

Aleksander OPILSKI
Tadeusz PUSTELNY
Marian URBAŃCZYK

UKŁADY AKUSTOELEKTRONIKI

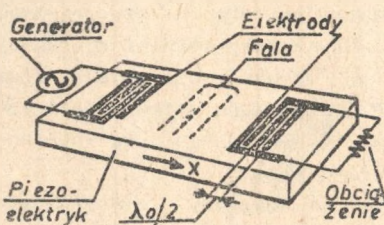
Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwości praktycznego wykorzystania zjawiska propagacji powierzchniowych fal Rayleigha w zintegrowanych układach elektroniki.

1. WSTĘP

Przełom jaki obecnie dokonuje się w klasycznej elektronice układów biernych - związany z wykorzystaniem fal akustycznych w ciałach stałych - można porównać z podobnym, jakiego dokonały obwody scalone w dziedzinie układów czynnych.

W roku 1885 Rayleigh rozpatrując rozwiązanie równania falowego na granicy dwóch ośrodków o różnych właściwościach sprężystych przewidział możliwość propagowania się na granicy tych ośrodków tzw. fali powierzchniowej, charakteryzującej się małym wnikiem w głąb [1]. Energia fali skupiona jest więc przy powierzchni.

Na możliwość szerokiego praktycznego zastosowania tego zjawiska zwrócono uwagę dopiero na początku lat 60 [2].



Rys. 1. Układ dwóch przetworników międzypalczystych do generacji i odbioru akustycznej fali powierzchniowej

najczęściej przetworniki międzypalczaste naniesione na podłożu piezoelektryczne (rys. 1) [3, 4]. Przetwornik wytwarza na powierzchni piezoelektryka przestrzennie niejednorodne, zmienne w czasie pole elektryczne. Pole

Ze względu na podobną technologię wykonania układów tzw. akustoelektroniki, nowe układy biernie stanowią doskonałe uzupełnienie czynnych układów scalonych. U podstaw pracy większości układów na falach powierzchniowych leżą trzy zjawiska fizyczne: przetwarzanie wejściowego sygnału elektrycznego na falę akustyczną, propagacja fali po powierzchni falowodu i powtórne przetwarzanie jej na sygnał elektryczny [2, 3]. Dla prostego i odwrotnego przetwarzania fali powierzchniowej stosuje się

to, poprzez zjawisko piezoelektryczne, powoduje powstanie zmiennych naprężeń, rozchodzących się w postaci fali powierzchniowej.

Konstrukcja przetwornika, wymiary i ilość elektrod, ich apretura i konfiguracja oraz materiał podłoża falowego - określa takie parametry układu, jak: częstotliwość środkowa, szerokość pasma przenoszenia, kształt charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej oraz straty przetwarzania. Sposób elektrycznego połączenia przetwornika z urządzeniami zewnętrznymi określa fazę sygnału wyjściowego, a odległość między przetwornikiem wejściowym i wyjściowym - opóźnienie sygnału [5, 6].

2. ZASTOSOWANIE AKUSTOELEKTRONIKI

Klasyfikując układy i przyrządy na falach powierzchniowych ze względu na spełniane funkcje wyróżnia się:

- akustyczne podukłady radiowe oraz
- urządzenia do obróbki sygnałów.

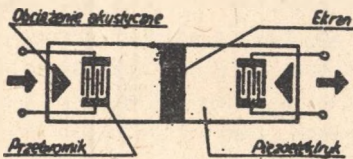
Do pierwszej grupy zaliczyć można linie opóźniające o stałym i regulowanym czasie opóźnienia, układy kształtujące widmo częstotliwościowe, do których należą filtry pasmowe, rezonatory, przyrządy pozwalające na regulację fazy i opóźnienia sygnału oraz układy realizujące sumowanie sygnałów i transformację napięcia i oporności.

Do drugiej grupy zaliczamy filtry kodowe oraz czynne układy akustyczne (wzmacniacze akustoelektryczne, układy realizujące splot i korelację sygnałów).

2.1. Linie opóźniające

Najprostszym zastosowaniem dwóch przetworników międzypalczastych są linie opóźniające (L.O) [7, 8, 9].

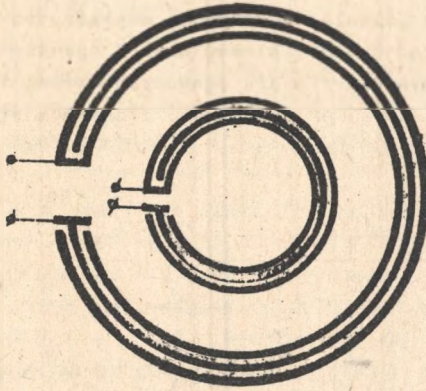
W przypadku fal powierzchniowych na powierzchni piezoelektryka należy nanieść dwa międzypalczaste przetworniki w takiej odległości, żeby uzyskać odpowiedni czas opóźnienia. Istnieje duża różnorodność konstrukcji linii opóźniających, uwarunkowana wymaganymi parametrami.



Rys. 2. Prosta L.O.

Różne warianty rozwiązań konstrukcyjnych linii przedstawiono na rys. 2, 3, 4, 5. W układzie na rys. 6 przetwornik odbiorczy otrzymuje się metodą projekcji kształtu przetwornika na fotoczułe podłoże [10].

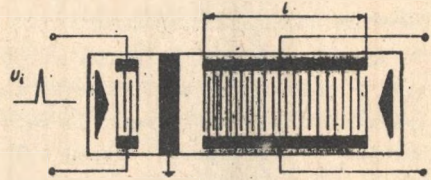
Regulacja opóźnienia wynika ze zmiany położenia obrazu przetwornika. Rys. 7 przedstawia L.O., w której regulację opóźnienia realizuje się przez zmianę modułu sprężystości falowodu. Zmiany te są wywołane polaryzacją materiału falowodu polem elektrycznym [11].



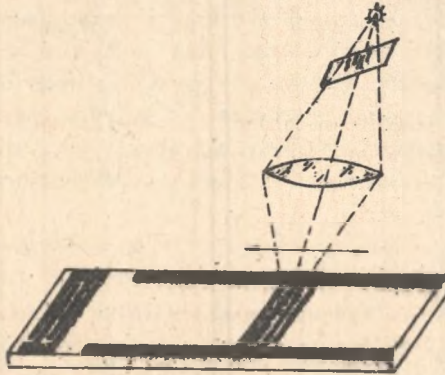
Rys. 3. L.O. z przetwornikami koncentrycznymi



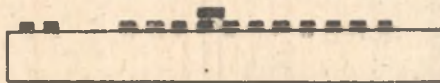
Rys. 4. Spiralna L.O.



Rys. 5. Dyspersyjna L.O.



Rys. 6. L.O. o regulowanym opóźnieniu



Rys. 7. L.O. o regulowanym opóźnieniu

Znane obecnie typy linii opóźniających na falach powierzchniowych pozwalają realizować opóźnienia w zakresie od $0,1 \mu\text{s}$ do 1 ms , a przypuszcza się, że można osiągnąć opóźnienia rzędu 10 ms przy częstotliwościach $1-10^3 \text{ MHz}$ i paśmie przenoszenia dc 100% . Duża integralność konstrukcji w porównaniu z układami tradycyjnymi, stosunkowo niskie straty energii, niski poziom sygnałów fałszywych decydują o szerokich perspektywach ich zastosowań.

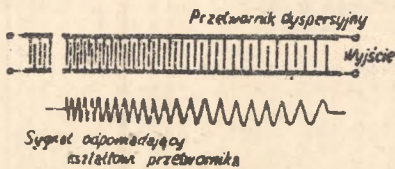
Firma Teledyna MEC produkuje linie na falach powierzchniowych od 10 MHz do 900 MHz przy opóźnieniach $0,1 \mu\text{s}$ do $50 \mu\text{s}$, szerokość pasma $2-40\%$.

Dobrym przykładem ostatnich osiągnięć w tej dziedzinie jest linia produkowana przez firmę GTE Sylvania Belgia. Jest ona stosowana zarówno do odbiorników systemu PAL jak i SECAM.

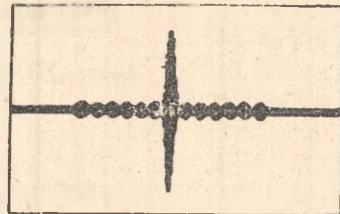
Linie opóźniające z falą powierzchniową znalazły zastosowanie w radiofonii, telekomunikacji, w urządzeniach automatyki i w metrologii. Nowe, ciekawe zastosowania przedstawiono w literaturze [10, 11, 12, 13].

2.2. Układy do kompresji impulsu

Dziedziną techniki, która rozpoczęła zainteresowanie akustyką mikrofalową i najbardziej wykorzystała jej możliwości, była radiolokacja. Kompresja impulsu wykorzystywana do zwiększenia rozdzielczości stacji radiolokacyjnej - teoretycznie znana była już w latach 40, jednak praktyczne jej zastosowanie napotykało na znaczne trudności, związane z koniecznością generacji impulsu radiolokacyjnego, o krótkim czasie trwania modulowanego częstotliwościowo w szerokich granicach [14]. Generacja takiego sygnału za pomocą fal powierzchniowych nie przedstawia żadnych trudności. Wiąże się to z faktem, iż odpowiedź impulsowa przetwornika międzypalczastego otwiera jego kształt [2, 3]. Jeśli więc przetwornik będzie miał zmienne odstępy między elektrodami, to wówczas na wyjściu otrzymamy impuls modulowany częstotliwościowo (rys. 8). Taki impuls jest emitowany przez antenę a następnie po odbiciu od celu odbierany przez filtr akustyczny i to w



Rys. 8. Układ do generacji impulsów z liniową modulacją częstotliwości

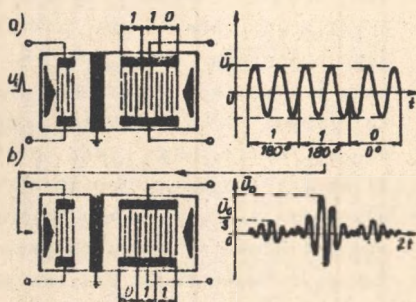


Rys. 9. Przebieg impulsowy po kompresji

taki sposób, że częstotliwości generowane później są odbierane wcześniej, tak, by odbiór wszystkich częstotliwości nastąpił w jednym momencie czasu. Wystąpi więc kompresja impulsu (rys. 9). Realizuje się to w układzie analogicznym, jak do generacji. Tylko odpowiedni, właściwy danej stacji radiolokacyjnej, sygnał może ulec kompresji. W oparciu o tego typu urządzenie pracuje duża grupa nowoczesnych stacji radiolokacyjnych na całym świecie.

2.3. Filtry kodowe

W telekomunikacji i nawigacji wykorzystuje się kodowe linie opóźniające do generacji długich kodów i ich filtracji. Na rys. 10 przedstawiono filtr do kodowania impulsów w bifazowym kodzie Barkera [15]. Jeden bit uzyskuje się przez przedstawienie zębów przetwornika.



Rys. 10. Filtr do kodu Barkera

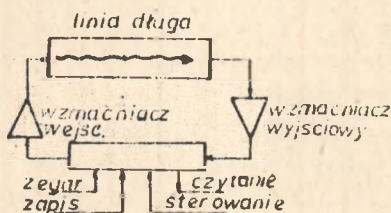
a) filtr do generacji 3-bitowego kodu Barkera, b) filtr dekodujący

Przetwornik filtru dekodującego jest odwrócony względem przetwornika filtru kodującego. Dzięki temu uzyskuje się koherentne sumowanie sygnałów od poszczególnych bitów. Elementy te są proste i niezawodne, idealnie współpracują z obwodami scalonymi o dużej skali integracji. Stosuje się je np. w satelitach telekomunikacyjnych.

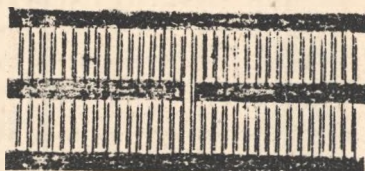
2.4. Pamięci cyrkulacyjne

Jednym z zastosowań linii opóźniających są pamięci cyrkulacyjne do pamiętania przebiegów impulsowych (cyfrowych). Ideę pamięci przedstawiają rys. 11, 12.

Przetwornik kodowy wytwarza sekwencję impulsów krążących w zamkniętej pętli. Pojemność pamięci cyrkulacyjnej określają parametry L.O. Zaletami pamięci akustycznych są małe wymiary, duża pojemność informacyjna, łatwy dostęp do informacji, prosta technologia i powtarzalność konstrukcji a więc i niska cena.



Rys. 11. Pamięć cyrkulacyjna

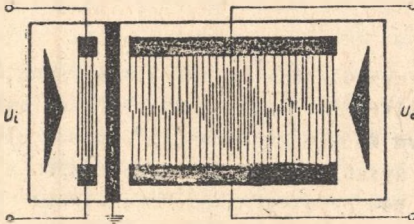


Rys. 12. Przetwornik kodowy

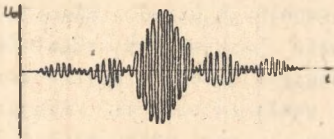
2.5. Filtry pasmowe

Znajomość odpowiedzi impulsowej pozwala w prosty sposób opisać charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową przetwornika [5, 6, 18].

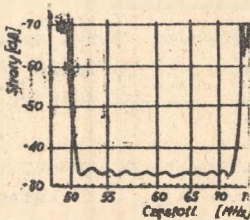
Z zasady działania wynika, że po przyłożeniu do przetwornika bardzo wąskiego impulsu wypromieniowuje on paczkę fali akustycznej, dokładnie odwzorowującej kształt tegoż przetwornika. Jeśli przetwornik ma niektóre e-



Rys. 13. Kształt przetwornika między-palczastego dla filtra pasmowego



Rys. 14. Odpowiedź impulsowa przetwornika



Rys. 15. Charakterystyka amplitudowa filtra pasmowego

- straty ogólne (dla kryształów): 20-60 dB,
- odległość listków bocznych charakterystyki min. 30 dB,
- duża stabilność czasowa i temperaturowa układu.

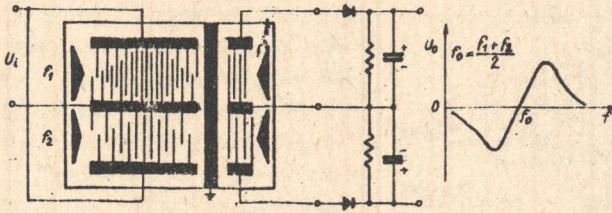
Wyniki uzyskiwane obecnie wskazują na możliwość zastąpienia filtrów klasycznych filtrami na fali powierzchniowej w takich dziedzinach, jak: radiolokacja, telewizja, radiofonia FM itp. [17]. Na rys. 16 przedstawiono detektor sygnałów modulujących częstotliwościowo. Jest to układ z dwoma rozstrojonymi filtrami, pracującymi w układzie przeciwsobnym.

Jeśli przetwornik ma niektóre elektrody krótsze, będzie to uwidocznione w jego odpowiedzi impulsowej. Ilustrują to rys. 13, 14, 15. Jeden z przetworników jest bardzo wąski i po przyłożeniu impulsu generuje falę o krótkim czasie trwania, odbieraną przez drugi przetwornik. Kształt jego odpowiada funkcji $\frac{\sin x}{x}$, a więc i odpowiedź impulsowa jest tego typu. Taka właśnie odpowiedź realizowana jest przez filtr o prostokątnej charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej i liniowej charakterystyce fazowej. Technologia filtrów pasmowych na falach powierzchniowych osiągnęła już taki poziom, że są one konkurencyjne dla filtrów tradycyjnych. Podstawową ich za-

letą jest powtarzalność, brak konieczności zestrzania każdego filtra, małe rozmiary, niezawodność, niskie koszty wytwarzania.

