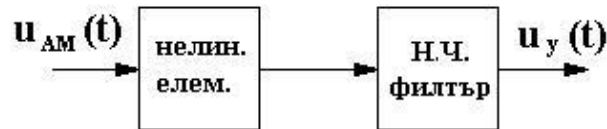


5.6. Детектиране на амплитудно модулирани сигнали

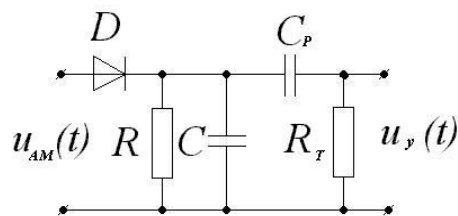
Процесът обратен на модулацията се нарича *демодулация* или *детектиране*. Устройствата, с които се осъществява детектирането се наричат *детектори*. Те са нелинейни или параметрични вериги.



фиг. 5.20

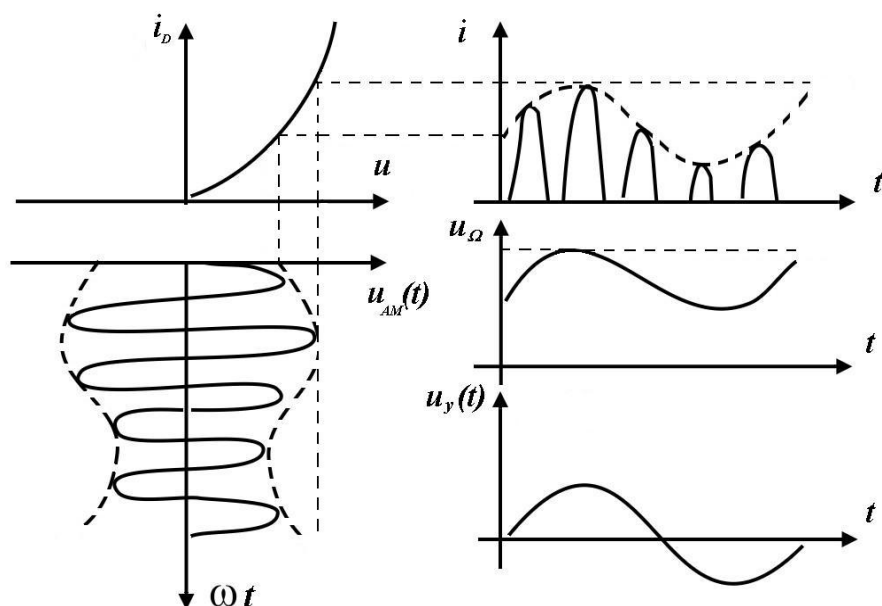
На фиг. 5.20 е дадена блоковата схема на *детектор за амплитудно модулирани сигнали*. Тези сигнали постъпват към нелинейния елемент. В него се извършва *преобразуване* на спектъра, поради което се получава и ниско честотна съставка. Нейното отделяне от останалите съставки се извършва от филтъра.

На фиг. 5.21 е показана принципната схема на детектор на АМ сигнали. Ролята на нелинейният елемент се изпълнява от диода D .



фиг.5.21

Филтрирането на нискофреkwотните съставки се осъществява с резистора R и кондензатора C .



фиг. 5.22

Физическите процеси са пояснени с диаграмите показани на фиг. 5.22. От тях се вижда, че токът в изходната верига $i_{се}$ състои от отсечени косинусоиди на носещата честота, чиято обвивка отразява измененията на управляващия сигнал. Високочестотните съставки преминават през кондензатора C на право, а нискочестотната създава определен спад U_R върху резистора R . Следователно, трябва стойността на резистора R и на кондензатора C да се подберат така, че да са с пренебрежимо малки съпротивления за управляващия сигнал. Като се отдели само променливата съставка на U_R , върху резистора R , се получава обвиващата на управляващия, (модулиращ), сигнал. Отделянето се извършва с разделителния кондензатор C_p .

Като се вземат под внимание направените разглеждания за физическите процеси, трябва да се спази условието

$$\frac{1}{\omega_0 C} \ll R \ll \frac{1}{\Omega C} \quad (5.50)$$

От друга страна, съпротивлението на разделителния кондензатор трябва да е пренебрежимо малко в сравнение с товарното съпротивление, което означава

$$\frac{1}{\Omega C_p} \ll R_T \quad (5.51)$$

Детекторната характеристика отразява съществените свойства на всеки детектор за АМ сигнали. Тя зависи от характеристиката на нелинейния елемент и от големината на входния сигнал.

1. Детектор за АМ сигнали с *квадратична детекторна характеристика*. Тя се получава при малки стойности на входния сигнал ($u_{ex} < 0,7V$). В този случай волт-амперната характеристика се апроксимира с полином от втора степен:

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 \quad (5.52)$$

Първият член на полинома има измерение на ток и съответства на работната точка $a_0 = I_0$. При въздействие със сигнали от вида

$$U = U(t) \cos \omega_0 t \quad (5.53)$$

като се замести 5.53 в 5.52 се получава:

$$\begin{aligned} i &= a_0 + a_1 U(t) \cos \omega_0 t + a_2 U^2(t) \cos^2 \omega_0 t = \\ &= a_0 + a_1 U(t) \cos \omega_0 t + \frac{a_2 U^2(t)}{2} + \frac{a_2 U^2(t)}{2} \cos 2\omega_0 t \end{aligned} \quad (5.54)$$

От 5.54 се вижда, че постоянната съставка на тока е

$$I'_0 = a_0 + \frac{a_2}{2} U^2(t) \quad (5.55)$$

Като се вземе под внимание, че $\Delta I_0 = I'_0 - I_0$, се получава *детекторната характеристика*

$$\Delta I_0 = \frac{a_2}{2} U^2(t) \quad , \quad (5.56)$$

която има квадратичен характер.

Ако се положи $U(t) = U_0(1 + m \cos \Omega t)$, (5.57)
то чрез 5.53 се описва АМ сигнал.

Замествайки 5.57 в 5.56 се получава

$$\Delta I_0 = \frac{a_2}{2} U_0^2 + m a_2 U_0^2 \cos \Omega t + \frac{m^2 a_2}{2} U_0^2 \cos^2 \Omega t \quad (5.58)$$

Вторият и третият член съответстват на първата и втората хармонична на управляващия сигнал, (необходимо е да се преработи $\cos^2 \Omega t$). Коефициентът на нелинейни изкривявания се определя чрез съответните амплитуди $I_{1\Omega}$ и $I_{2\Omega}$

$$K = \frac{I_{2\Omega}}{I_{1\Omega}} = \frac{m^2 \frac{a_2}{4} U_0^2}{m a_2 U_0^2} = \frac{m}{4} \quad (5.59)$$

Следователно, нелинейните изкривявания *зависят от дълбочината на модулацията*. Например при $m=0,3$ за K се получава 7,5%.

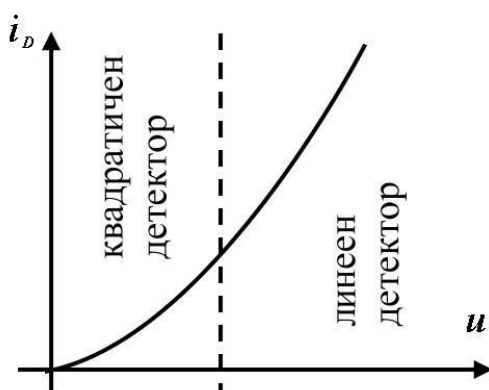
2. Детектор за АМ сигнали с *линейна детекторна характеристика*. Сигналят за този детектор трябва да е с голяма амплитуда. В този случай волтамперната характеристика на диода се апроксимира с начупена права линия.

Линейната детекторна характеристика е от вида

$$\Delta I_0 = k U(t) \quad (5.60)$$

където k е константата определена от резистора R и ъгъла на токовата отсечка θ . Ако се замести 5.57 в 5.60 може да се види, че няма да се появят хармонични съставки на модулирания сигнал в тока през диода, т.е. не се *появяват нелинейни изкривявания*.

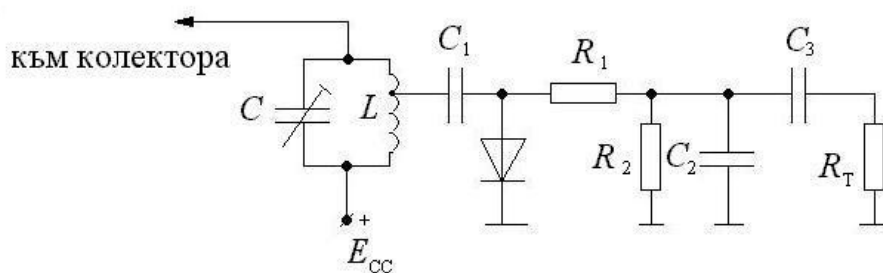
Недостатък на този детектор е неговият малък *коэффициент на предаване*. Обикновено $k = 0,6-0,8$.



фиг. 5.23

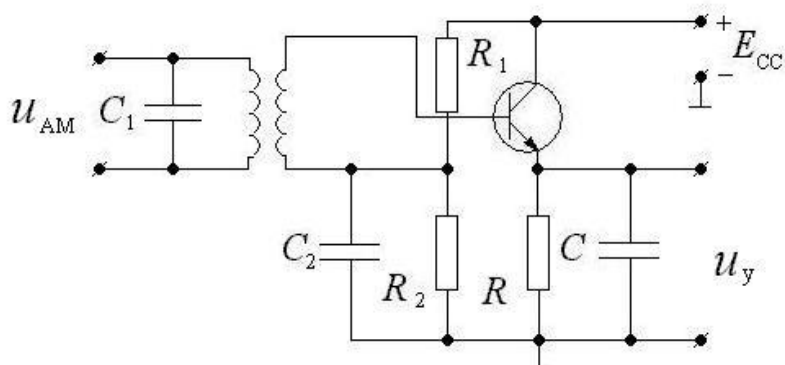
Схемата на квадратичния и линейния детектор е една и съща. На фиг. 5.23 са разграничени участъците, които важат за квадратичния и за линейния детектор. Явно е, че основното различие идва от големината на входния сигнал.

Линейният детектор изисква голямо входно напрежение (над 0,5-1V). Това налага осигуряването на голямо усилване от предшестващите стъпала в радиоприемните устройства.



фиг. 5.24

Разгледаната схема на фиг. 5.21 е известна като *последователна* схема на диоден детектор. Известна е и *паралелна* схема, за която важат същите изводи за детекторната характеристика. Тя е показана на фиг. 5.24, когато през предшестващия трептящ кръг протича постоянен ток. На фиг. 5.25 е дадена схемата на *емитерен детектор*.



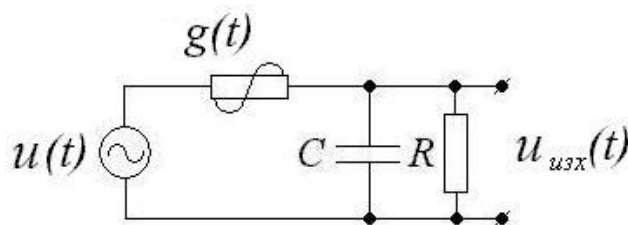
фиг. 5.25

В тази схема ролята на нелинеен детектор изпълнява преходът база-емитер, а детекторния сигнал се получава върху елементите R и C . Резисторите R_1 и R_2 се подбират така, че транзисторът да работи в режим на отсечка на колекторния ток.

Коефициентът на предаване на този детектор е близък до единица.

При свързване на транзистора по схема с общ емитер се получава схемата на *колекторен детектор*. Чрез него освен детектирането се осъществява и усилване на сигнала.

При детектирането на АМ сигнали се използва и тъй наречения *синхронен детектор*. Той има избирателни свойства и по тази причина е защитен по-добре от смущения в сравнение с разгледаните по-горе детектори.



фиг. 5.26

На фиг. 5.26 е дадена схемата на синхронен детектор. Вместо нелинеен елемент се използва *параметричен*, чиято проводимост $g(t)$ се изменя в зависимост от носещото трептене на сигнала:

$$g(t) = g_0 (1 + m_g \cos \omega_0 t) \quad (5.61)$$

Модулираният сигнал може да се представи чрез формулата

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (5.62)$$

където

$$U(t) = U_0 (1 + m \cos \Omega t) \quad (5.63)$$

Токът в изходната верига ще се определи от

$$i = u(t) g(t) = g_0 U \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{m_g g_0 U}{2} \cos \varphi_0 + \frac{m_g g_0 U}{2} \cos(2 \omega_0 t + \varphi_0) \quad (5.64)$$

При филтрирането се появява постоянна съставка I'_0 , която е функция на ъгъл φ_0

$$I'_0 = \frac{m_g g_0 U}{2} \cos \varphi_0 \quad (5.65)$$

Нейната максимална стойност се получава при $\varphi_0 = 0$

$$I'_{0 \max} = \frac{m_g g_0 U}{2} \quad (5.66)$$

Това налага изискването за едновременно изменение на носещото трептене и на проводимостта g . По тази причина детектирането се нарича синхронно, а детекторът - *синхронен*.

Капацитетът на кондензатора C се подбира, като се изходи от условието

$$\frac{1}{\omega_0 C} \ll R \quad (5.67)$$

Това означава кондензаторът да е с пренебрежимо малко съпротивление за носещото трептене в сравнение със съпротивлението на резистора R .

Изходното напрежение се определя от тока I'_0 и резистора R :

$$u_{\text{изх}} = \frac{m_g g_0 R U}{2} \cos \varphi_0 \quad (5.68)$$

При бавно изменение на амплитудата $U = U(t)$ изходното напрежение се изменя по линейна зависимост от което следва, че детекторната характеристика на синхронния детектор е *линейна*.

5.7. Детектиране на ъглово модулирани сигнали

Детектирането на *честотно модулирани* сигнали се осъществява от устройство, изходното напрежение на което зависи линейно от измененията на честотата на входния сигнал.

Ако честотно модулирания сигнал е

$$I(t) = I_m(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (5.69)$$

то за напрежението на изхода на честотен детектор ще се получи следната функционална връзка

$$u_{\text{изх}}(t) = S_{\text{ч.д.}} \frac{d\varphi}{dt} = S_{\text{ч.д.}} \Delta\omega(t) , \quad (5.70)$$

където $S_{\text{ч.д.}} = ct$ е стръмността на детекторната характеристика изразена във (V/Hz) , а $\Delta\omega(t)$ моментната стойност на честотното отклонение на входния сигнал.

От 5.70 следва, че честотния детектор трябва да осъществява трансформация на изменението на честотата в изменение на изходното напрежение на детектора. По тази причина детектора трябва да съдържа:

- а) избирателна линейна схема, чрез която да се осъществява преобразуване на ЧМ в АМ;
- б) амплитуден детектор.

Освен това този детектор не трябва да реагира на паразитната амплитудна модулация на входния сигнал. За целта се предвижда ограничително стъпало, функциите на което най-често се изпълнява от амплитуден детектор. Блоквата схема е показана на фиг. 5.27.

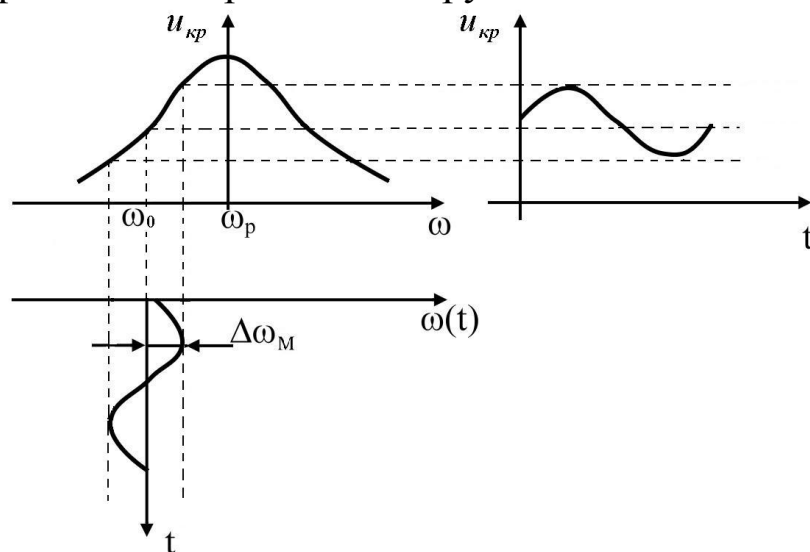


фиг. 5.27

Преобразуването на модулацията се извършва при преминаване на ЧМ сигнали през разстроен трептящ кръг. За целта трептящия кръг се настройва на честотата ω_p , която е по-малка или по-голяма от

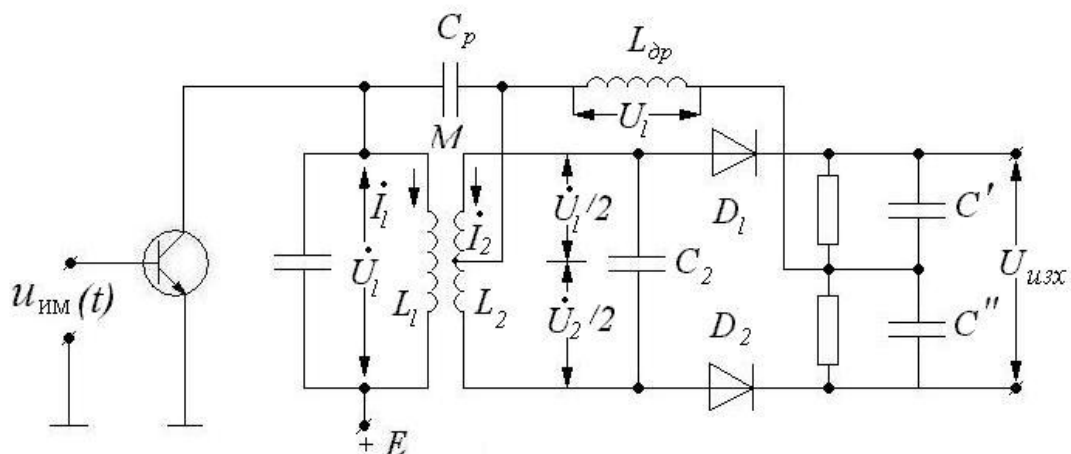
честотата на носещото трептене ω_0 . На фиг. 5.28 е показано преобразуването на модулацията. В случая резонансната честота е по-голяма от честотата на носещото трептене. Отдолу е дадена графиката на *изменението на честотата* в зависимост от управляващия сигнал. Очевидно е, че изменението на честотата се превръща в изменение на амплитудата.

Този принцип за детектиране на ЧМ сигнали намира приложение в така наречения *детектор с разстроени трептящи кръгове*. Предимството е липса на постоянна съставка, но от друга страна, настройката на кръговете е трудна.



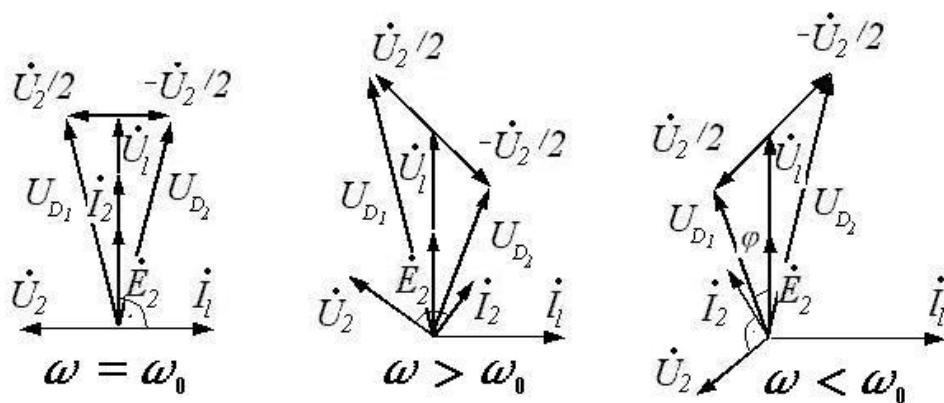
фиг. 5.28

Схемата на честотния детектор, показан на фиг. 5.29 се базира на *преобразуването на ЧМ сигнали във фазово модулирани* и детектирането им с помощта на амплитудно-фазов детектор. Двата трептящи кръга в схемата са настроени на честота ω_0 . Във всяка половина от вторичния кръг се индуцира напрежение $\dot{U}_2/2$. Дроселът $L_{др}$ е подбран така, че върху него да се отлага напрежение с големина \dot{U}_1 . Диодите D_1 , D_2 и елементите C' , C'' и R изпълняват ролята на амплитуден детектор.



фиг. 5.29

Действието на детектора може да се обясни с помощта на векторните диаграми показани на фиг. 5.30.



