

Janusz WALCZAK

Marian PASKO

Institut Elektrotechniki
Teoretycznej i Przemysłowej
Politechniki Śląskiej

GENERATOR OKRESOWYCH PRZEBIEGÓW ODKSZTAŁCONYCH

Streszczenie. W pracy opisano konstrukcję analogowo-cyfrowego generatora przebiegów odkształconych o napięciu będącym sumą do dziesięciu harmonicznyc, o dowolnie nastawialnych amplitudach i przesunięciach fazowych, względem podstawowej harmonicznej tego generatora o częstotliwości 50 Hz. Przedstawiono weryfikację parametrów i możliwości techniczne tego generatora.

GENERATOR OF NONSINUSOIDAL WAVEFORM

Summary. The paper describes a structure of an analog-digital generator of nonsinusoidal waveform. A voltage of the generator being a sum up to ten harmonics with optional adjustable amplitudes and phase waveform towards the basic harmonics at frequency 50 Hz. Verification of some parameters and technical possibilities of this generator has been presented too.

ГЕНЕРАТОР ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СИГНАЛА

Резюме. В работе описана конструкция аналого-цифрового генератора деформированных сигналов с напряжением, которое является суммой до десяти гармоник о произвольно устанавливаемыми амплитудами и фазовыми перемещениями относительно основной гармоники этого генератора с частотой 50 Гц. Представлены аттестация некоторых параметров и механические характеристики генератора.

1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój energoelektroniki i jej zastosowań w procesach przemysłowych, występowanie odbiorników niestacjonarnych i nieliniowych w sieciach elektroenergetycznych powodują, że przesył energii w obwodach jedno- i wielofazowych następuje w obecności zniekształconych napięć i prądów.

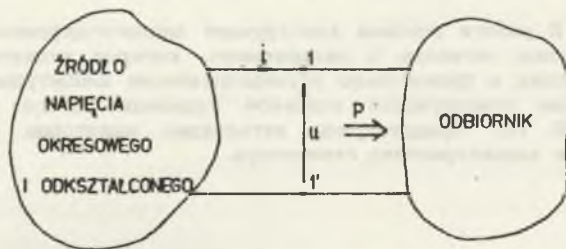
Większość współczesnych teorii mocy opartych na koncepcji S.Fryzego dekompozycji prądu źródła [2], [3] wykorzystuje elementarny model obwodu (rys.1), zawierający jedno- lub wielofazowe źródło napięcia okresowego i odkształconego. W praktyce [4] elektroenergetyczne źródło napięcia jest źródłem napięcia odkształconego, gdy zawiera ono idealną SEM o częstotliwości 50Hz oraz:

- elementy pasywne ograniczające moc zwarciovą źródła i będące przyczyną niesinusoidalnego napięcia na jego zaciskach w sytuacji, gdy źródło to wydaje prądy niesinusoidalne,
- elementy niestacjonarne i nieliniowe.

Zagadnieniu konstrukcji jednofazowego źródła przebiegów odkształconych (rys.1), o maksymalnej wydawanej mocy czynnej równej około 100 W, poświęcona jest dalsza część artykułu. Źródło to stanowi pierwszy etap konstrukcji stanowiska modelowego, które w przyszłości zostanie uzupełnione:

- zbiorem odbiorników (liniowych, parametrycznych, nieliniowych) o programowalnych charakterystykach napięciowo-prądowych,
- zbiorem kompensatorów o różnych strukturach, realizowalnych w wielu klasach elementów (pasywne, aktywne, parametryczne, nieliniowe),
- mikroprocesorowym systemem pomiarowym umożliwiającym identyfikację parametrów modelowanych obwodów, optymalizację ich warunków pracy oraz syntezę układów kompensacyjnych.

Wymienione elementy stanowiska modelowego znajdują się obecnie w stadium realizacji.



