ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1971

Seria: AUTOMATYKA z. 17 Nr kol. 302

JERZY GUTBIER

Politechnika Częstochowska
Katedra Elektroniki Przemysłowej

UKŁAD FORMUJĄCY IMPULSY TRÓJKĄTNE ZE STABILIZACJĄ PRĄDU WYŁADOWANIA

Streszczenie. W artykule opisano układ formujący ujemne impulsy trójkątne ze stabilizacją prądu wyładowania kondensatora. Przedstawiono analizę teoretyczną i wyniki badań praktycznego układu.

1. Wstęp

Napięcie o kształcie piłowym stosuje się w różnych urządzeniach impulsowych. Na przykład jako podstawa czasu oscyloskopowych indykatorów, w układach czasowo opóźniających impulsy lub w układach kodowania i dekodowania sygnałów w elementach aparatury cyfrowej.

W celu otrzymania napięcia o kształcie piłowym z małym współczynnikiem nieliniowości, należy osiągnąć dużą stabilność prądu ładującego lub wyładowującego kondensator.

Stabilność prądu osiąga się następującymi podstawowymi sposobami:

a) zastosowaniem źródła dużego zasilającego napięcia w porównaniu z U_{Cm}. Sposób ten polega na wykorzystaniu początkowego odcinka krzywej wykładniczej w charakterze formowanego napięcia piłowego [2]

b) zastosowaniem dwójników stabilizujących; metoda ta opiera się na wykorzystaniu elementu l[illegible] ur[illegible]dzen[illegible] [illegible]tórego prąd minimalnie zmienia się przy zmianie przyło[illegible]nego do niego n[illegible]pięcia [2, 3, 4]

c) zastosowaniem [illegible]o. pensacyjnych metod z wykorzystaniem dodatnich i ujemn[illegible]ch sprzężeń zwrotnych [2, 3, 4].

Najprostszym sposobem otrzymania napię[illegible]a o kształcie piłowym jednocześnie dającym zadawalającą liniowość formowanych impulsów jest zastosowanie dwójników stabilizujących.

W literaturze w głównej mierze opisane są dwójniki ładujące kondensator.

W artykule opisany jest układ formujący ujemne impulsy trójkątne, w którym tranzystorowy dwójnik stabilizuje prąd wyładowania kondensatora.

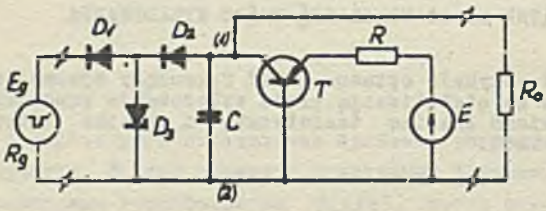
W odróżnieniu od opisywanych w literaturze układów formujących napięcie piłowe, w których w wejściowym obwodzie stosowany jest przełączający

tranzystor, w omawianym układzie w obwodzie wejściowym zastosowano kombinację dwóch diod prostowniczych i diody Zenera.

2. Zasada działania układu formującego impulsy trójkątne

Schemat układu przedstawiony jest na rys. 1.

Na wejście układu podawane są ujemne impulsy prostokątne z generatora E_g o rezystancji wyjściowej R_g.



Rys. 1. Układ formujący

Przychodzący na wejście impuls przechodzi przez diody D_1 i D_2 i oddaje swój ładunek kondensatorowi C.

W czasie trwania impulsu wejściowego kondensator C ładuje się ze stałą czasową:

$\tau = R_{we} C$, gdzie R_{we} – rezystancja obwodu wejściowego.

Po zakończeniu ładowania kondensator C wyładowuje się poprzez stabilizujący dwójnik i rezystancję obciążenia R_o.

Stabilizujący dwójnik zbudowany jest na podstawie tranzystora włączonego w układzie OB, którego prąd emitera określa wartość rezystora R i napięcie źródła E. Diody D_1 i D_2 w wejściowej części układu spełniają funkcję separatorów.

Oddzielają kondensator C od obwodu wejściowego w okresie jego wyładowywania się. Dioda Zenera D_3 spełnia rolę ogranicznika amplitudy formowanych impulsów trójkątnych.

Odbiornik włączony jest bezpośrednio na kondensator C.

Ze względu na wymaganą dużą liniowość formowanych impulsów trójkątnych rezystancja wejściowa odbiornika powinna być wysokoomowa $R_o \gg r_k$ gdzie r_k – rezystancja kolektorowa tranzystora T.

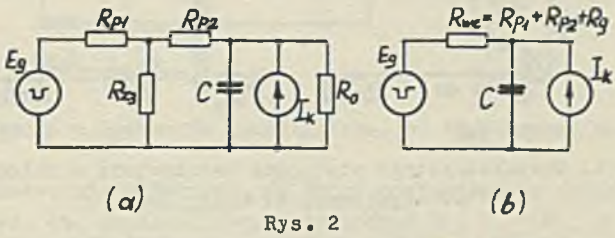
3. Analiza procesu ładowania kondensatora

Schemat zastępczy części układu biorącej udział w procesie ładowania kondensatora przedstawiony jest na rys. 2a. R_{p1} i R_{p2} przedstawiają rezystancję diod D_1 i D_2 w kierunku przewodzenia, zaś R_{z3} rezystancję diody D_3 w kierunku zaporowym.

Generator prądu I_k przedstawia prąd kolektorowy tranzystora T. Korzystając z zależności że:

$$R_{z3} > R_o \quad \text{oraz że} \quad R_{p1} \quad \text{i} \quad R_{p2} \ll R_o$$

układ zastępczy można zredukować do układu przedstawionego na rys. 2b.



Rys. 2

a) Układ zastępczy ładowania kondensatora, b) Zredukowany układ (a)

Dla układu rys. 2b proces ładowania kondensatora C można opisać równaniem:

$$U_C = \left[E_g - R_{we} \cdot I_k\right] \left[1 - e^{-\frac{t}{CR_{we}}}\right]. \tag{1}$$

Maksymalna wartość napięcia do jakiej może się naładować kondensator C równa się wartości napięcia stabilizacji diody Zenera D_3.

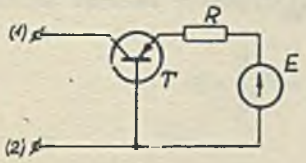
$$U_{Cm} = U \text{ stab.}$$

Maksymalny czas ładowania się kondensatora C równa się czasowi trwania impulsu wejściowego

$$t_m = t_{iwe}.$$

4. Analiza procesu wyładowania się kondensatora

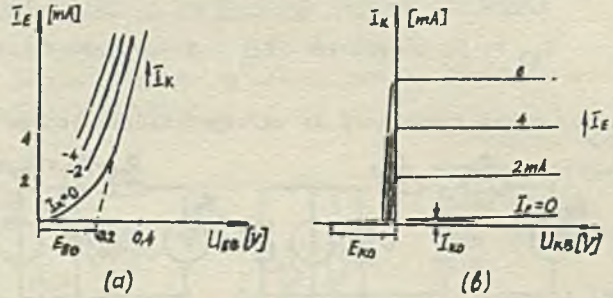
Zasadniczą funkcję w procesie wyładowania spełnia tranzystorowy dwójnik stabilizujący przedstawiony na rys. 3, poprzez który to wyładowywuje się kondensator C prądem wyładowania równym I_k tranzystora T.



Rys. 3. Dwójnik stabilizujący

Stabilizujące działanie takiego dwójnika najlepiej ilustrują statyczne charakterystyki wejściowe i wyjściowe tranzystora T włączonego w układzie OB przedstawione na rys. 4a,b. Z charakterystyk wyjściowych rys. 4b widać, że nawet przy

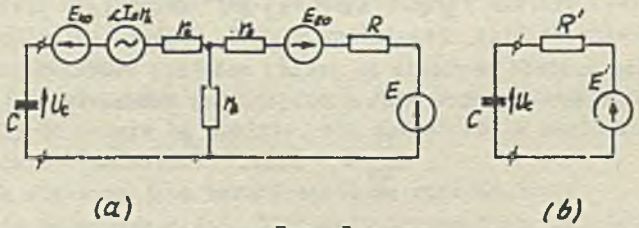
dużych zmianach wartości napięcia pomiędzy kolektorem i bazą w omawianym układzie napięcia na kondensator C przy zadanym prądzie emitera I_E wartość prądu kolektora I_k zmienia się nieznacznie.



Rys. 4. Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OB
a) wejściowe, b) wyjściowe

Układ zastępczy dwójnika przedstawia rys. 5a [4], zaś rys. 5b przedstawia ten sam układ, ale zredukowany.
W zredukowanym układzie rys. 5b

$$E' = (E - E_{Eo}) \frac{r_B + \alpha r_k}{R + r_E + r_B} + E_{ko}. \tag{2}$$



Rys. 5
a) Układ zastępczy dwójnika stabilizującego, b) Zredukowany układ (a)

ponieważ

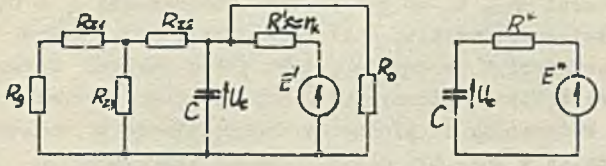
$$r_k \gg r_B \quad i \quad R \gg r_E \quad i \quad r_B$$

to

$$E'' \approx (E - E_{Eo}) \frac{\alpha r_k}{R} + E_{ko} \tag{3}$$

$$R' \approx r_k. \tag{4}$$

Układ zastępczy części układu biorącej udział w procesie wyładowywania kondensatora C przedstawia rys. 6a.



Rys. 6

a) Układ zastępczy wyładowania kondensatora, b) Zredukowany układ (a)

Stosując uproszczenia układ rys. 6a można zredukować do układu przedstawionego na rys. 6b, ponieważ rezystancje diod D1, D_2 i D_3 w kierunku zaporowym R_{z1}, R_{z2} i R_{z3} są dużo większe od rezystancji R, R_o i R_g.
W zredukowanym układzie:

$$E^* \approx \left[(E - E_{Eo})\frac{r_k}{R} + E_{ko}\right]\frac{R^*}{r_k} + U_C(0) \tag{5}$$

$$R^* \approx \frac{r_k R_o}{r_k + R_o}. \tag{6}$$

Zakładając, że prąd wyładowania kondensatora jest stabilny i współczynnik nieliniowości wyładowania mały, można określić czas wyładowania za pomocą równania (7):

$$t_w \approx \frac{U_{Cm}C}{I_{Cw}}. \tag{7}$$

I_{Cw} - początkowy prąd wyładowania wynosi:

$$I_{Cw} = \frac{E^*}{R^*}. \tag{8}$$

Współczynnik nieliniowości wyładowania lub współczynnik nieliniowości formowania impulsu trójkątnego można określić następująco [4]:

$$\delta = \frac{U_{Cm}}{E^*} = \frac{U_{Cm}}{I_{Cw}R^*} \approx \frac{U_{Cm}}{I_{Cw}r_k}\cdot\frac{r_k + R_o}{R_o}. \tag{9}$$

Z równania (9) widać jak duży wpływ ma na współczynnik nieliniowości obciążenie układu R_o.

Dla przykładu: jeżeli nieobciążony układ posiada określony współczynnik nieliniowości δ_x, to po przyłączeniu obciążenia $R_o = 0{,}1\ r_k$ współczynnik nieliniowości wzrasta o 11 razy. Rozpatrując wpływ częstotliwościowych charakterystyk tranzystora T na pracę układu formującego można stwierdzić, że ponieważ tranzystor T pracuje jako generator prądu stałego bez procesów komutacji, to graniczna częstotliwość ze względu na współczynnik wzmocnienia może być dowolnie mała. Temperaturową niestabilność pracy układu formującego można scharakteryzować fluktuacją I_{Cw} zależną od wielu czynników. Zależność tę można określić z równania (8) po podstawieniu do niego (5) i (6).

$$I_{Cw} \approx \frac{\left[(E - E_{Eo})\frac{\alpha \cdot r_k}{R} + E_{Eo}\right]\frac{R^*}{r_k} + U_C(0)}{R^*}$$

$\frac{E_{Eo}}{r_k}$ – jako bardzo małe pomija się i wówczas

$$I_{Cw} \approx \frac{(E - E_{Eo})\alpha}{R} + U_C\,\frac{R_o + r_k}{R_o - r_k}. \tag{10}$$

Pochodna równania (10) przedstawia się następująco:

$$\Delta I_{Cw} \approx \frac{\Delta\alpha E - \alpha\Delta E_{Eo}}{R} = \frac{U_C}{r_k}\,\frac{\frac{\Delta r_k}{r_k}}{1 + \frac{\Delta r_k}{r_k}} \tag{11}$$

w (11) opuszczone zostały małe wielkości $\Delta E_{Eo}\Delta\alpha$ i $\Delta\alpha E_{Eo}$.

Wartość prądu I_{Cw} praktycznie z dużą dokładnością można określić następująco:

$$I_{Cw} \approx \alpha\frac{E}{R}. \tag{12}$$

Ostatecznie dzieląc (11) przez (12) otrzymamy:

$$\frac{\Delta I_{Cw}}{I_{Cw}} \approx \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - \frac{\Delta E_{Bo}}{E} - \frac{U_C(0)}{I_{Cw} \cdot r_k} \cdot \frac{\frac{\Delta r_k}{r_k}}{1 + \frac{\Delta r_k}{r_k}} \tag{13}$$

z (13) wynika, że względna zmiana prądu wyładowania $\frac{\Delta I_{Cw}}{I_{Cw}}$ zależy od fluktuacji współczynnika wzmocnienia, odcinka powstałego w wyniku aproksymacji wejściowych charakterystyk tranzystora i rezystancji kolektorowej r_k.

Na fluktuację tych wielkości największy wpływ wywiera temperatura, zatem można traktować równanie (13) jako charakterystykę temperaturowej niestabilności prądu wyładowania I_{Cw}. Przy projektowaniu układu mając zadane wielkości U_{Cm}, R_o i r_k oraz wymagany współczynnik nieliniowości należy określić wartość prądu wyładowania I_{Cw} z (9)

$$I_{Cw} \approx \frac{U_{Cm}}{\delta r_k} \frac{r_k + R_o}{R_o} \tag{14}$$

następnie należy określić wartość pojemności C kondensatora, która zapewni żądaną szerokość formowanego impulsu trójkątnego t_w z (7)

$$C \approx \frac{I_{Cw}\, t_w}{U_{Cm}} . \tag{15}$$

Aby zapewnić naładowanie się kondensatora C do wartości U_{Cm} impuls wejściowy z generatora powinien mieć amplitudę większą od $U_{Cm} = U\,stab_{D_3}$ i czas trwania określony równaniem (16) z (1)

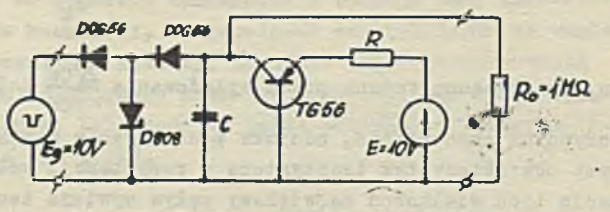
$$t_{1we} = CR_{we} \ln \frac{E_g - R_{we} I_k}{E_g - R_{we} I_k - U_{Cm}} , \tag{16}$$

gdzie $I_k = \alpha I_E = \alpha \frac{E}{R}$.

5. Praktyczny układ formujący impulsy trójkątne

Układ praktyczny przedstawiony jest na rys. 7.

Na wejście układu podawane były impulsy ujemne o amplitudzie 10V i czasie trwania 50 μs, R_g = 50.



Rys. 7. Praktyczny układ formujący

Impulsy te ładowały kondensator o pojemności C = 0,3 μF do wartości U stab. = 7,5V diody Zenera D808.

Prąd wyładowania, a zarazem i czas trwania formowanych impulsów określony był wartościami rezystancji R: R_1 = 470Ω, R_2 = 24 kΩ i R_3 = 145 kΩ.

Otrzymano impulsy trójkątne o czasie trwania t_{w1} = 100 μs, t_{w2} = 5 ms, t_{w3} = 30 ms przedstawione na rys. 8a, b, c.

W charakterze obciążenia przyłączono oscyloskop o rezystancji wejściowej R_o = 1 MΩ.

Z obliczeń z (15) wynika, że w tych trzech przypadkach prąd wyładowania wynosił:

$$I_{Cw_1} = \frac{C\,U_{Cm}}{t_{w1}} = 21 \text{ mA}$$

$$I_{Cw2} = 0{,}42 \text{ mA}$$

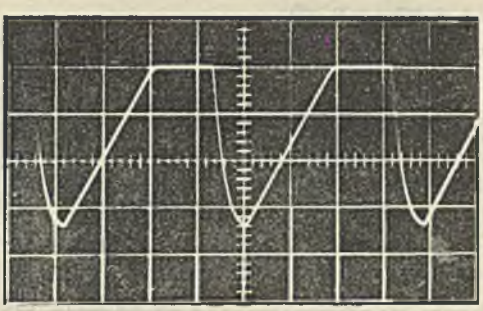
$$I_{Cw3} = 0{,}07 \text{ mA}.$$

Teoretyczne współczynniki nieliniowości dla otrzymanych impulsów wynoszą z (9)

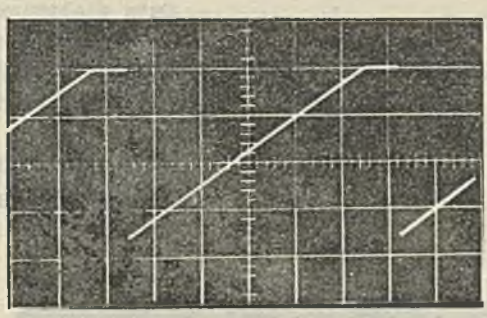
$$_1 = \frac{U_{Cm}}{I_{Cw1} r_k} \; \frac{r_k + R_o}{R_o} = 0{,}36\%$$

$$_2 = 2{,}8\%$$

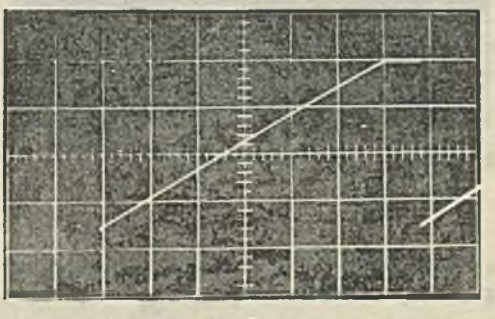
$$_3 = 14{,}0\%$$



Rys. 8a. Fotografie sformowanych impulsów trójkątnych 50 μs/cm 2V/cm



Rys. 8b. Fotografie sformowanych impulsów trójkątnych 1 ms/cm 2V/cm



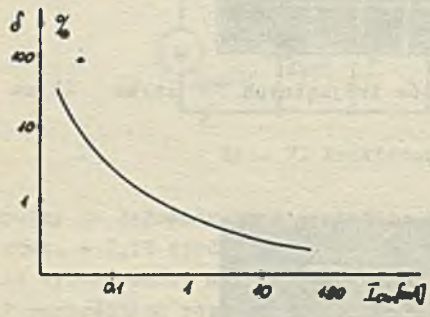
Rys. 8c. Fotografie sformowanych impulsów trójkątnych 5 ms/cm 2V/cm

dla I_{Cw} = 21 mA, 0,42 mA, i 0,07 mA rezystancja kolektora r_k wynosiła odpowiednio 100 kΩ, 1,5 MΩ, 2,5 MΩ.

