΔf, uzyskany na podstawie obliczeń z tabeli 2, przedstawia rys. 8.

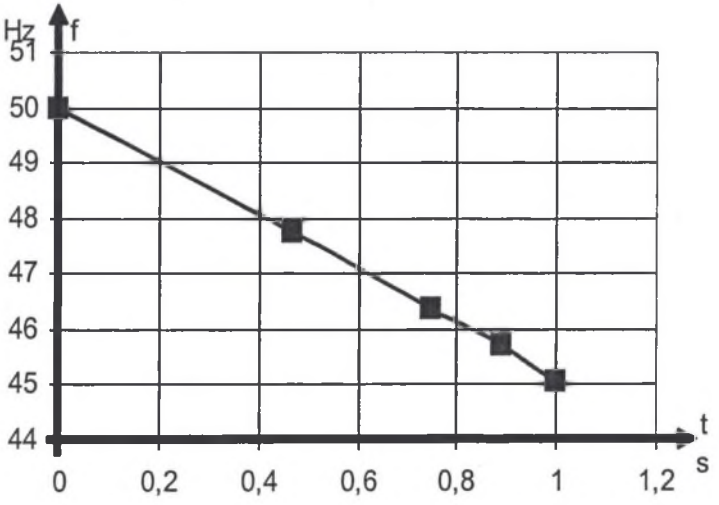


Rys. 7. Rejestrogram napięcia generatora po czasie t=0,28 s od chwili rozpoczęcia zmiany f
Fig. 7. Generator voltage recording after t = 0.28 s from the moment of f change beginning

Tabela 2

Wyniki obliczeń częstotliwości sygnału wyjściowego generatora; tryb pracy dzcz, $\Delta f/\Delta t$ = 5,0 Hz/s

Czas t od chwili rozpoczęcia zmiany f w s	**Okres rejestrowanego przebiegu w ms**	**Częstotliwość f_r w Hz**
0,28	20,31	49,24
0,47	20,94	47,75
0,75	21,56	46,38
0,89	21,88	45,70
1,00	22,19	45,06



Rys. 8. Wykres zmiany częstotliwości sygnału wyjściowego generatora dla $\Delta f/\Delta t$ = 5 Hz/s
Fig. 8. Graph of generator output signal frequency change for $\Delta f/\Delta t$ = 5 Hz/s

4.1. Ocena wyników badań generatora GSΔf

Analiza zawartości tabeli 1 i wykresu przedstawionego na rys. 8 zezwala na następującą ocenę wyników badań generatora:

- prezentowana na wyświetlaczu LED częstotliwość sinusoidalnego sygnału wyjściowego generatora, mierzona przez autonomiczny mikrokontroler urządzenia z wykorzystaniem prostokątnej repliki tego sygnału, oddaje wiernie rzeczywistą wartość częstotliwości,
- zmiana częstotliwości fali sinusoidalnej zachodzi w sposób quasiliniowy, z wybraną a priori dynamiką zmian $\Delta f/\Delta t = 5$ Hz/s.

5. UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania dowiodły, że generator GSΔf działa zgodnie z przyjętymi założeniami. Podstawę osiągnięcia celu można upatrywać w zastosowaniu:

- scalonego generatora funkcyjnego,
- kluczy analogowych wykonanych w technologii CMOS, których bardzo szybkie przełączenia (czasy przełączeń poniżej 200 ns) zapewniły wymaganą jakość pracy zespołu sterującego generatora.

BIBLIOGRAFIA

1. Horowitz P., Hill W.: *Sztuka elektroniki* część 1 i 2. Wydaw. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1997.
2. Jakubiec J.: *Wprowadzenie do techniki mikroprocesorowej*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
3. Jakubiec J., Roj M.: *Pomiarowe przetwarzanie próbkujące*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
4. Kielan P.: *Generator fali sinusoidalnej z dynamiczną zmianą częstotliwości*. Praca dyplomowa, Gliwice 2003.
5. Rusek M., Pasierbiński J.: *Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach*. WNT, Warszawa 1999.
6. Wysocki Z.: Praca NB 139/RE1/83 *Badanie dynamiczne przekaźników do zabezpieczeń elektroenergetycznych zainstalowanych na terenie K. M. Huta Katowice-System do testowania przekaźników częstotliwościowych (materiały niepublikowane)*. Gliwice 1985.
7. Tietze U., Schenk C.H.: *Układy półprzewodnikowe*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1996.

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 września 2003 r.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke