

ANDRZEJ NIEPOŁOMSKI

Katedra Elektroniki

EKSTRAPOLATOR LINIOWY

Streszczenie. W artykule podano opis układu, realizującego proces liniowej ekstrapolacji impulsowego sygnału wejściowego. Najwięcej uwagi poświęcono zasadniczej części układu, jaką jest ekstrapolator rzędu 0. Przedstawiono własności zbudowanego modelu ekstrapolatora rzędu 0 oraz wyniki dokonanych na tym modelu pomiarów, na podstawie których sformułowano wnioski, dotyczące całego opisanego układu.

1. WSTĘP

W technice impulsowej często zachodzi potrzeba odzyskania oryginalnego sygnału ciągłego $S(t)$ na podstawie ciągu dyskretnych wartości $S^*(t)$, uzyskanego w wyniku próbkowania sygnału $S(t)$. Celowi temu służą ekstrapolatory. Konstrukcja ekstrapolatorów oparta jest o następujące wyrażenie, określające przebieg sygnału wyjściowego $S_{wy}(t)$ ekstrapolatora w przedziale czasu $nT_p \leq t < (n+1)T_p$, gdzie T_p - okres powtarzania impulsów w sygnale $S^*(t)$:

$$S_{wy}(t) = S^*(nT_p) + \Delta S^*(nT_p)(t-nT_p) + \frac{\Delta^2 S^*(nT_p)}{2!}(t-nT_p)^2 + \dots \quad (1)$$

przy czym:

$$\Delta S^*(nT_p) = \frac{1}{T_p} \left\{ S^*(nT_p) - S^*[(n-1)T_p] \right\},$$

$$\Delta^2 S^*(nT_p) = \frac{1}{T_p} \left\{ \Delta S^*(nT_p) - \Delta S^*[(n-1)T_p] \right\}.$$

Wielomian, znajdujący się po prawej stronie wyrażenia (1), aproksymuje przebieg $S(t)$ w czasie $nT_p \leq t < (n+1)T_p$ na podstawie dyskretnych wartości $S^*(nT_p)$, $S^*[(n-1)T_p]$, ..., przy czym rząd wielomianu określa rząd ekstrapolatora. W ten sposób przebiegi $S_{wy}(t)$, $t \in [nT_p, (n+1)T_p)$, dla ekstrapolatorów rzędu 0 i 1 będą następujące:

$$S_{wy0}(t) = S^*(nT_p), \quad (1a)$$

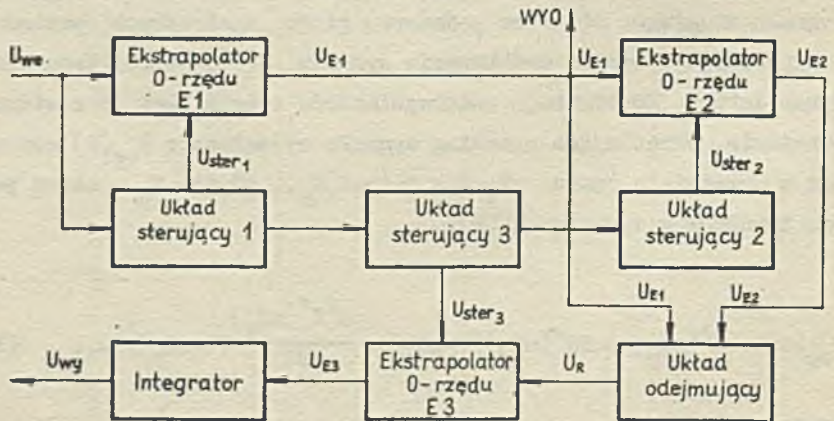
$$S_{wy1}(t) = S^*(nT_p) + \frac{1}{T_p} \{ S^*(nT_p) - S^*[(n-1)T_p] \} (t - nT_p). \quad (1b)$$

W tabelicy 1 zestawiono własności ekstrapolatorów rzędu 0 i 1 [2] oraz opisaną w niniejszym artykule przybliżoną realizację ekstrapolatora rzędu 1, dla której przyjęto nazwę ekstrapolatora liniowego.

2. OPIS UKŁADU EKSTRAPOLATORA LINIOWEGO

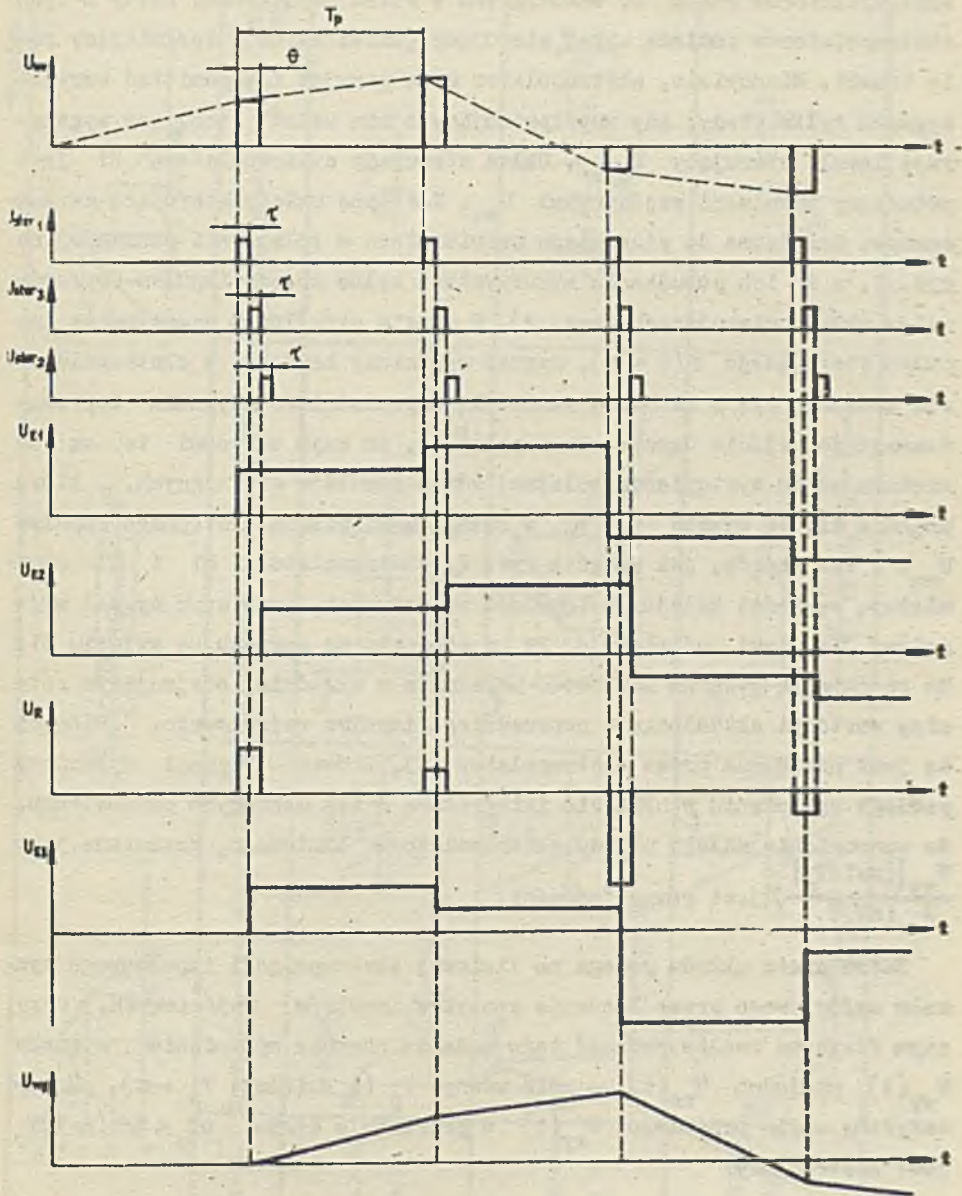
2.1. Schemat blokowy i sposób działania układu

Schemat blokowy ekstrapolatora liniowego przedstawia rys. 1.



Rys. 1

Sposób działania układu ilustruje rys. 2, na którym przedstawiono czasowe przebiegi sygnałów, oznaczonych na schemacie blokowym. Sygnał wejściowy układu U_{we} jest podawany na wejście pierwszego z trzech



Rys. 2

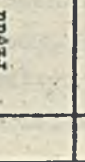
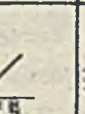
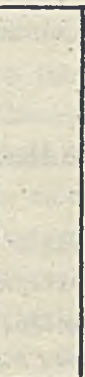
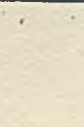
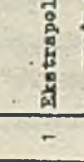
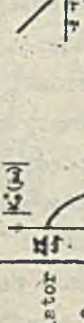
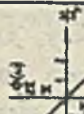
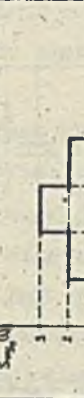
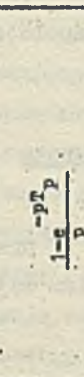
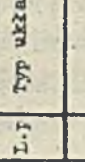
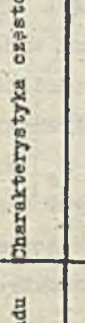
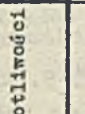
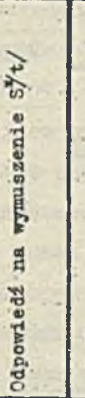
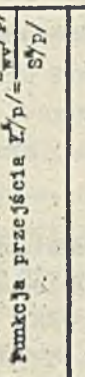
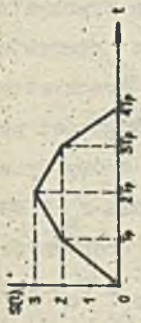
ekstrapolatorów rzędu 0, wchodzących w skład urządzenia. Każdy z tych ekstrapolatorów posiada układ sterujący (uniwibrator), spełniający rolę bramki. Mianowicie, ekstrapolator może przyjąć i zapamiętać wartość sygnału tylko wtedy, gdy współpracujący z nim układ sterujący wygeneruje impuls sterujący U_{ster} . Układ sterujący ekstrapolatora E1 jest pobudzany impulsami wejściowymi U_{we} . Następne układy sterujące są łańcuchowo dołączone do pierwszego uniwibratora w kolejności pokazanej na rys. 1, a do ich pobudzania wykorzystano tylne zbrocze impulsu poprzedniego układu sterującego (rys. 2). W czasie określonym szerokością impulsu sterującego τ ($\tau < \theta$), sygnał wyjściowy każdego z ekstrapolatorów zrównuje się z aktualną wartością odpowiedniego sygnału doprowadzanego do wejścia danego ekstrapolatora, po czym wartości te są pamiętane aż do wystąpienia kolejnej serii impulsów sterujących, która pojawia się po czasie T_p , tj. w chwili wystąpienia następnego impulsu U_{we} . W ten sposób, jak widać z rys. 2, ekstrapolatory E1 i E2 zapamiętują wartości kolejnych impulsów wejściowych, przy czym sygnał wyjściowy E2 jest opóźniony o $2T$ w stosunku do sygnału na wyjściu E1. To opóźnienie stwarza możliwość uzyskania w układzie odejmującym różnicy wartości aktualnego i poprzedniego impulsu wejściowego. Różnica ta jest pamiętana przez ekstrapolator E3, którego sygnał wyjściowy podlega całkowaniu w układzie integratora o tak dobranych parametrach, że wzmocnienie całego układu ekstrapolatora liniowego, rozumiane jako $\frac{U_{wy}[(n+1)T_p]}{U_{we}(nT_p)}$, jest równe jedności.

Zatem praca układu polega na liniowej ekstrapolacji impulsowego sygnału wejściowego przez łączenie szczytów impulsów wejściowych, przy czym fizyczna realizowalność tego zadania narzuca opóźnienie sygnału $U_{wy}(t)$ względem $U_{we}(t)$ o czas równy T_p (a ściślej: $T_p + \tau$). Matematyczny zapis przebiegu $U_{wy}(t)$ w przedziale czasu $nT_p \leq t < (n+1)T_p$ jest następujący:

$$U_{wy}(t) = U_{we}^*[(n-1)T_p] + \frac{1}{T_p} \left\{ U_{we}^*(nT_p) - U_{we}^*[(n-1)T_p] \right\} (t - nT_p). \quad (2)$$

Tablica 1

L.f	Typ układu	Charakterystyka czułościwości	Odpowiedź na wymuszenie S/t	Funkcja przejścia $K/p = \frac{S_{wy}/p}{S_{wz}/p}$
1	Ekstrapolator rzędu 0			$\frac{1-e^{-pT_p}}{p}$
2	Ekstrapolator rzędu 1			$\frac{1}{p} \left[1 + \frac{1}{pT_p} \right] \left[1 - e^{-pT_p} \right]^2$
3	Ekstrapolator liniowy			$\frac{1}{p^2 T_p} \left[1 - e^{-pT_p} \right]^2$

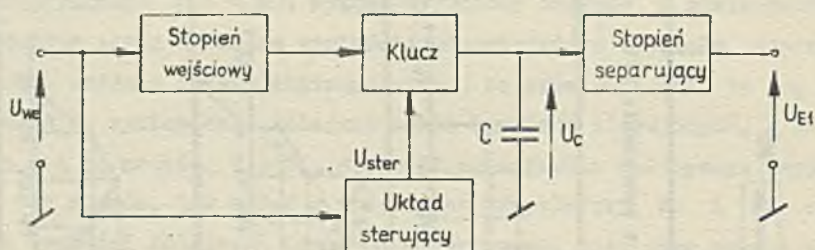


W tabelicy 1 porównano własności ekstrapolatorów rzędu 0 i 1 oraz ekstrapolatora liniowego.

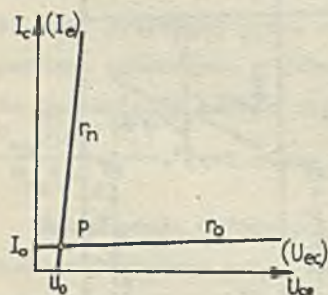
2.2. Elementy układu ekstrapolatora liniowego

Ekstrapolator rzędu 0

Schemat blokowy ekstrapolatora rzędu 0 przedstawia rys. 3. Układ składa się z klucza, poprzedzonego stopniem wejściowym, kondensatora pamiętającego oraz stopnia separującego.



Rys. 3



Rys. 4

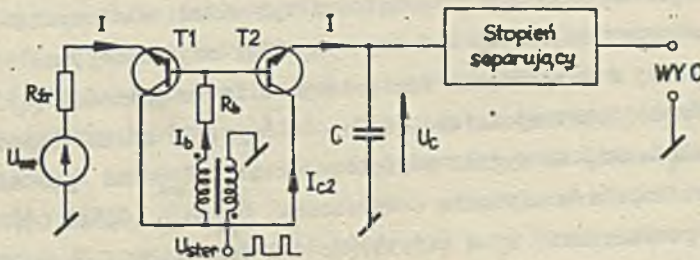
W układzie zastosowano kompensacyjny klucz szeregowy, zbudowany na tranzystorach krzemowych BF519, włączonych inwersyjnie. O własnościach klucza tranzystorowego decydują - jak widać z charakterystyk nasycenia i odcięcia tranzystora (rys. 4) - cztery parametry: wartości prądu I_0 i napięcia U_0 oraz opory dynamiczne charakterystyki nasycenia r_n i odcięcia r_o . Przez włączenie tranzystora w sposób inwersyjny uzyskuje się zmniejszenie parametrów I_0 i U_0 , tzn. przybliżenie punktu P do początku układu współrzędnych (I_e, U_{ec}) . Zastosowanie tranzystorów krzemowych zapewnia bardzo małą wartość I_0 , rzędu 10^{-9} (A), bardzo dużą wartość r_o (kilka ÷ kilkanaście (M Ω)) i pomijalną niestabilność termiczną tych parametrów. Wartości U_0 i r_n za-

leżą od temperatury i prądu bazy I_b , przy czym istnieje $I_b = I_{b \text{ opt}}$, zapewniający przy danej temperaturze minimalną wartość U_o . Dla tranzystorów krzemowych pracujących inwersyjnie $I_{b \text{ opt}} = (2 \pm 4) \text{ (mA)}$, $U_o = (1,5 \pm 3,0) \text{ (mV)}$ przy niestabilności $5 \text{ (}\mu\text{V/deg)}$ [1].

W celu uzyskania jeszcze korzystniejszych parametrów stosuje się klucze kompensacyjne, zbudowane na dwóch tranzystorach, przy czym zależnie od sposobu włączenia drugiego tranzystora (kompensacyjnego) różni się klucze szeregowo i równoległe. Układ szeregowy charakteryzuje się lepszą kompensacją napięcia U_o , niż układ równoległy. Ponadto w kluczu szeregowym następuje powiększenie, a w kluczu równoległym - zmniejszenie oporności r_o w stosunku do klucza pojedynczego. Zastosowano więc w układzie ekstrapolatora kompensacyjny klucz szeregowy.

Napięcie sterujące pracą klucza, mające postać impulsów prostokątnych, doprowadza się poprzez transformator impulsowy o odpowiednio dobranych stałych czasowych tak, aby zapewnić przepływ prądu bazy $I_b = I_{b \text{ opt}} = \text{const}$ przez cały czas zamknięcia klucza. Dzięki zastosowaniu transformatora brak jest galwanicznych połączeń między głównym obwodem klucza a obwodem sterującym.

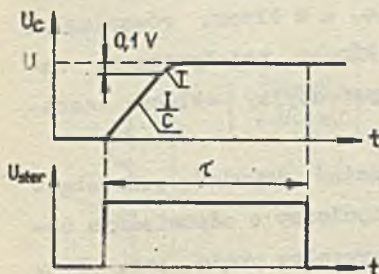
Normalna praca klucza, polegająca na tym, że obydwa tranzystory T1 i T2 (rys. 5) są albo w stanie odcięcia ($U_{\text{ster}} = 0$, klucz otwarty),



Rys. 5

albo w stanie nasycenia ($U_{\text{ster}} = \bar{U}_{\text{ster}} > 0$, klucz zamknięty), ma miejsce tylko wtedy, kiedy prądy emiterów obu tranzystorów nie przekraczają wartości, powodującej wyjście tranzystora z nasycenia. Jeżeli na-

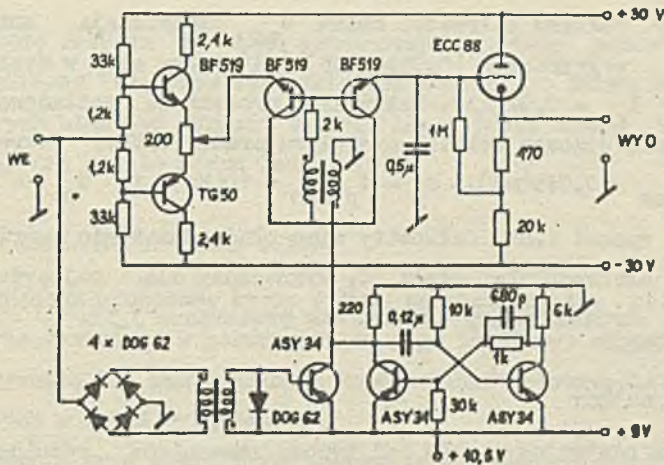
omiast jeden z tranzystorów, wskutek przepływu odpowiednio dużego prądu w obwodzie emitera, przechodzi do obszaru aktywnego, wówczas klucz zachowuje się jak źródło prądu stałego I , o wielkości zależnej od prądu bazy I_b i od parametrów tranzystora. Założmy np., że $U_{we} = +U$ i $U_c = 0$. W momencie pojawienia się impulsu sterującego tranzystor T2 nasycy się i kolektory obu tranzystorów są na potencjale ziemi. Wobec tego T1 przewodzi inwersyjnie z napięciem $U_{ec} = +U$, a prąd bazy tego tranzystora jest znacznie mniejszy od prądu bazy T2, równego praktycznie całemu prądowi I_b . W tej sytuacji $I_{c2} \approx 0$ oraz $I \approx I_b = \text{const}$, następuje więc ładowanie kondensatora C stałym prądem I i napięcie $U_c(t)$ rośnie liniowo w czasie (rys. 6) z nachyleniem: $\frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{I}{C} = \text{const}$.



Rys. 6

cy spada przez pozostałą część czasu τ wykładniczo ze stałą czasową $T = C(R_{zr} + r_{nk})$, gdzie r_{nk} - opór zamkniętego klucza kompensacyjnego. Dla poprawnego działania układu oporność wewnętrzna źródła R_{zr} powinna być jak najmniejsza. W związku z tym układ ekstrapolatora wyposażono w stopień wejściowy o dużej oporności wejściowej, małej oporności wyjściowej i wzmocnieniu napięciowym bliskim jedności [4].

Wykonany model ekstrapolatora rzędu 0 (rys. 7) został zaprojektowany przy założeniu, że sygnał wejściowy układu U_{we} ma postać ciągu prostokątnych impulsów napięcia o wysokości $\bar{U}_{we} = \pm (0,5 \pm 2,0)(V)$, częstotliwości powtarzania $f_p = (10 \div 50)(Hz)$ i szerokości $\theta = 5\%T_p = 5\% \frac{1}{f_p}$. Zakres zmian wartości sygnału wejściowego $\Delta U_{we \max} = 4,0 (V)$ nie przekracza dopuszczalnej dla tranzystorów BF519 wartości $U_{eb \max} = 5(V)$, co pozwala na korzystne inwersyjne włączenie tranzystorów klucza.



Rys. 7

Stopień wejściowy układu charakteryzuje się następującymi danymi:
 $R_{we} \cong 17 (k\Omega)$, $R_{wy} \cong 120 (\Omega)$, $k_u = 0,97 \cong 1$.

Przyjęta wartość pamiętającego kondensatora $C = 0,5 (\mu F)$ jest maksymalną wartością, gwarantującą jeszcze prawidłowy przebieg procesu ładowania kondensatora (dokładność zrównania napięć U_{we} i U_c przy zamkniętym kluczu jest lepsza od 0,1%). W celu zapewnienia dokładności pamiętania napięcia przez kondensator C nie gorszej od 5% wymagana wartość oporności wejściowej stopnia separującego wynosi ok. $5 (M\Omega)$. Taką oporność wejściową w stałoprądowych układach zbudowanych na tranzystorach bipolarnych jest jedynie wyjątkowo osiągalna w skomplikowanych i kosztownych rozwiązaniach. Natomiast w typowych i prostych układach lampowych osiąga się bez trudu oporności wejściowe znacznie przekraczające $5 (M\Omega)$. Dlatego jako stopień separujący zastosowano wtórnik katodowy. Oporność wejściowa wtórnika przy braku prądu siatkowego: $R_{we0} = 0,28 (M\Omega)$, w związku z czym procentowy błąd pamiętania wartości napięcia przez ekstrapolator, wynikający z rozładowywania się kondensatora pamiętającego przez R_{we0} i oporność otwartego klucza r_{ok} (rzędu $20 (M\Omega)$), nie przekracza w najgorszych warunkach pracy (przy $f_p = f_{p \min} = 10 (Hz)$) wartości 1,7%. Jak wynika ze zdjętych charaktery-