Korzystając z otrzymanych rezultatów można określić zależność

$$\delta = f(I_{Cw}) \quad \text{przy} \quad R_o = 1\ M\Omega \quad \text{rys. 9.}$$

Jak widać z rys. 9, dla otrzymania współczynnika nieliniowości $\delta \leqslant 1\%$ prąd wyładowania I_{Cw} powinien mieć wartość większą od 1 mA.

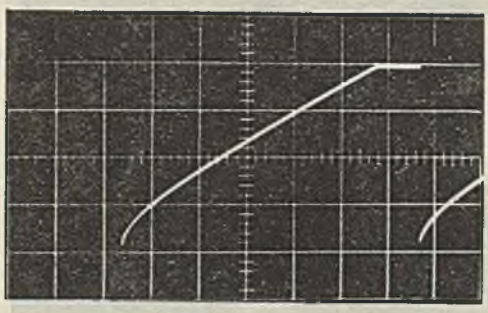


Rys. 9. Wykres zależności $\delta = f(I_{Cw})$

Z rezultatów eksperymentu widać, iż przy formowaniu impulsu rys. 8b i 8c warunek ten nie został spełniony, stąd duża nieliniowość otrzymanych impulsów trójkątnych. Rys. 10 przedstawia sformowany impuls bez diody D_2 w układzie.

Duża nieliniowość w początkowej fazie formowanego impulsu spowodowana została nieliniowością charakterystyki stabilizacji diody Zenera D_3.

Włączenie diody D_2 pozwala na zlikwidowanie tego efektu.



Rys. 10. Sformowany impuls bez diody D_2

6. Wnioski

Dla otrzymania z opisanego układu impulsów trójkątnych o nieliniowości mniejszej od 1,5% należy zastosować prąd I_{Cw} = 1,4 mA oraz odpowiednio duże pojemności C i podawać na wejście odpowiednio długie impulsy i tak dla:

t_w = 100 μs C = 20 nF i t_{iwe} = 7 μs

t_w = 5 ms C = 1 μF i t_{iwe} = 320 μs

t_w = 30 ms C = 6 μF i t_{iwe} = 2 ms.

Opisany układ formowania impulsów trójkątnych cechuje prostota konstrukcji, możliwość otrzymania korzystnej liniowości formowanych impulsów i duża stabilność pracy. Wadą układu jest mała obciążalność oraz niezbędna duża amplituda impulsu wejściowego.

LITERATURA

[1] Zagajewski T. - Układy elektroniki przemysłowej WNT Warszawa 1964 r.

[2] Frołkin W.T. - Impulsnyje ustrojstwa Izd. Maszinostrojenie Moskwa 1966 r.

[3] Stiepanienko I.P. - Osnowy tjeorii tranzistorow i tranzistornych sohjem GEI Moskwa 1963 r.

[4] Tiszjenko A.M. - Rasczjot i projektirowanie impulsnych ustrojstw na tranzistorach izd. Sow. radio Moskwa 1964 r.

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

ФОРМИРОВАТЕЛЬ ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ТОКОСТАБИЛИЗИРУЮЩИМ РАЗРЯДОМ

Р е з ю м е

В работе описывается формирователь пилообразного напряжения с разрядом конденсатора через токостабилизирующий двухполюсник. Приводится теоретический анализ и результаты исследовании схемы.

THE CIRCUIT FORMING TRIANGAL IMPULSES WITH STABILISATION OF CURRENT DISCHARGE

S u m m a r y

There is a description of circuit forming negatiwe triongal impulses with stabilization of current discharge of capacitor in this paper.

Theoretical analyses and results of experiments of a built circuit hove been shown as well.