фиг. 5.30

Когато липсва модулиращ (управляващ) сигнал, честотата на входния сигнал е $\omega = \omega_0 = \omega_p$. През първичния кръг протича ток \dot{I}_1 , който изостава от \dot{U}_1 на 90° . Поради взаимната индуктивност между двата кръга във вторичния кръг се индуцира е.д.н. \dot{E}_2 изместено на 90° спрямо \dot{I}_1 . Съответния ток \dot{I}_2 е съпосочен с \dot{E}_2 , защото честотата на сигнала е равна на резонансната. Напрежението \dot{U}_2 в бобината L_2 изпреварва тока \dot{I}_2 с 90° . От фиг. 5.29 се вижда, че напреженията върху съответните диоди се определят от \dot{U}_1 и $U_2/2$. Тъй като двата вектора U_{D1} и U_{D2} са с еднаква големина, след изравняването на напрежението, върху резисторите R се получават две еднакви напрежения с противоположен поляритет, т.е. $u_{изх} = 0$.

Ако честотата на входния сигнал е по-голяма от резонансната т.е. $\omega > \omega_0$, токът \dot{I}_2 изостава от \dot{E}_2 на ъгъл φ . В този случай кръгът има индуктивен характер. За отбелязване е, че е.д.н. \dot{E}_2 е включено последователно. Напрежението U_2 , както преди, изпреварва тока \dot{I}_2 с 90° . По тази причина при сумирането на векторите се установява, че $\dot{U}_{D1} > \dot{U}_{D2}$. Това означава появяването на положително изходно напрежение ($U_{изх} > 0$). Следователно *измененията на честотата се превръщат в съответни изменения на ъгъл φ .*

Аналогични разглеждания могат да се направят за случая $\omega < \omega_0$. Тук токът \dot{I}_2 изпреварва е.д.н. \dot{E}_2 поради капацитивния характер на съпротивлението на кръга. В случая $u_{изх} < 0$.

Ако се измени посоката на включване на диода D_2 и се добави на изхода кондензатор с голям капацитет се получава схемата на *дробен детектор*. Изходното напрежение в този случай се взема от краищата на долния резистор R (виж фиг. 5.29). с дробния детектор може да се постигне и ограничение на сигнала, вместо да се използва отделен ограничител.

Детектирането на *фазово модулирани сигнали* се реализира със същите схеми, които се използват за детектиране на ЧМ сигнали.

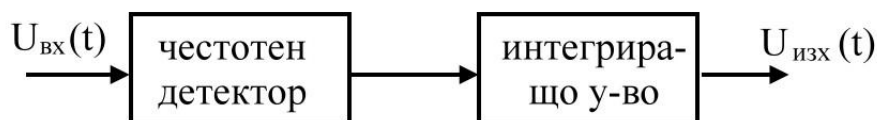
При детектирането на ФМ сигнали трябва да се получи:

$$u_{изх}(t) = S_{ч.д.} \varphi(t) \quad (5.81)$$

За да се получи тази зависимост, трябва да се интегрира $\Delta\omega(t)$ 5.80, защото

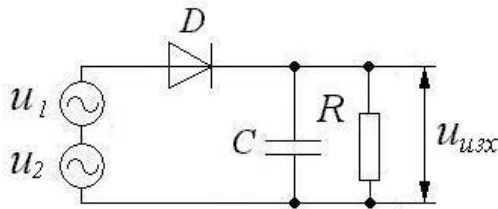
$$\varphi(t) = \int_0^t \Delta\omega(t) dt \quad (5.82)$$

Блоквата схема на детектор за ФМ сигнали е дадена на фиг. 5.31. Тя съдържа детектор за ЧМ трептения и *интегриращо устройство*.

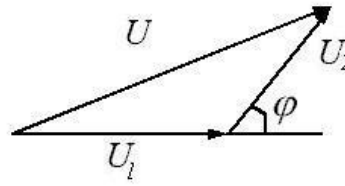


фиг. 5.31

Най-разпространения вид детектор е този с опорно (еталонно) напрежение. Същият е показан на фиг. 5.32. Той не се отличава от детектора за АМ сигнал. Принципът на работа е следния:



фиг. 5.32



фиг. 5.33

На входа му въздействат: опорното напрежение

$$u_1 = U_1 \cos \omega t \quad (5.83)$$

и сигналът

$$u_2 = U_2 \cos (\omega_0 t + \varphi) \quad (5.84)$$

Амплитудата, която се прилага върху диода, се получава чрез сумиране на векторите \dot{U}_1 и \dot{U}_2 (фиг. 5.33). Тя зависи от фазовия ъгъл между двата сигнала

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2 U_1 U_2 \cos \varphi} \quad (5.85)$$

Изходното напрежение се определя, като се вземе под внимание коефициентът на предаване на детектора $k = \cos \theta$