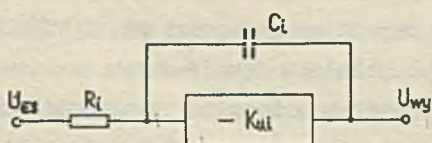
styk lampy, pełnemu zakresowi zmian U_{we} odpowiadają zmiany prądu siatki I_s w granicach $(0,01 \pm 0,045)$ (μA), przy czym w statycznym punkcie pracy $I_{s0} = 0,02$ (μA). Maksymalne procentowe rozładowanie kondensatora pamiętającego wskutek przepływu prądu siatki, określone dla $I_s = I_{s \max} = 0,045$ (μA), $f_p = f_{p \min} = 10$ (Hz) i $U_{we} = U_{we \min} = 0,5$ (V), wynosi 1,8%. Całkowity więc błąd pamiętania wartości napięcia przez ekstrapolator rzędu 0, wyznaczony dla najbardziej niekorzystnych warunków pracy układu, nie przekracza 3,5%.

Układ odejmujący

Układem odejmującym może być typowy wzmacniacz różnicowy, który spełniałby dodatkowo funkcję korekcji wzmocnienia dla całego układu ekstrapolatora liniowego. Potrzeba korekcji wzmocnienia wynika stąd, że współczynniki wzmocnienia ekstrapolatorów rzędu 0 są nieco niższe od pożądanej wartości równej 1.

Integrator

Jako integrator przewidziano układ wykorzystujący efekt Millera (rys. 8). Jak wspomniano w punkcie 2.1, wzmocnienie całego układu ek-



Rys. 8

trapolatora liniowego powinno być równe jedności. W związku z tym nachylenie prostoliniowego (w każdym okresie T_p) przebiegu wyjściowego integratora powinno być zmienne, zależnie od aktualnej wartości częstotliwości f_p z przedziału (10 ± 50) (Hz). Regulacji szybkości całkowania najwygodniej dokonywać jest za pomocą zmian wielkości stałej czasowej $T_1 = R_1 C_1 (1 + K_{u1})$ przez dobieranie różnych wartości R_1 przy $C_1 = \text{const}$, $K_{u1} = \text{const}$, w sposób albo ciągły, używając potencjometru, albo skokowy, polegający na wybraniu za pomocą przełącznika wielopozycyjnego jednej z kilku wartości R_1 . Wykorzystując drugi sposób regulacji szybkości całkowania, można tak wybrać ciąg załączanych kolejno dziesięciu wartości R_1 , że

dla całego zakresu f_p błąd procentowy, wnoszony przez integrator, nie przekracza 10%, przy czym istnieje wówczas po dziewięć wartości f_p , dla których błąd ten wynosi 0 oraz dla których osiąga wielkość ekstremalną, nie zawsze równą jednak 10%.

3. OCENA DOKŁADNOŚCI PRACY UKŁADU

Decydującym procesem, który wpływa na niekorzystną różnicę w pracy układu rzeczywistego w porównaniu do jego idealnego odpowiednika, jest rozładowywanie się pamiętających kondensatorów ekstrapolatorów rzędu 0, wchodzących w skład urządzenia.

Obliczenia oraz pomiary wykonanego modelu ekstrapolatora rzędu 0 pokazały, że dla tego układu rozładowywanie się kondensatora o maksimum 3,5% pamiętanej wartości napięcia nie powoduje praktycznie żadnych różnic w pracy ekstrapolatora idealnego i rzeczywistego. Mianowicie, zmierzono widma sygnału wyjściowego ekstrapolatora rzędu 0 przy doprowadzeniu na jego wejście sygnału sinusoidalnego o częstotliwości $f_0 = 5(\text{Hz})$, próbkowanego w pierwszym pomiarze z częstotliwością $f_{p1} = 10(\text{Hz})$, a następnie z częstotliwością $f_{p2} = 40(\text{Hz})$. Wyniki pomiarów charakteryzowały się dużą zgodnością z wynikami obliczeń, przeprowadzonych dla idealnego ekstrapolatora. Niewielkie różnice między wartościami zmierzonymi a obliczonymi nie przekraczały granic dokładności pomiaru.

