

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK

Pracownia Elektroniczna

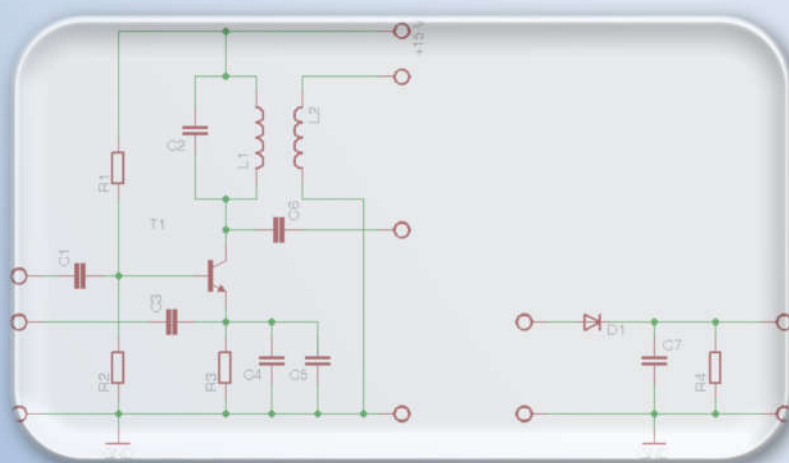
ZESTAW 7

MODULACJA AMPLITUDY

I DEMODULACJA

SYGNAŁÓW

ELEKTRYCZNYCH



I. WSTĘP TEORETYCZNY

1. TYPY MODULACJI

Rolą systemów telekomunikacyjnych jest przesyłanie informacji od jej źródła - nadajnika, do miejsca przeznaczenie - odbiornika. Układy transmisyjne wykorzystują sygnał użyteczny - zawierający przesyłaną informację - do zmian emitowanego sygnału nośnego.

W analogowej łączności radiowej powszechnie stosowane są:

- układy z modulacją amplitudy (AM - amplitude modulation), gdzie sygnał użyteczny jest wykorzystywany do chwilowej zmiany - modulacji - amplitudy sygnału nośnego,
- układy z modulacją częstotliwości (FM - frequency modulation), gdzie sygnał użyteczny wywołuje chwilowe zmiany częstotliwości sygnału nośnego.

2. ELEMENTY LINIOWE I NIELINIOWE

Badając charakterystyki prądowo-napięciowe elementów elektronicznych możemy wyróżnić elementy, dla których amplituda natężenia prądu przez nie przepływającego jest proporcjonalna do amplitudy napięcia przyłożonego do ich końcówek. Elementy takie nazywamy liniowymi. Występują również elementy elektroniczne (np. dioda półprzewodnikowa czy tranzystor), dla których zależność ta ma bardziej złożony charakter. Natężenie prądu - I , płynącego przez taki element pod wpływem przyłożonego napięcia - U , wyraża się funkcją nieliniową, którą można przedstawić na przykład w postaci wielomianu:

$$I = aU + bU^2 + cU^3 + \dots$$

gdzie: a , b , c - są odpowiednimi współczynnikami wielomianu. Elementy elektroniczne posiadające tego typu charakterystyki prądowo-napięciowe nazywamy elementami nieliniowymi.

Jeżeli do elementu nieliniowego przyłożymy napięcie

$$U = U_m \cos \omega t$$

to wartość płynącego przez ten element prądu wynosi

$$I = aU_m \cos \omega t + bU_m^2 \cos^2 \omega t + cU_m^3 \cos^3 \omega t + \dots$$

Ograniczając się do wyrazu liniowego i kwadratowego i korzystając z tożsamości trygonometrycznej

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta)$$

otrzymujemy

$$I = aU_m \cos \omega t + \frac{b}{2} U_m^2 \cos 2\omega t + \frac{b}{2} U_m^2 \quad (R1)$$

Jak widać, w widmie sygnału, oprócz składowej o częstości (częstości kołowej) podstawowej - ω , pojawia się składowa o częstości podwojonej - 2ω oraz składowa stała.