Rys.1. Model sieci: źródło zasilania-odbiornik

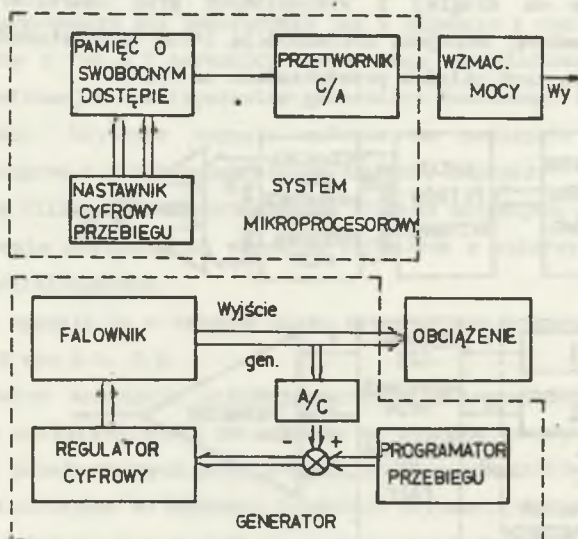
Fig.1. Network model: supply source-receiver

2. PRZEGLĄD KONSTRUKCJI GENERATORÓW

Produkowane i stosowane układy generatorów przebiegów odkształconych [1], [5], [8], [9] podzielić można na dwie klasy:

- układów, w których kształtowanie przebiegu odkształconego przeprowadzane jest na drodze syntezy cyfrowej,
- układów, w których kształtowanie przebiegu odkształconego przeprowadza się analogowo.

Układy generatorów należących do pierwszej z wymienionych grup charakteryzują się wysoką dokładnością (ok. 0,01%) i są stosowane od niedawna. Zasadę działania takich generatorów (będących w istocie szybkimi układami mikroprocesorowymi) przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Schemat blokowy cyfrowego generatora przebiegów odkształconych

Fig.2. Block diagram of a digital generator of nonsinusoidal waveform

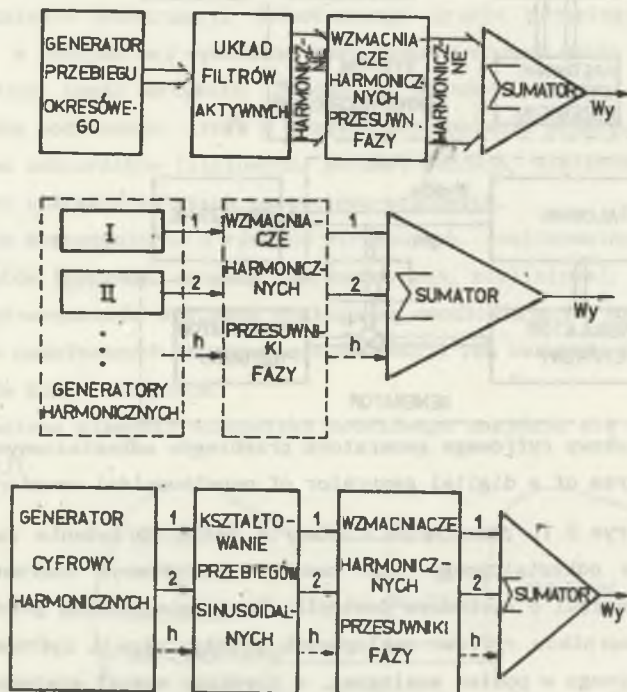
W układzie z rys.2.1, pracującym z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego, przebieg napięcia odkształconego jest nastawiony cyfrowym sterownikiem i zapamiętywany w pamięci o swobodnym dostępie. Następnie, układy precyzyjnych i szybkich przetworników cyfrowo-analogowych przekształcają cyfrową postać sygnału odkształconego w postać analogową, a uzyskany sygnał analogowy ulega wzmocnieniu najczęściej w klasycznym, lecz o wysokich parametrach jakościowych, wzmacniaczu mocy.

Systemy takie od niedawna [9] są realizowane w postaci pojedynczych chipów (bez wzmacniaczy mocy), współpracujących z komputerami serii IBM jako nastawnikami przebiegów odkształconych.

W układzie przedstawionym na rys.2.2 napięcie lub prąd falownika (wykonanego z wykorzystaniem bardzo szybkich elementów półprzewodnikowych) są mierzone analogowo, przetwarzane na sygnał cyfrowy, który jest porównywany z zadany z nastawnika cyfrowym sygnałem wzorcowym przebiegu odkształconego. Różnica tych sygnałówysterowuje regulator cyfrowy falownika wymuszającego zadany przebieg na wyjściu generatora.

Cyfrowe realizacje generatorów przebiegów odkształconych charakteryzują się złożoną budową i wymagają kosztownych, bardzo szybkich i dokładnych układów półprzewodnikowych.

Układy należące do drugiej z wymienionych grup charakteryzują się względnie prostą budową, mniejszą dokładnością ($\sim 1\%$) oraz stosunkowo niską ceną. Ideę działania tych układów przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Schemat blokowy analogowego generatora przebiegów odkształconych

Fig.3. Block diagram of an analogue generator of nonsinusoidal waveforms

Układ przedstawiony na rys.3.1 zawiera analogowy generator przebiegu odkształconego zawierającego wszystkie pożądane harmoniczne. Napięcie wyjściowe tego generatora poddawane jest selektywnej filtracji w układzie filtrów aktywnych o wysokich parametrach jakościowych z uwagi na fakt, że poszczególne harmoniczne napięcia generatora maleją jak $\frac{1}{h^\alpha}$, $\alpha > 1$, $h=1,2,\dots$. Wyodrębnione harmoniczne zostają następnie wzmacnione i ustalone jest ich przesunięcie fazowe względem harmonicznej podstawowej napięcia generatora. Suma tych harmonicznych stanowi realizacjężą pożądanego przebiegu odkształconego.

Układ przedstawiony na rys.3.2 różni się od poprzednio omawianego tym, że harmoniczne przebiegu odkształconego uzyskuje się z niezależnych wysokostabilnych generatorów napięcia sinusoidalnego. Dalsze przetwarzanie sygnałów przeprowadza się identycznie jak w układzie z rys.3.1.

W układzie z rys.3.3 harmoniczne przebiegu odkształconego wytwarzane są na drodze cyfrowej z wykorzystaniem generatora kwarcowego i bloku dzielników częstotliwości. Uzyskane sygnały cyfrowe są następnie przetwarzane na sygnały analogowe o przebiegach sinusoidalnych, poprzez:

- selektywną filtrację z wykorzystaniem filtrów aktywnych,
- kształtowanie scałkowanych sygnałów cyfrowych z wykorzystaniem diodowych układów kształtujących.

Uzyskane sygnały są w dalszym ciągu przetwarzane w sposób identyczny jak w układach z rys.3.1, 3.2.

Przy wyborze koncepcji układu generatora zrezygnowano z góry z jego wykonania w wersji cyfrowej ze względu na wysokie koszty szybkich układów cyfrowych i przełączalnych oraz precyzyjnych przetworników C/A, jak też ze względu na istniejące do niedawna trudności uzyskania takich elementów.

Analiza doświadczalna modeli generatora działającego zgodnie z rys.3.1 doprowadziła do wniosku, że uzyskanie wystarczającej dokładności ($\sim 1\%$) takiego generatora wymaga:

- stosowania wysokostabilnych i precyzyjnych elementów aktywnych i biernych,
- termostatywania bloków generatora.

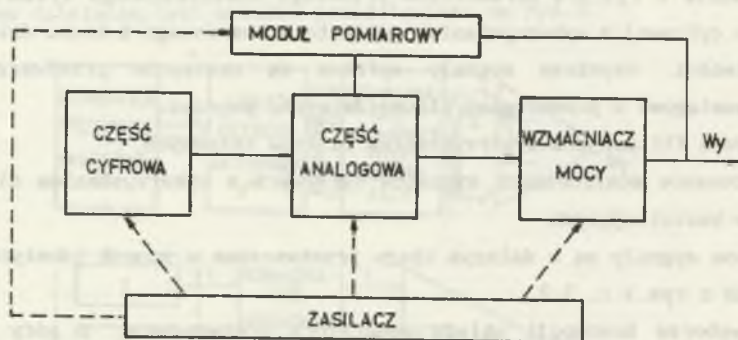
Podstawowym problemem, który wystąpił przy badaniu modelu generatora działającego zgodnie z rys.3.2 były trudności utrzymania stabilnego i równego kolejnym liczbom naturalnym stosunku częstotliwości harmonicznych generatora. Pomimo stosowania dostępnych, stabilnych elementów i prób termostatywania układów problem ten nie został w sposób zadowalający rozwiązany, co powodowało niedopuszczalne fluktuacje przebiegu napięcia generatora.