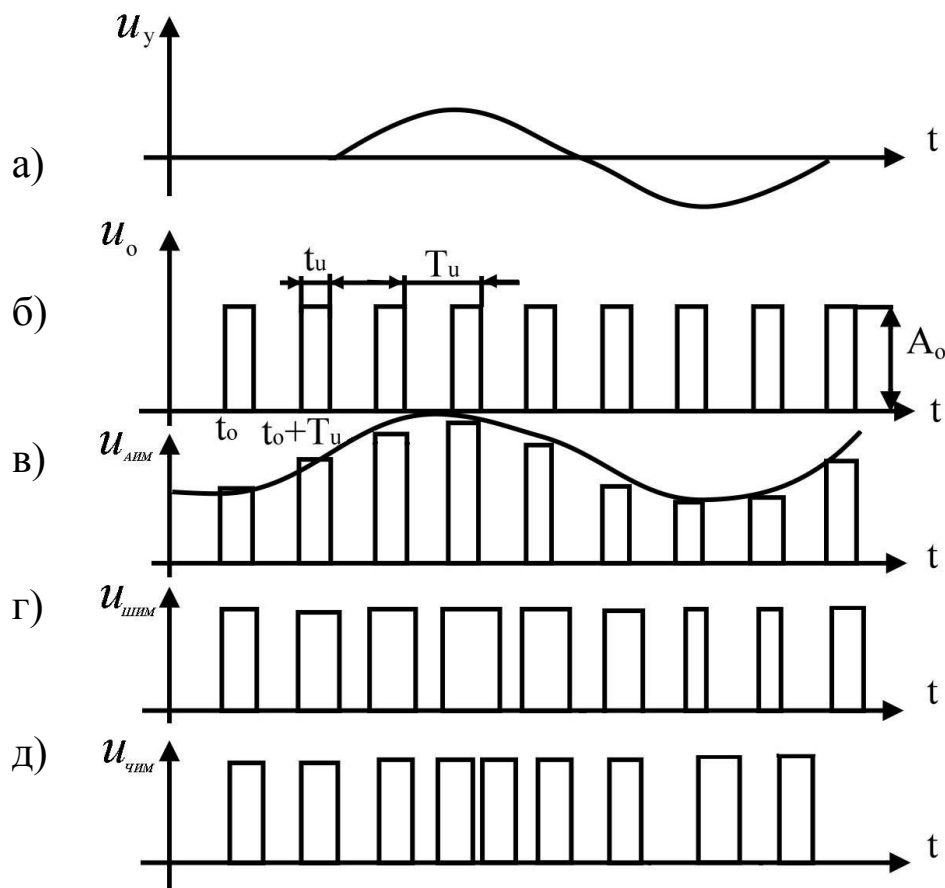
$$U_{изх} = k U \quad (5.86)$$

Този детектор се отличава с простота, но внася значителни изкривявания. По тази причина по-голямо приложение намира балансния фазов дискриминатор.

5.8. Импулсни методи за модулация и демодулация

Импулсната модулация се характеризира с това, че за носещо трептение се използва поредица от импулси, чиято форма обикновено е правоъгълна (фиг. 5.34 б).

Управляващия сигнал е показан на фиг. 5.34 а.



фиг. 5.34

Носещото трептене се характеризира със следните величини: A_0 - височина (амплитуда) на импулсите, T_u е техния период, а t_u е продължителността им.

След модулацията всеки импулс се превръща в носител на част от информацията, която се съдържа в управляващия сигнал. За вярното предаване на сигналите е необходимо периодът на импулсите да отговаря на условието

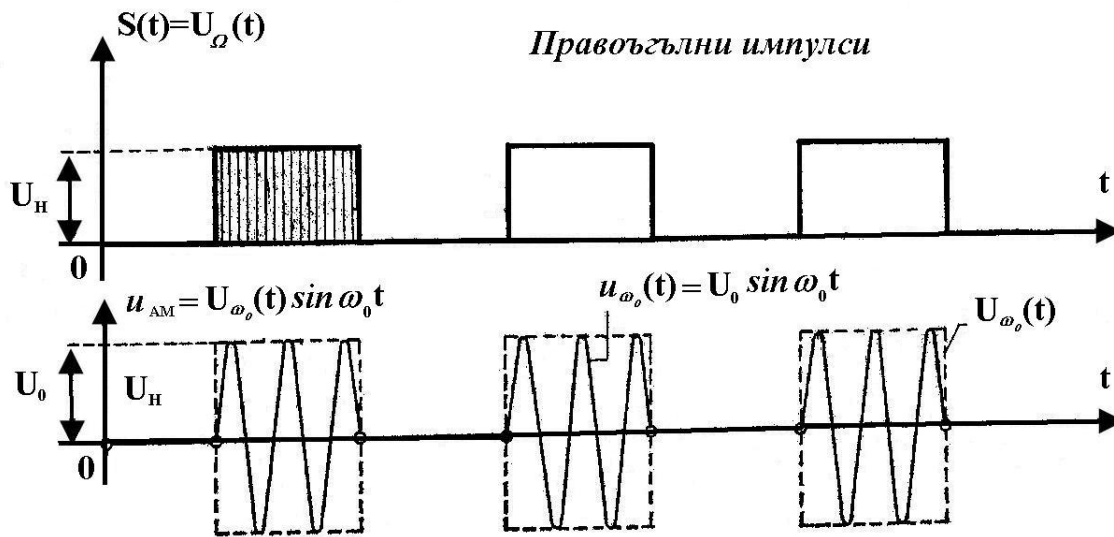
$$T \leq \frac{1}{2 F_m} \quad , \quad (5.87)$$

където F_m е горната гранична честота на управляващия сигнал.

Този сигнал се използва като управляващ, (модулиращ), амплитудата на високочестотно хармонично носещо трептене

$$u_{\omega_0}(t) = u(t) = U_0 \sin \omega_0 t$$

Както се вижда, в случая се получава последователност от импулси с високочестотно запълване, наричани високочестотни импулси или *радиоимпулси*(фиг.5.35).



фиг. 5.35

Импулсният радиосигнал следователно е такъв радиосигнал, обвивката на който има характера на управляващите видеоимпулси. Импулсните радиосигнали са частен случай на амплитудно модулираните сигнали. Те обаче имат значително по-други свойства и затова се разглеждат не като амплитудно модулирани, а като амплитудно манипулирани сигнали.