Uwzględnienie dalszych wyrazów wielomianu powoduje pojawienie się składowych o częstościach 3ω , 4ω , ...

Jeżeli do elementu nieliniowego przyłożymy sumę napięć,

$$U = U_{m1} \cos \omega_1 t + U_{m2} \cos \omega_2 t$$

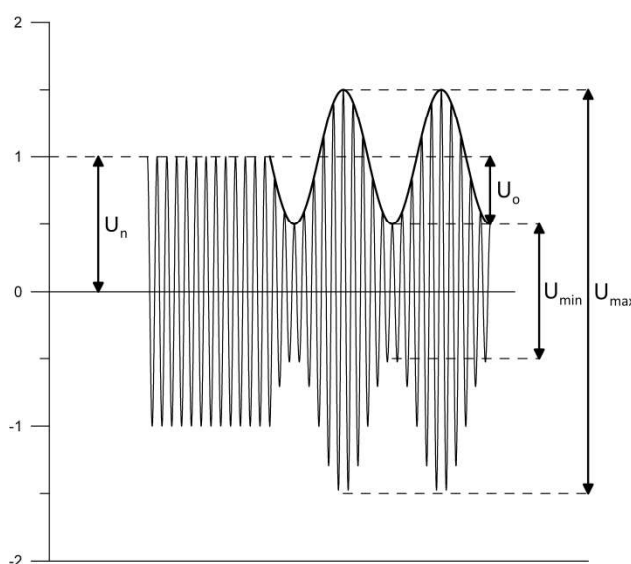
to postępując podobnie jak w pierwszym przypadku otrzymujemy

$$I = aU_{m1} \cos \omega_1 t + aU_{m2} \cos \omega_2 t + \frac{b}{2} U_{m1}^2 \cos 2\omega_1 t + \frac{b}{2} U_{m2}^2 \cos 2\omega_2 t + \frac{b}{2} U_{m1}^2 + \frac{b}{2} U_{m2}^2 + bU_{m1}U_{m2} \cos(\omega_1 + \omega_2)t + bU_{m1}U_{m2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

W tym przypadku, w widmie sygnału, oprócz składowych o częstościach podstawowych ω_1 oraz ω_2 , składowych o częstościach podwojonych $2\omega_1$ oraz $2\omega_2$, oraz dwóch składowych stałych, pojawiły się składowe o częstościach równych sumie $\omega_1 + \omega_2$ i różnicy $\omega_1 - \omega_2$ częstości obu sygnałów.

3. MODULACJA AMPLITUDY

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy kształt sinusoidalnego sygnału nośnego o częstości ω_1 zmodulowanego amplitudowo sygnałem sinusoidalnym o częstości ω_2 , gdzie $\omega_2 < \omega_1$.



Rys. 1. Modulacja amplitudy sygnałem sinusoidalnym.

Parametrem charakteryzującym sygnał zmodulowany amplitudowo jest współczynnik głębokości modulacji - m , zdefiniowany jako stosunek amplitudy obwiedni sygnału zmodulowanego U_o , do amplitudy sygnału nośnego niezmodulowanego U_n :

$$m = U_o / U_n$$

Wielkość tą najczęściej wyraża się w procentach.