Wymienione wady nie wystąpiły przy badaniu modelu generatora zbudowanego zgodnie z rys.3.3, co było przyczyną wyboru tej koncepcji realizacji generatora.

3. OPIS GENERATORA

Opracowany generator [10] składa się z następujących bloków funkcjonalnych (rys.4):

- części cyfrowej,
- części analogowej,
- wzmacniacza mocy,
- modułu pomiarowego,
- zasilacza.



Rys.4. Schemat funkcjonalny generatora

Fig.4. Functional diagram of a generator of nonsinusoidal waveform

Zadaniem części cyfrowej generatora jest wytworzenie dziesięciu zsynchronizowanych ze sobą przebiegów (w standardzie TTL) o częstotliwościach 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, ..., 500 Hz. W części analogowej przebiegi te są przetwarzane na przebiegi sinusoidalne o regulowanej amplitudzie i fazie w stosunku do przebiegu o częstotliwości 50 Hz. Uzyskane przebiegi są następnie sumowane i wzmacniane we wzmacniaczu mocy. Moduł pomiarowy tworzą układy służące do pomiaru amplitud i faz harmonicznych przebiegu odkształconego.

3.1. Część cyfrowa

Generator kwarcowy, zbudowany w klasycznym układzie [7], [12] dwóch zlinearyzowanych inwerterów TTL, wytwarza sygnał prostokątny o częstotliwości 1008 kHz. Sygnał ten jest dzielony we wstępnym dzielniku częstotliwości przez osiem, a następnie w głównym dzielniku częstotliwości tak, że na wyjściu tego dzielnika uzyskuje się sygnały o częstotliwościach: 50 Hz, 100 Hz, ..., 500 Hz. Dodatkowo w bloku dzielników uzyskuje się sygnał o częstotliwości 18 Hz wykorzystywany w module pomiarowym fazy. Wymienione dzielniki częstotliwości wykonano w postaci bloków złożonych z liczników i bramek modulo 2 pracujących w pętli sprzężenia zwrotnego tych liczników, przez co niezależnie od tego, czy stosunki podziału częstotliwości są liczbami parzystymi czy też nie, przebiegi sygnałów na wyjściach dzielników są zawsze symetryczne. Uzyskane sygnały cyfrowe zostają następnie przetworzone na sygnały o kształcie trapezowym (± 15 Vss) (co znacznie poprawia efektywność filtracji filtrów aktywnych) za pomocą komparatorów z dodatkowymi pojemnościowymi pętlami sprzężenia zwrotnego. Sygnały o kształcie trapezowym są wprowadzane do części analogowej generatora.

3.2. Część analogowa

Sygnały o kształcie trapezowym zostają doprowadzone na wejścia środkowo-przepustowych filtrów aktywnych pierwszego rzędu z podwójną pętlą sprzężenia zwrotnego [6], [8]. Częstotliwości środkowe tych filtrów wynoszą odpowiednio 50, 100, ..., 500 Hz. Sinusoidalne sygnały wyjściowe z filtrów aktywnych są doprowadzane do bloku przesuwników fazy umożliwiających zmiany przesunięcia fazowego w granicach $0+240^\circ$, sygnały z przesuwników fazy są podawane do bloku nastawników amplitudy, zrealizowanych w układzie wzmacniaczy o zmiennym wzmocnieniu, nastawialnym w obwodach ich sprzężenia zwrotnego. Sygnały wyjściowe tych wzmacniaczy zostają doprowadzone do sumatora wykonanego z wykorzystaniem precyzyjnego wzmacniacza operacyjnego, którego sygnał wyjściowy stanowi syntetyzowany przebieg odkształcony generatora. Dodatkowo, sumator wyposażony jest we wskaźnikysterowania sygnalizujący przekroczenie maksymalnej dopuszczalnej amplitudy (± 15 Vss) napięcia na wyjściu sumatora.