Всеки импулсен сигнал има неограничен спектър, т.е. съдържа безкрайно много компоненти, честотите на които се простират до безкрайност. В същото време е известно, че 95 % от цялото енергийно съдържание на реалния сигнал се дължи на съставките, разположени в границите на активната ширина на спектъра на сигнала ΔF , т.е.

$$F_{\max} = \Delta F \quad (5.88)$$

В повечето случаи активната ширина на спектъра ΔF може да се приеме с достатъчна за практиката точност да бъде равна на реципрочната величина на активната продължителност τ_u на импулса, т.е.

$$\Delta F = \frac{1}{\tau_u} = F_{\max} \quad (5.89)$$

Както при обикновената амплитудна модулация, и тук активната ширина на радиоимпулса F_{AM} е два пъти по-голяма от активната ширина на спектъра на съответния управляващ импулс

$$F'_{AM} = 2 \Delta F \quad (5.90)$$

Понеже при правоъгълните импулси важи

$$\Delta F = \frac{2}{\tau_u} \quad (5.91)$$

се получава

$$F'_{AM} = 2 \frac{2}{\tau_u} = \frac{4}{\tau_u} \quad (5.92)$$

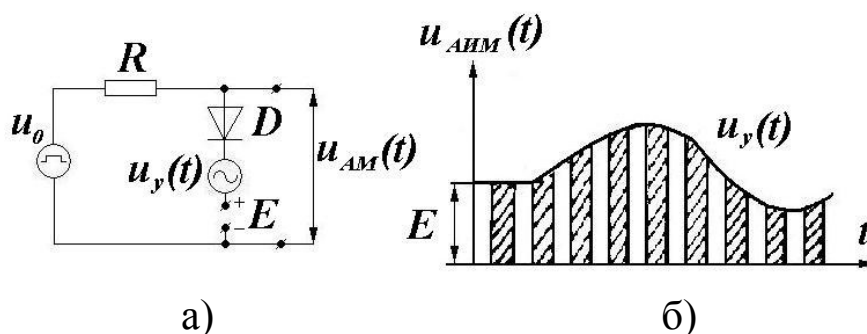
Така например, ако предавателят на радиолокационна станция генерира и излъчва радиоимпулси с правоъгълна форма и с продължителност $\tau_u = 1 \mu s$, и честотата на запълване е $1000 MHz$, то съгласно 5.92 ще се получи

$$F'_{AM} = 2 \frac{2}{10^{-6}} = 4 \cdot 10^6 Hz = 4 MHz \quad (5.93)$$

Следователно, честотата на радиоимпулса ще се променя от $998 MHz$ до $1002 MHz$.

Според това, кой от параметрите на импулсната поредица се изменя в зависимост от управляващия сигнал, се различават следните видове импулсни модуляции:

1. *Амплитудно импулсна модуляция (АИМ)*. При този вид модуляция се изменя амплитудата, (височината), на импулсите в зависимост от управляващия (модулиращ) сигнал. Това е показано на фиг. 5.34 в). Импулсната поредица има широк честотен спектър. Всяка негова съставка служи като носещо трептение и около нея се формират долна и горна странична лента. По тази причина за предаването на АИМ сигнал е необходим канал с широка честотна лента.



фиг. 5.36

На фиг. 5.36 а) е показана схемата на модулатор за АИМ. Освен елементите R , D и постояннотоковия източник E са включени и два източника: на последователността от импулсите $u_0(t)$ и на управляващия сигнал $u_y(t)$.

При липса на модулиращ сигнал, в случай, че $u_0(t) \leq E$, диода е запушен и на изхода се получават импулси с амплитуда E (фиг. 5.36 б). Ако $u_0(t) > E$ ще протече ток през диода в резултат на което ще се шунтира товарната верига.

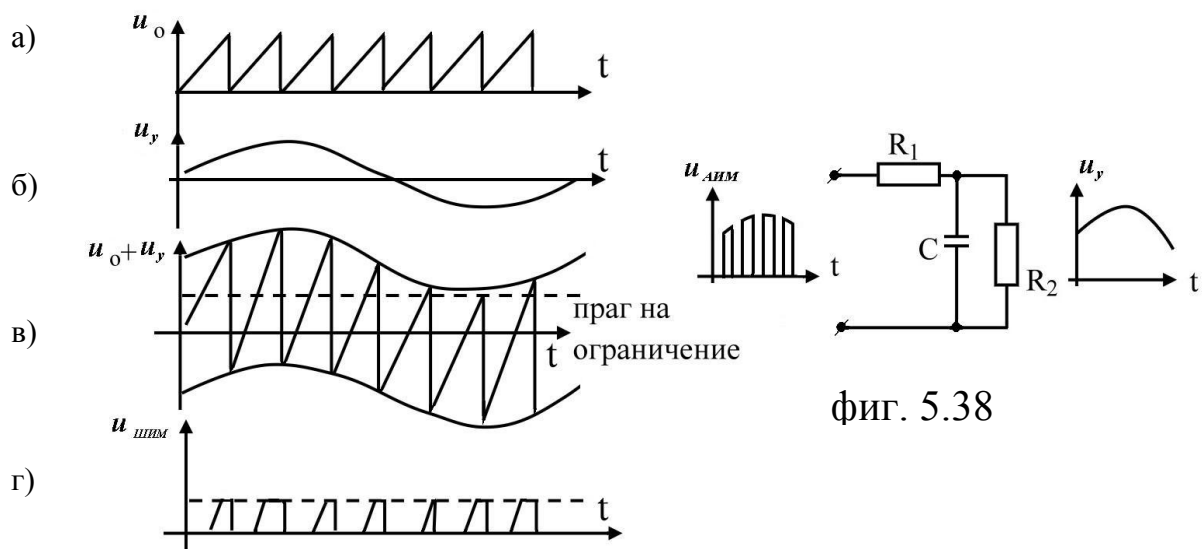
Когато постъпи управляващ сигнал, той се сумира алгебрично с праговото напрежение E и изменя прага на отпушване на диода. По този начин се получават импулси с амплитуда, която съответства на управляващия сигнал.