Ogólnie można nakreślić następujący obszar możliwych do osiągnięcia parametrów filtrów z akustyczną falą powierzchniową:

- częstotliwość środkowa: kilka MHz do kilku GHz,
- pasmo przenoszenia 2-40%,
- straty niedopasowania przy pracy na 50Ω : ok. 10-50 dB,

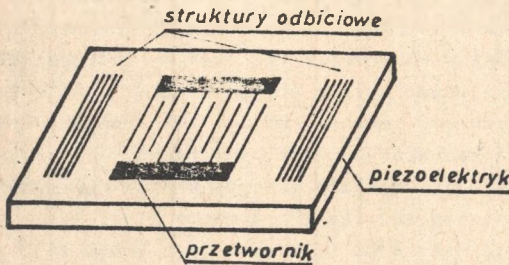


Rys. 16. Detektor sygnałów modulowanych częstotliwościowo

2.6. Rezonatory na fali powierzchniowej

Problem stabilizacji częstotliwości jest niezwykle ważny w urządzeniach radiolokacji, łączności itp., pracujących na dużych częstotliwościach. Tradycyjne rozwiązania pracy rezonatorów w oparciu o fale objętościową są stosowane w zakresie

częstotliwości do ok. 30 MHz. Częstotliwościowy obszar pracy rezonatora fali powierzchniowej rozciąga się od ok. kilkunastu MHz do 1000 MHz. Dobroć rezonatora jest rzędu 10^3 . Układ rezonatora składa się z dwóch struktur odbiciowych oraz szerokopasmowego przetwornika międzypalczasteo, umieszczonego między nimi (rys, 17), [19, 20]. Wytworzo-



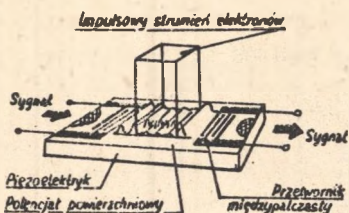
Rys. 17. Rezonator fali powierzchniowej

ne przez przetwornik fale powierzchniowe po odbiciu od struktur odbiciowych interferują. Między strukturami powstaje fala stojąca. Znakomite parametry rezonatora, takie jak: szeroki obszar częstotliwościowy pracy, wysoka dobroć, duża stabilność temperaturowa i czasowa układu, przyczynią się do szerokiego zastosowania układu w elektronice wysokich częstotliwości.

2.7. Pamięć akustoelektronowa

Do ciekawych zastosowań fal powierzchniowych można zaliczyć pamięć akustoelektronową, umożliwiającą pamiętanie impulsów przez dłuższy czas (rys. 18), [21].

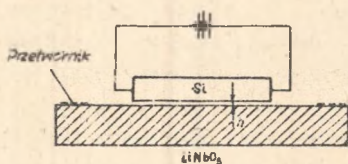
Propagująca fala jest w pewnym momencie "oświetlona" strumieniem elektronów, które powodują naładowanie powierzchni w danym momencie odwzorowującej potencjał związany z falą. Potencjał ten może być zachowany przez dłuższy czas (powoduje on powstanie odpowiednich naprężeń mechanicznych). Po powtórny "oświetleniu" elektrony niwelują "zapamiętany" potencjał, powodując zanik naprężeń mechanicznych, które wypromieniowane są w postaci