3.3. Wzmacniacz mocy

Wytworzony w części analogowej generatora zadany przebieg odkształcony napięcia jest doprowadzany do wzmacniacza mocy w układzie mostkowym [8], [10], [11] złożonego z:

- przedwzmacniaczy,
- stopni końcowych mocy pracujących w układach quasi-komplementarnych,
- transformatora wyjściowego.

Wzmacniacz wyposażony jest w układy zabezpieczeń przeciwzwarciowych i przeciążeniowych.

3.4. Blok pomiarowy

W skład bloku pomiarowego wchodzi moduły do pomiaru wartości maksymalnych i faz harmonicznych przebiegu odkształconego.

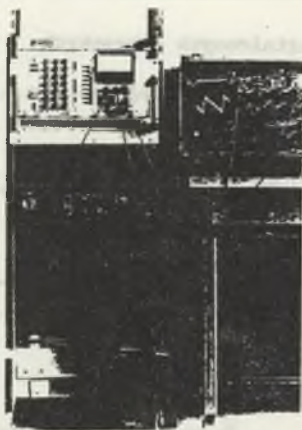
Pomiar wartości maksymalnych napięć harmonicznych na wyjściu wzmacniacza mocy zrealizowano w układzie klasycznego woltomierza z prostownikiem dwupołkowym.

Układ do pomiaru fazy zrealizowano w wersji cyfrowej. Idea działania tego układu polega na zamianie przesunięcia fazowego napięcia zadanej harmonicznej na wyjściu wzmacniacza mocy względem napięcia pierwszej harmonicznej pobieranego z części analogowej generatora (sygnał wyjściowy przesuwnika fazy pierwszej harmonicznej) na sygnał prostokątny o szerokości proporcjonalnej do wymienionego przesunięcia fazowego. Uzyskany sygnał prostokątny zostaje następnie zamieniony na ciąg impulsów, których liczba w danym cyklu pomiarowym (reprezentująca przesunięcie fazy w stopniach) zostaje wyświetlona na cyfrowym polu odczytowym.

4. CHARAKTERYSTYKA GENERATORA I PRZYKŁADOWE POMIARY

Zaprojektowany i wykonany generator napięcia odkształconego (rys.5) posiada następującą charakterystykę:

1. Przebieg napięcia generatora jest nastawialną sumą do 10 harmonicznych o częstotliwościach (50, 100, ..., 500) Hz z dowolną regulacją fazy i amplitudy.
2. Procentowy udział każdej harmonicznej w stosunku do harmonicznej podstawowej jest ustawialny w zakresie 0÷100% napięcia harmonicznej podstawowej.



Rys.5. Model zaprojektowanego i wykonanego generatora przebiegów odkształconych

Fig.5. Model of designed and ready made generator of nonsinusoidal waveform

3. Przesunięcie fazowe każdej harmonicznej w stosunku do harmonicznej podstawowej jest ustawialne w granicach $0+240^\circ$.
4. Moc wyjściowa generatora w stanie dopasowania energetycznego wynosi ok. 100 W, a jego maksymalne napięcie wyjściowe wynosi ok. 120 V.
5. Zniekształcenia każdej harmonicznej przebiegu są mniejsze od 1%.
6. Dokładność ustawiania amplitud i faz harmonicznych przebiegu odkształconego jest ok. 1%.
7. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów dla skonstruowanego generatora, przedstawionego na rys.5. stwierdzono, że charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza mocy jest maksymalnie płaska zarówno co do modułu, jak i fazy.
8. Charakterystyka zewnętrzna generatora $f(U, I) = 0$ przy obciążeniu rezystancyjnym jest liniowa dla wszystkich rozpatrywanych harmonicznych i opisana równaniem

$$U = 80 - 20I \quad I \in (0; 1) \text{ A,}$$
 zatem w tym zakresie pracy generator zachowuje się jak rzeczywiste źródło rezystancyjne o $R_w \approx 4\Omega$.
9. Generator wyposażony jest w układ zabezpieczeń umożliwiający jego pracę w warunkach zwarcia w czasie ok. 1 min; po wymienionym czasie następuje automatyczne wyłączenie generatora.