Korzystając ze zdefiniowanych na rysunku 1, wygodnych do pomiaru, wartości napięć:

$$U_{min} = 2(U_n - U_o)$$

oraz

$$U_{max} = 2(U_n + U_o)$$

współczynnik głębokości modulacji możemy przedstawić w postaci:

$$m = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}$$

Jak widać z rysunku 1 sygnał zmodulowany amplitudowo można opisać równaniem:

$$U = U_n(1 + m \cos \omega_2 t) \cos \omega_1 t = U_n \cos \omega_1 t + \frac{m}{2} U_n \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{m}{2} U_n \cos(\omega_1 - \omega_2)t, \quad (R2)$$

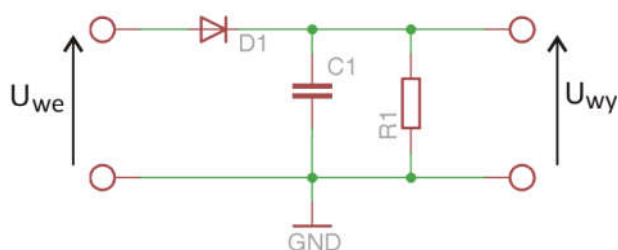
Widmo powyższego sygnału zmodulowanego zawiera sygnał o częstotliwości nośnej ω_1 oraz dwóch sygnałów bocznych, o częstotliwościach odpowiednio $\omega_1 - \omega_2$ oraz $\omega_1 + \omega_2$.

Widmo takiego sygnału posiada więc takie same składowe, jak opisane powyżej widmo sygnału powstałego z przyłożenia do elementu nieliniowego sumy sygnałów sinusoidalnych o częstotliwościach ω_1 oraz ω_2 .

4. DETEKcja / DEMODULACJA

Aby ze sygnału zmodulowanego amplitudowo odtworzyć sygnał użyteczny (sygnał modulujący), należy poddać go procesowi detekcji (demodulacji).

Do najczęściej stosowanych i najprostszych układów detekcyjnych należy, przedstawiony na rysunku 2, obwód składający się z diody detekcyjnej D_1 oraz filtra RC (opornik R_1 oraz kondensator C_1).



Rys. 2. Diodowy układ detekcyjny

Charakter pracy układu detektora zależy od wartości napięcia sygnału wejściowego. Dla sygnałów wejściowych o napięciach rzędu kilku woltów dioda D_1 pracuje w trybie prostownika jednopółkowego. Przewodzi gdy jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia, nie przewodzi gdy jest spolaryzowana w kierunku zaporowym. Przebieg wyprostowanego napięcia jest wygładzany przez kondensator C_1 . Dla poprawnej pracy detektora niezbędny jest odpowiedni dobór stałej czasowej filtra RC. Wartość oporu R_1 nie może być zbyt mała, aby kondensator C_1 naładowany podczas "dodatniej" półwłki sinusoidalnego sygnału nośnego, nie rozładował się podczas półwłki "ujemnej" sygnału nośnego. Z drugiej strony wartość oporu R_1 nie może być zbyt duża, aby wartość napięcia na kondensatorze C_1 zmieniała się zgodnie ze zmianami sygnału modulującego.

Stała czasowa filtra $\tau = R_1 C_1$, powinna spełniać więc warunek:

$$1/\omega_1 \ll \tau < 1/\omega_2$$

Dla sygnałów wejściowych o napięciach rzędu miliwoltów istotną rolę odgrywa nieliniowość charakterystyki prądowo-napięciowej diody D_1 . Zgodnie z równaniem (R1) pojawia się wtedy składowa stała sygnału proporcjonalna do kwadratu amplitudy przyłożonego napięcia.

Opisany równaniem (R2) zmodulowany amplitudowo sygnał:

$$U = U_n(1 + m \cos \omega_2 t) \cos \omega_1 t$$

możemy przedstawić w postaci:

$$U = U_m(t) \cos \omega_1 t$$

gdzie

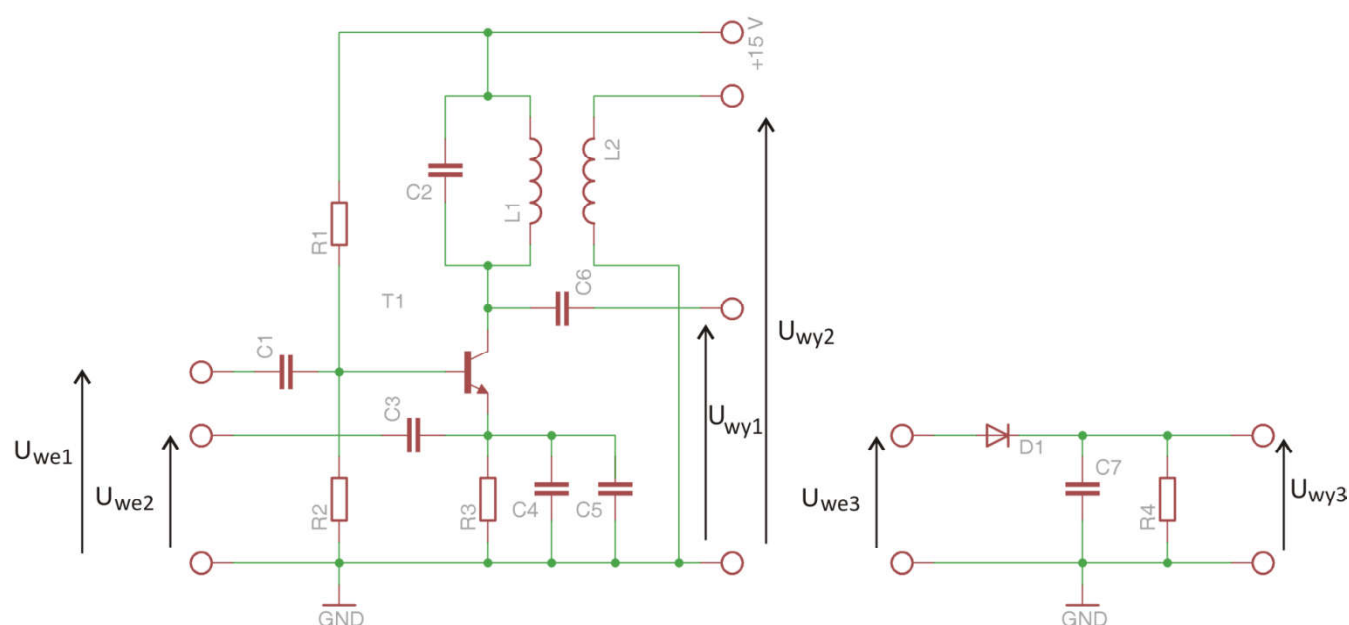
$$U_m(t) = U_n(1 + m \cos \omega_2 t)$$

jest wolnozmienną w czasie (bo $\omega_2 \ll \omega_1$) amplitudą zmodulowanego amplitudowo sygnału. Podanie tego sygnału na element nieliniowy powoduje pojawienie się sygnału proporcjonalnego do jego kwadratu:

$$[U_m(t)]^2 = U_n^2(1 + m \cos \omega_2 t)^2 = U_n^2 \left(1 + \frac{1}{2} m^2 + 2m \cos \omega_2 t + \frac{1}{2} m^2 \cos 2\omega_2 t \right)$$

zawierającego składową stałą oraz składową zależną od częstości sinusoidalnego sygnału modulującego - ω_2 . Składowe odpowiadające wyższym częstości sygnału - w tym pozostałe składowe występujące w równaniu (R1) są tłumione przez filtr dolnoprzepustowy RC układu detektora.

5. OPIS BADANEGO UKŁADU



Rys. 3. Schemat układu modulatora amplitudy i detektora diodowego (demodulatora).