Rys. 18. Schemat pamięci akustoelektronowej

2.8. Czynne układy akustyczne

Pole elektryczne związane z propagującą się w piezoelektryku falą akustyczną może oddziaływać ze swobodnymi nośnikami ładunku w półprzewodnikach i to zarówno wtedy, gdy piezoelektryk posiada właściwości półprzewodnikowe, jak również w przypadku, gdy fala propaguje się w piezoelektryku, do którego przyłożony jest półprzewodnik [22, 23]. Jeżeli w półprzewodniku zostanie wywołany przepływ ładunków elektrycznych, to w następstwie oddziaływań pola elektrycznego związanego z falą powierzchniową i pola elektrycznego od przepływających ładunków może nastąpić przekazywanie energii ładunków do fali powierzchniowej. Zjawisko to znalazło zastosowanie w tzw. wzmacniaczach akustoelektronowych (rys. 19). Układ tego typu może spełniać równocześnie funkcję wzmacniacza elektronicznego i filtra o żądanej charakterystyce częstotliwościowej.



Rys. 19. Układ wzmacniacza akustoelektronowego

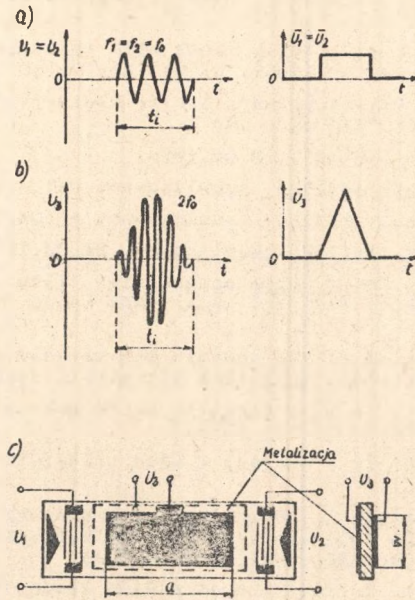
Zakres uzyskiwanych wzmocnień sięga do 60 dB, przy częstotliwościach od 10 do 500 MHz i niskim poziomie szumów. W pracy [24] zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania oddziaływań elektronów przewodnictwa z falą powierzchniową w badaniach ciała stałego, a w szczególności stanów powierzchniowych w półprzewodnikach. Z pomiarów prędkości i tłumienia fali powierzchniowej można otrzymać wszelkie informacje o powierzchni półprzewodnika, a więc o gęstości stanów powierzchniowych, prawdopodobieństwie obsadzenia poziomów powierzchniowych i o potencjale powierzchniowym.

2.9. Układy parametryczne

Przy dużej gęstości mocy akustycznej, propagacji fali towarzyszą zjawiska nieliniowe [25]. Prowadzi to do generacji harmonicznych, a więc występuje dodatkowe tłumienie sygnału użytecznego i ograniczenie dynamiki układu. W przypadku, gdy w ośrodku rozchodzą się jednocześnie dwie fale, wskutek oddziaływań nieliniowych, istnieje możliwość parametrycznego wzmacniania i generacji sygnałów. Na tej zasadzie można budować układy

fali akustycznej dokładnie takiej samej, jaka była zapamiętana. Tego typu urządzenia umożliwiają zapamiętywanie sygnałów na okres kilkudziesięciu i więcej minut. Pamięć akustoelektronowa może znaleźć zastosowanie w mikroskopach ultradźwiękowych oraz do rejestracji i zapamiętania szybkich przebiegów impulsowych.

dokonujące operacji splotu i korelacji w czasie rzeczywistym. Można wykazać, że jeśli fale poruszają się naprzeciw siebie, to sygnał powstający w wyniku ich parametrycznego oddziaływania jest proporcjonalny do splotu tych fal, natomiast jeśli przesuwają się w tym samym kierunku, to w wyniku otrzymamy funkcję korelacji (rys. 20).



Rys. 20

- a) układ parametrycznego splotu, b) impuls wejściowy i jego obwiednie,
 c) impuls wyjściowy i jego obwiednie

3. PODSUMOWANIE

W pracy zwrócono uwagę na niektóre możliwości zastosowań fal powierzchniowych Rayleigha w akustoelektronice. Należy podkreślić, że zalety układów akustoelektroniki zdecydowały o ich konkurencyjności w stosunku do układów tradycyjnych, a w pewnych zastosowaniach już obecnie zastąpiły klasyczne układy elektroniczne.