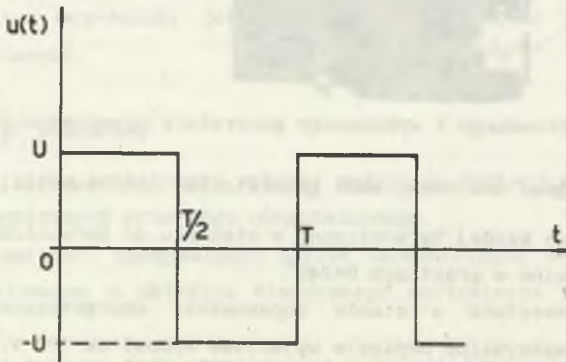
Za pomocą tak zaprojektowanego i o przedstawionych parametrach generatora przeprowadzono przykładowo syntezę i analizę przebiegów odkształconych okresowych.

4.1. Synteza przebiegów odkształconych okresowych

Dla przebiegu prostokątnego przedstawionego na rys.6, którego rozwinięcie w szereg Fouriera opisuje wzór:

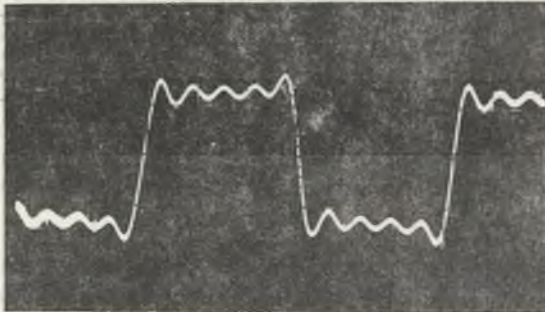
$$u(t) = \frac{4|U|}{\pi} \left(\sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \dots \right),$$

zestawiono przebieg opisany powyższym wzorem za pomocą generatora do 10-tej harmonicznej. Uzyskany w ten sposób przebieg zdjęto za pomocą oscyloskopu i przedstawiono na rys.7.



Rys.6. Przebieg prostokątny

Fig.6. Square wave

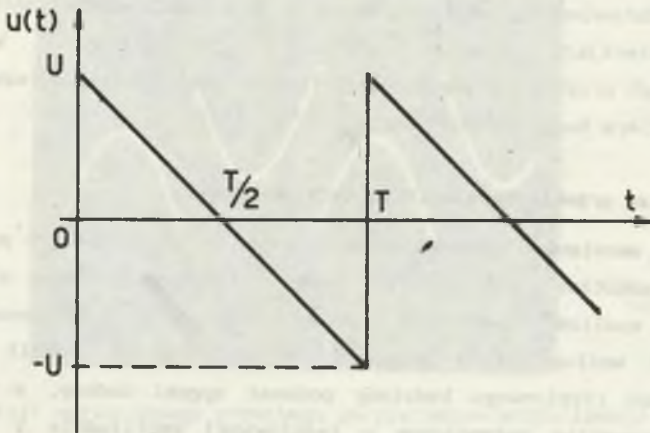


Rys.7. Uzyskany przebieg po przeprowadzonej syntezie (oscylogram)

Fig.7. Received wave after the synthesis

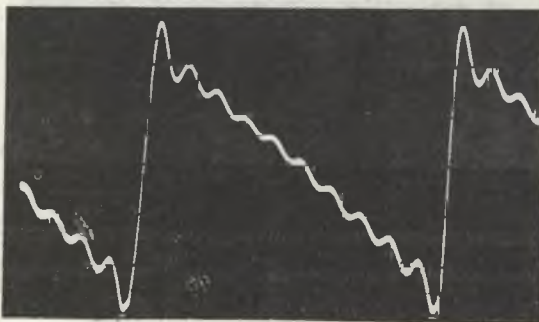
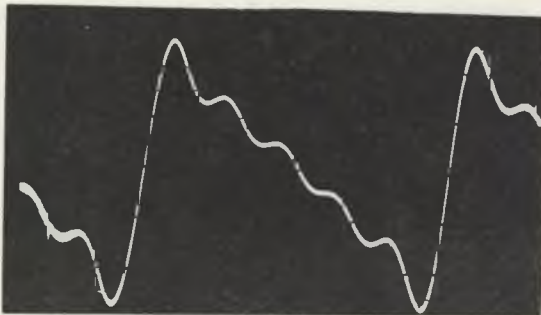
Podobną syntezę przeprowadzono dla przebiegu przedstawionego na rys.8, którego szereg Fouriera ma postać:

$$u(t) = \frac{2|U|}{\pi} \left(\sin\omega t + \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{4}\sin 4\omega t + \dots \right).$$