Rysunek 3 przedstawia schemat układu zawierającego modulator amplitudy oraz detektor diodowy (demodulator). Modulator amplitudy zbudowany jest w układzie tranzystorowego wzmacniacza rezonansowego. Punkt pracy tranzystora T_1 , ustalany jest dzielnikiem napięcia zbudowanym z oporników R_1 oraz R_2 . W obwodzie kolektora tranzystora znajduje się obwód rezonansowy zbudowany z cewki indukcyjnej L_1 (uzwojenie czerwone) oraz kondensatora C_2 . Obwód dostrojony jest rdzeniem cewki indukcyjnej do częstości nośnej - ω_1 . Układ posiada dwa wejścia. Sygnał o częstości nośnej ω_1 doprowadzany jest z wejścia pierwszego - WE1 poprzez kondensator sprzęgający C_1 do bazy tranzystora T_1 . Sygnał modulujący o częstości ω_2 , podłączony do wejścia drugiego WE2, poprzez kondensator C_3 jest doprowadzony do emitera tranzystora T_1 . Oba napięcia, doprowadzone do elementu o charakterystyce nieliniowej, jaką jest złącze baza-emiter tranzystora, powodują że sygnał wyjściowy z układu jest zmodulowany amplitudowo.

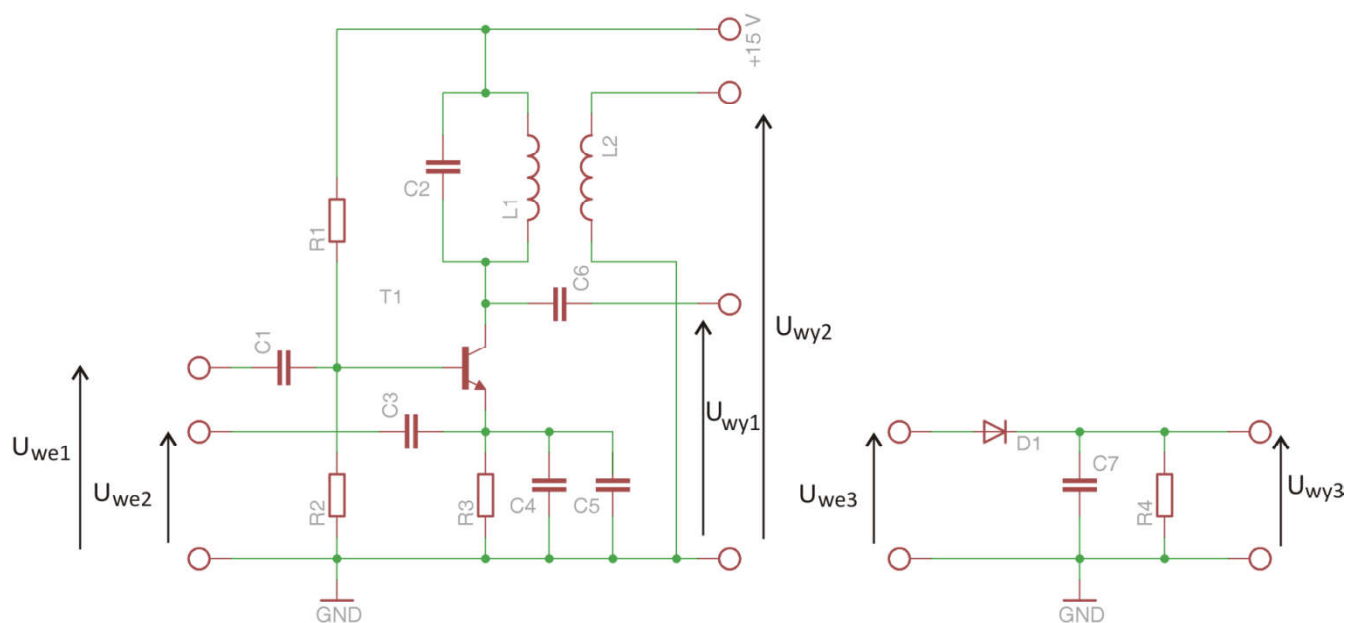
Układ modulatora posiada dwa wyjścia. Wyjście WY1, poprzez kondensator separujący C_6 , odcinający składową stałą sygnału, wyprowadza sygnał z kolektora tranzystora T_1 .