Трябва да се отбележи, че за да се извърши модулация трябва амплитудата на $u_0(t) \geq u_y(t)$.

2. Широчинно импулсна модулация (ШИМ). От названието се вижда, че широчината (времетраенето) на импулсите се изменя в зависимост от управляващия сигнал (фиг. 5.34 г), но амплитудата и положението им не се променят.

Широчината на импулсите може да се измени едновременно от двете страни (симетрична ШИМ) или само от едната страна (съответно “лява” и “дясна” ШИМ). Едностранната ШИМ ще промени фазата (положението) на импулса, ако тя се отчита от средата му.

При този вид модулация спектърът е по-богат в сравнение със спектъра на АИМ.



фиг.5.37

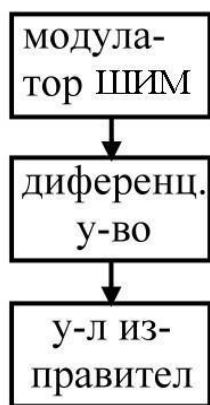
Получаването на ШИМ може да се осъществи, ако се използва триъгълно напрежение (фиг. 5.37 а). То се сумира с управляващия сигнал и се подлага на двустранно ограничение. В резултат се получава модулираното трептене (фиг. 5.37 г).

Детектирането на АИМ и ШИМ се извършва с помощта на линейна интегрираща верига, тъй като площта на модулираните импулси се определя от н.ч. модулиращ (управляващ) сигнал (фиг. 5.38).

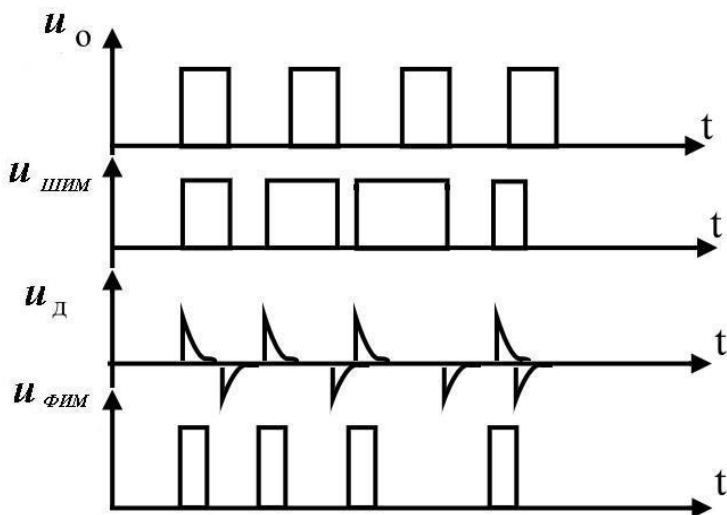
3. *Честотно импулсна модулация (ЧИМ)*. На фиг. 5.34 д) е дадена графиката на модулираното трептене. Честотата на импулсите се увеличава при положителни изменения на управляващия сигнал и намалява, когато неговата стойност е отрицателна.

4. *Фазово импулсна модулация (ФИМ)*. В този случай се изменя фазата (положението) на отделните импулси в зависимост от управляващия сигнал. Графиката на модулирания сигнал е показана на фиг. 5.34 д). Различието от ЧИМ се състои в това, че сгъстяването и разреждането на импулсите се дължи на тяхното изместване. Сходството се обяснява с връзката между фазовия ъгъл и честотата. По тази причина схемите за получаване на ЧИМ и ФИМ са едни и същи.

На фиг. 5.39 е показана блоковата схема на един модулатор за ФИМ (ЧИМ). Той се състои от модулатор на ШИМ, диференциращо устройство и усилвател-изправител.



фиг. 5.39



фиг. 5.40

Принципът на работа е пояснен от времедиagramите на фиг. 5.40. Вижда се, че в резултат на диференциране се получава последователност от двуполярни импулси, които след изправяне остават само положителни импулси, (непоказани на фигурата). Чрез тях се формира нова последователност от импулси, които са

изместени спрямо тези, които подлежат на модулиране, т.е. реализирана е ФИМ, (ЧИМ).

Установява се, че при ФИМ, (ЧИМ), амплитудите на страничните съставки в спектъра на модулирания сигнал зависят от честотата на управляващия сигнал. По тази причина съществуват проблеми при възстановяване на съобщението в приемната страна. Ето защо се прибегва до преобразуване на модулираните трептения в АИМ, (или в ШИМ), след което се извършва тяхното детектиране. За тази цел се използват електронни ключове.

С развитието на цифровите съобщителни и информационни системи през последните години все по-голямо приложение намират други модерни методи за импулсна модулация на сигналите. Към тях спадат *кодово импулсната модулация и делта модулацията*.