Rys.8. Przebieg piłowy

Fig.8. Sawtooth wave



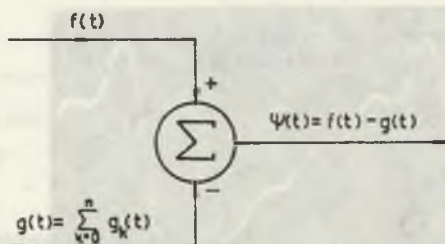
Rys.9. Uzyskane przebiegi po przeprowadzonej syntezie (oscylogramy)

Fig.9. Received waves after the synthesis

Otrzymane wyniki zdjęte za pomocą oscyloskopu przedstawiono na rys.9. Na rys.9.a przedstawiono przebieg złożony z 5 harmoniczných, natomiast na rys.9.b zawierający dziesięć pierwszych harmoniczných. W obydwu przedstawionych przykładach amplitudy i fazy dobrano zgodnie z rozwinięciami w szereg Fouriera badanych przebiegów.

4.2. Analiza przebiegów odkształconych okresowych

Za pomocą omawianego generatora można również przeprowadzić przybliżoną analizę harmoniczną zadanego przebiegu niesinusoidalnego okresowego. Przybliżoną analizę harmoniczną zadanego przebiegu okresowego można przeprowadzić według zasady przedstawionej na rys.10. Jeżeli na jedno wejście układu różnicowego będziemy podawać sygnał badany, a na drugie wejście poszczególne harmoniczne o regulowanej amplitudzie i fazie, to poprzez każdorazową kompensację można odtworzyć w przybliżeniu badany przebieg okresowy $f(t)$.



Rys.10. Schemat blokowy do analizy przebiegów odkształconych

Fig.10. Block diagram for nonsinusoidal waveform

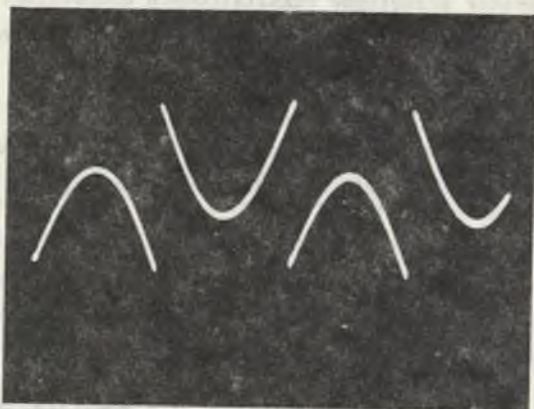
Przykładowo niech $f(t)$ będzie przebiegiem prostokątnym przedstawionym na rys.2, a $g_1(t)$ jest pierwszą harmoniczną o postaci:

$$g_1(t) = \frac{4|U|}{\pi} \sin \omega t,$$

a otrzymany dla tego przypadku przebieg $\psi(t) = f(t) - g_1(t)$ przedstawiony jest na rys.11.

Wprowadzając następne funkcje $g_k(t)$ i każdorazowo minimalizując funkcję $\psi(t)$ za pomocą amplitudy i fazy otrzymujemy kolejne przybliżenie badanej funkcji $f(t)$.

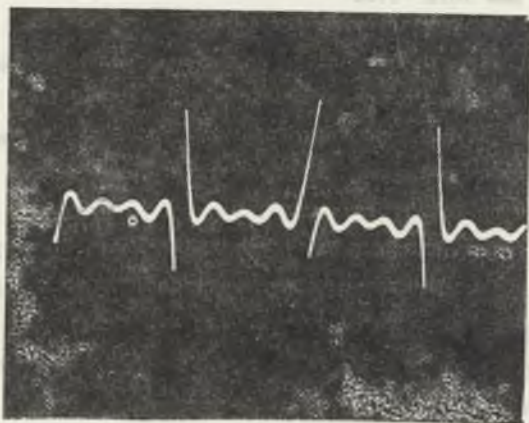
Na podstawie otrzymanych amplitud i faz przebiegu $\sum_{k=1}^n g_k(t)$ odtwarzamy przebieg $f(t)$.