Jest to sygnał o dużej wartości napięcia, odpowiednio wzmacniony przez wzmacniacz rezonansowy. Wyjście WY2 dostarcza sygnał o mniejszej wartości napięcia. Sygnał ten jest wyprowadzony z obwodu rezonansowego poprzez cewkę indukcyjną L_2 (uzwojenie zielone) sprzężoną indukcyjnie z cewką L_1 wchodzącą w skład obwodu rezonansowego - $L_1 C_2$.

Detekcja (demodulacja) sygnału następuje w układzie detektora diodowego zbudowanego z diody detekcyjnej - D_1 oraz filtra RC, zbudowanego z opornika R_4 oraz kondensatora C_7 .

Biorąc pod uwagę dużą wartość oporu $R_4 = 300 \text{ k}\Omega$, analizując pracę układu detektora należy też uwzględnić wartość oporności obciążenia, podłączonego do wyjścia detektora. W przypadku obserwacji sygnału na oscyloskopie o typowej oporności wejściowej $1 \text{ M}\Omega$, jest to wartość porównywalna z R_4 . Obliczając stałą czasową filtra detektora, jako wartość oporu należy wtedy przyjąć wartość wypadkową równolegle połączonych oporności R_4 oraz oporności wejściowej oscyloskopu.

II. POMIARY I ICH OPRACOWANIE



Wykaz elementów:

$C_1 = 22 \text{ nF}$	$R_1 = 15 \text{ k}\Omega$
$C_2 = 3.3 \text{ nF}$	$R_2 = 5 \text{ k}\Omega$
$C_3 = 220 \text{ nF}$	$R_3 = 2 \text{ k}\Omega$
$C_4 = 220 \text{ nF}$	$R_4 = 300 \text{ k}\Omega$
$C_5 = 470 \text{ nF}$	D_1 – dioda detekcyjna D9K
$C_6 = 10 \text{ nF}$	L_1 – cewka indukcyjna
$C_7 = 330 \text{ pF}$	L_2 – cewka indukcyjna

1. DOSTROJENIE WZMACNIACZA REZONANSOWEGO.

- 1) Do wejścia WE1 modulatora doprowadzić z wyjścia CH1 generatora sygnał nośny - sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f_1 = 600 \text{ kHz}$ i napięciu (międzyszczytowym) $U_{we1} = 50 \text{ mV}$. Do wejść oscyloskopu doprowadzić sygnał nośny i sygnał z wyjścia modulatora. Kręcąc rdzeniem cewki indukcyjnej dostroić wzmacniacz do rezonansu - maksimum sygnału wyjściowego.
- 2) Zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu) sygnał wejściowy (nośny) i wyjściowy modulatora, zwracając uwagę na zależności fazowe między sygnałami. Zmierzyć wartość napięcia wyjściowego U_{wy} (napięcie międzyszczytowe) i wyznaczyć wartość współczynnika wzmocnienia napięciowego k_U wzmacniacza dostrojonego do rezonansu i oszacować jego błąd Δk_U .

2. PODŁĄCZENIE SYGNAŁU MODULUJĄCEGO 500 Hz.

- 1) Nie zmieniając parametrów sygnału nośnego doprowadzonego do wejścia WE1, do wejścia WE2 modulatora doprowadzić z wyjścia CH2 generatora sygnał modulujący - sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f_2 = 500$ Hz i napięciu (międzyszczytowym) $U_{we2} = 500$ mV. Do wejść oscyloskopu doprowadzić sygnał modulujący i sygnał z wyjścia modulatora.
- 2) Zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu) sygnał wejściowy (modulujący) i wyjściowy modulatora, zwracając uwagę na zależności fazowe między sygnałami.
- 3) Dla sygnału zmodulowanego amplitudowo zmierzyć zdefiniowane na rysunku 1, wartości napięć U_{min} oraz U_{max} i wyznaczyć współczynnik głębokości modulacji:

$$m = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}$$

Zaobserwować wpływ wartości napięcia modulującego na głębokość modulacji.