Natomiast w układzie ekstrapolatora liniowego proces rozładowywania się pamiętających kondensatorów ma duże znaczenie, przede wszystkim wtedy, gdy odtwarzane przez ekstrapolator sygnały ciągłe są stałe lub wolnozmiennie o szybkościach narastania lub opadania równych w przybliżeniu prędkości, z jaką spada napięcie na kondensatorze. W takich przypadkach błąd wynikający z rozładowywania się pamiętających kondensatorów narasta z czasem teoretycznie nieograniczenie. Uzasadnione w takich sytuacjach wydaje się korzystanie z wyprowadzonego w układzie wyjścia WY 0 ekstrapolatora zerowego rzędu E1.

W przypadkach typowych, kiedy odtwarzane sygnały są periodyczne, praca ekstrapolatora liniowego jest zadowalająca: błąd, którego źródłem jest niedokładność pamiętania wartości napięcia przez ekstrapola-

tory rzędu 0, utrzymuje się na stałej wartości (rzędu od ułamka do kilku procent), zależnej od częstotliwości odtwarzanego sygnału f_0 . Ze wzrostem tej częstotliwości błąd maleje proporcjonalnie do $\frac{1}{f_0}$ (pod warunkiem, że każdorazowo $\frac{f}{f_0} > 2$).

4. WNIOSKI

Jak widać z tablicy 1, ekstrapolator liniowy lepiej odtwarza kształt sygnału ciągłego niż ekstrapolator rzędu 1 (uwaga ta jest słuszna dla szerokiej klasy odtwarzanych sygnałów), natomiast posiada mniej korzystną charakterystykę fazową: układ pracuje z opóźnieniem o jeden okres T_P w stosunku do sygnału wejściowego. Stąd wynika zakres zastosowań ekstrapolatora liniowego - mianowicie w takich urządzeniach, gdzie chodzi głównie o dokładną rekonstrukcję kształtu sygnału ciągłego na podstawie dyskretnych wartości tego sygnału, a gdzie opóźnienie, z jakim układ pracuje, ma drugorzędne znaczenie.

Ekstrapolator liniowy pracuje zadowalająco w przypadkach, gdy odtwarzane sygnały ciągłe są periodyczne, natomiast jeśli sygnały te są stałe lub wolnozmiennie, lepsze rezultaty uzyskuje się, wykorzystując wyjście WY 0 ekstrapolatora zerowego rzędu E1, wchodzącego w skład opisanego układu.

LITERATURA

- [1] KUZNIECOW A.A., KUZNIECOW O.A.: Elementy bystrodziejstwujuuszczich analogo-cifrowych priobrazowatieliej. Izdatielstwo "Energia", Moskwa, 1969.
- [2] MISHKIN E., BROWN L.: Adaptacyjne układy sterowania automatycznego. WNT, Warszawa, 1965.
- [3] MITCHELL T.I., PHILLIPS V.J.: A Waveform Regenerator for Amplitude Sampled Systems. Electronic Engng., s. 582-587, 1966.
- [4] STAMPER H.: Transistorized Sample - and - Hold Circuit. Electronic Engng., s. 342-344, 1968.

ЛИНЕЙНЫЙ ЭКСТРАПОЛЯТОР

С о д е р ж а н и е

В настоящей статье представлено описание схемы, которая реализует линейную экстраполицию импульсного сигнала на входе системы. Наиважнейшей частью системы является запоминающий элемент нулевого порядка. В статье представлены характеристики модели запоминающего элемента, а также результаты испытаний, сделанных на этой модели, на основе которых формулируются выводы, относящиеся к целой описаной системе.

LINEAR EXTRAPOLATOR

S u m m a r y

The present article describes a circuit which regenerates the original continuous signal from a sample pulse train by "joining the tops" of the samples. A holding circuit which is a main detail of the regenerator, was built by the author. The holding circuit characteristics and measuring results are the base for conclusions concerning the whole described device.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 30.XII.1970 r.