Rys. 11. Kształt odtwarzanego przebiegu po pierwszym przybliżeniu (oscylogram)

Fig. 11. Curve of reproduced wave after nonsinusoidal waveform analysis

Na rys. 12 przedstawiono przeprowadzoną przybliżoną analizę harmoniczną dla przebiegu prostokątnego do 7 harmonicznej włącznie.



Rys. 12. Różnicowy przebieg $\psi(t)$ - otrzymany w wyniku analizy

Fig. 12. Differential wave $\psi(t)$ -received from the analysis

5. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione pomiary nie wyczerpują wszystkich możliwości analizy i syntezy przebiegów okresowych odkształconych.

- Skonstruowany generator przebiegów odkształconych uzupełniany o:
- zbiór odbiorników liniowych, jak i nieliniowych o programowalnych charakterystykach napięciowo-prądowych,
 - zbiór kompensatorów, zarówno pasywnych, jak i aktywnych,
- może być bardzo pomocny w badaniu zjawisk z przebiegami odkształconymi i służyć do weryfikacji różnych teorii mocy dla tych przebiegów.

LITERATURA

- [1] Bruel and Kjaer - Katalog, 1988.
- [2] Czarnecki L.S.: Interpretacja, identyfikacja i modyfikacja właściwości energetycznych obwodów jednofazowych z przebiegami odkształconymi, Monografia, ZN Pol.Śl. Elektryka, Z.91, 1984.
- [3] Cholewicki T.: Rodzaje mocy przy przebiegach odkształconych. Obecny stan badań, Przegląd Elektrotechniczny, No 3, 1980, pp.99-102.
- [4] Gohen T.: Electric Power Transmission System Engineering. Analysis and Design, J.Wiley, New York 1988.
- [5] Hewlet Packard Catalogue, 1986.
- [6] Kulka Z., Nadachowski M.: Liniowe układy scalone i ich zastosowania, WKiŁ, Warszawa 1976.
- [7] Łakomy M., Zabrodzki J.: Cyfrowe układy scalone, PWN, Warszawa 1986.
- [8] Markus J.: Guidebook of Electronics Circuits, Mc Graw Hill, New York 1984.
- [9] Schaherberger M., Awad S.S.: The Implementation of a Digital Sine Wave Oscillator Using the TM320C25: Distortion Reduction and Application. IEEE Trans on IM, Vol.39, No 6, pp.870-873, Dec.1990.
- [10] Ochenkowski L., Stasiów S.: Generator przebiegów odkształconych. Praca dyplomowa inżynierska wykonana w IETiP, Pol.Śl., 1991.
- [11] Pasko M., Topór-Kamiński L.: Laboratorium z wybranych zagadnień elektrotechniki teoretycznej. cz.I. Skrypt Pol.Śl. Nr 1398, Gliwice 1988.
- [12] Tietze U., Schenk C.: Układy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa 1987.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Jan Chojcan

Dotarło do Redakcji dnia 11 grudnia 1991 r.

Praca wykonana w ramach BK 3.26/RE-3/1991

GENERATOR OF NONSINUSOIDAL WAVEFORM**A b s t r a c t**

Simulation of phenomena occurring in electroenergetic systems with periodical and deformed wave is often carried out applying analog models of these systems. Such models should contain the deformed wave generator whose voltage can be deformable towards sinusoidal voltage in a given and programmable way. The paper describes a structure of an analog-digital generator of nonsinusoidal waveform with a voltage being a sum up to ten harmonics with optional adjustable amplitudes and phase waveforms towards the basic harmonics of this generator with 50 Hz frequency. The described generator, relatively simple in structure and very accurate, can be used not only for research work but also for teaching purposes as a part of a laboratory stand for testing and demonstrating energetic phenomena in circuits with nonsinusoidal waveform. Verification of some parameters has been carried out and presented, as well as technical possibilities of the designed generat.