- 4) Analogiczne rejestracje sygnałów (dokonać zrzutu z oscyloskopu), oraz pomiary wykonać dla napięć (międzyszczytowym) sygnału modulującego $U_{we2} = 1V$ oraz $1.5 V$. Dla każdej wartości napięcia sygnału modulującego wyznaczyć wartość współczynnika głębokości modulacji - m , oraz oszacować jego błąd Δm .

3. INNE CZĘSTOTLIWOŚCI MODULACJI.

- 1) Dla zmienionych częstotliwości sygnału modulującego $f_2 = 1$ kHz oraz $f_2 = 2$ kHz wykonać rejestracje sygnałów (dokonać zrzutów z oscyloskopu) oraz pomiary analogiczne do opisanych w dziale 2. (Dla każdej częstotliwości wykonać pomiary dla $U_{we2} = 0.5 V$, $1.0 V$ oraz $1.5 V$.) Analogicznie jak w dziale 2, dla każdej wartości napięcia sygnału modulującego wyznaczyć wartość współczynnika głębokości modulacji - m , oraz oszacować jego błąd Δm .

Wyznaczone w działach 2 oraz 3 wartości współczynników głębokości modulacji, wraz z oszacowanymi błędami, przedstawić w postaci poniższej Tabeli 1, oraz wykresów. Na wykresach, dla każdego punktu pomiarowego zaznaczyć błędy prezentowanych wielkości.

Tabela 1. Wartości współczynników głębokości modulacji - m , dla różnych wartości częstotliwości - f_2 , oraz napięcia - U_{we2} , sygnału modulującego.

	$f_2 = 500$ Hz	$f_2 = 1$ kHz	$f_2 = 2$ kHz
$U_{we2} = 0.5$ V			
$U_{we2} = 1.0$ V			
$U_{we2} = 1.5$ V			

4. BADANIE DETEKTORA (DEMODULATORA).

Konstrukcja układu modulatora umożliwia podanie do wejścia detektora WE3 sygnału zmodulowanego amplitudowo:

- dużej wartości napięcia - z wyjścia WY1 modulatora, lub

- małej wartości napięcia - z wyjścia WY2 modulatora.
- 1) Do wejścia WE2 modulatora doprowadzić z generatora sygnał modulujący - sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f_2 = 500$ Hz i napięciu (międzyszczytowym) $U_{we2} = 500$ mV. Do wejścia detektora WE3 podłączyć sygnał z wyjścia WY1 modulatora. Do wejść oscyloskopu doprowadzić sygnał modulujący i sygnał z wyjścia modulatora.
 - 2) Zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu) sygnał wejściowy (modulujący) i wyjściowy modulatora (WY1), a następnie zarejestrować (dokonać zrzutu z oscyloskopu), sygnał wejściowy (modulujący) i wyjściowy detektora (WY3), zwracając uwagę na zależności fazowe między rejestrowanymi sygnałami.
 - 3) Do wejścia detektora WE3 podłączyć sygnał z wyjścia WY2 modulatora i powtórzyć rejestracje sygnałów (dokonać zrzutów z oscyloskopu) oraz pomiary analogiczne do opisanych powyżej. Zmierzyć wartość składowej stałej napięcia na wyjściu detektora.

LITERATURA

1. P. Horowitz, W. Hill "Sztuka elektroniki" Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2006
2. U. Tietze, C. Schenk " Układy półprzewodnikowe" Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2009
3. R. Śledziwski "Elektronika dla fizyków" Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1984
4. T. Stacewicz, A. Kotlicki "Elektronika w laboratorium naukowym" Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1994
5. M. Niedźwiecki, M. Rasiukiewicz "Nieliniowe elektroniczne układy analogowe" Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1994
6. A. Bielski, R. Ciuryło "Podstawy metod opracowania pomiarów" Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2001