LITERATURA

- [1] Lord Rayleigh: On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. Proc. London Math. Soc. 1885, t. 17, s. 4.
 [2] White R.: Powierzchniostnyje uprugije wołny (obzor). "TNNER" 1970, T.58, No 8, s. 68-110.

- [3] Wiktorow N.A.: Fiziczeskije osnovy primienienija ultrazwukowych wołn Releja i Lemba w technieke. M., "Nauka" 1966.
- [4] White R.M.: Surface elastic waves. Proc. IEEE, 1970, t. 58, s. 1238.
- [5] De Klerk J.: Ultrasonics transducers. Ultrasonics 1974, s. 35.
- [6] Smith W.R. et al.: Analysis of interdigital surface wave transducers by use of an equivalent circuit model. IEEE Trans. 1969, t. MTT-17, s. 856.
- [7] Brockelsby C.F.: Ultrasonics delay lines. London, Liffé books Ltd., 1963.
- [8] Desing of surface wave delay lines with interdigital transducers, IEEE Trans. Microw. Th, 1969, v. MTT-17, No 10.
- [9] Karinskij S.S.: Ultrazwukowaja linija zadierzki na uprugich powierzchniowych wołnach, "BI" 1970, No 7.
- [10] Patent francuski 2205253, 28.06.1974.
- [11] Patent amerykański 3801935, opublikowany 02.04.1974.
- [12] Patent amerykański 3727155, opublikowany 10.04.1973.
- [13] Patent brytyjski 1351286, opublikowany 24.04.1974.
- [14] Martin T.A.: The IMCON pulse compression filter and its applications. IEEE Trans. Microwave Gheory Tech. this issue, s. 186, MTT-21, No 4, 1973.
- [15] Wrigley C.Y., et al.: Programmable SAW Metchod Filters for Phase - Coded Waveforms, Proc. 1972 IEEE Ultrasonic Symposium.
- [16] Von der Vaart H., et al.: Acoustic Surface-wave Recirculating Memory IEEE Trans., MTT-21, No. 4, 1973.
- [17] Chauvin D.: Acoustic - surface - wave television filters. El. Lett., t. 7, 1971.
- [18] Cerowski Z., Opilski A., Pustelny T., Urbańczyk M.: O pewnej przybliżonej metodzie obliczania filtrów na powierzchniowych falach akustycznych. Archiwum Akustyki, 11, 1, 1975.
- [19] Staples E.I.: UHF Surface Acoustic Wave Resonators, Proceedings of the 1974 Symposium on Frequency Control, Fort Mommouth, New Jersey.
- [20] Urbańczyk M., Filipiak J.: Rezonator fali powierzchniowej Raileigha. Biuletyn WAT (praca w druku).
- [21] Epstein B., Kantorowicz G.: Signal Procesing by Electron-Beam Interaction with, Piezoelectric Surface Wave, IEEE Trans MZZ-21, v. 1973.
- [22] Wiktorow I.: O wzajemnoejstwi relejewskich wołn z elektronami przewodimosti w CdS. Akusticzeskij Żurnał, t. 12, No 2.
- [23] Gulajew J.: Usilenije powierzchniowych wołn w strukturie piezoelektriczeskaja plenka - półuprowodnik, Izwiestija AN CCCP, Ser. Fiz. t. 35, No. 5, 1971.
- [24] Opilski A.: Wpływ stanów powierzchniowych na propagację powierzchniowej fali ultra i hiperdźwiękowej. Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej, Mat.-Fizyka, nr 20, 1976.
- [25] Quate C.F.: Convolution and correlation in real time nonlinear acoustic. Appl. Phys. Lett., v. 16, No.18, 1970.

СИСТЕМЫ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

Резюме

В работе рассмотрены возможности практического использования явления распространения поверхностных волн Rayleigha в интегрирующих системах электроники.

SYSTEMS OF ACOUSTIC ELECTRONICS

Summary

In the work there have been presented possibilities of taking advantage of the phenomenon of propagation of Rayleigh superficial waves.