

**ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ И ИЗСЛЕДВАНИЯ  
НА ДИОДНИ АНАЛОГОВИ АМПЛИТУДНИ ДЕМОДУЛАТОРИ**

**OPERATION PRINCIPLE AND STUDIES  
OF DIODE ANALOG AMPLITUDE DEMODULATORS**

**Боян Карапенев\***

Технически университет - Габрово

Статията е постъпила на 25 август 2014г.; приета за отпечатване на 04 септември 2014г.

**Abstract**

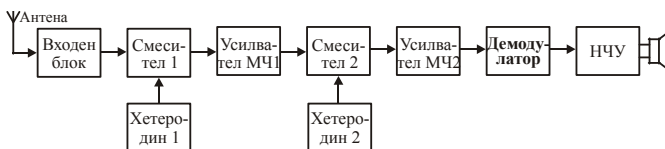
This paper presents the main qualitative parameters and characteristics, operation principle and studies of diode analog amplitude demodulators. The obtained simulation results for serial and parallel circuits of diode analog amplitude demodulators are shown using Electronics Workbench Pro software.

**Keywords:** диодни аналогови амплитудни демодулатори; принцип на действие; симулационни изследвания; резултати.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

С непрекъснатото развитие и усъвършенстване на комуникационната техника се увеличава необходимостта от използването на различните видове модулатори и демодулатори.

Радиовръзката е много широко разпространена и не може да бъде реализирана без радиопредавателно и радиоприемно устройство. Демодулаторът има важна и незаменима роля в нейното изграждане. Нагледен пример за това е блоковата схема на супер-хетеродинния радиоприемник, като показаната на фиг. 1.



Фиг. 1. Блокова схема на суперхетеродинен радиоприемник

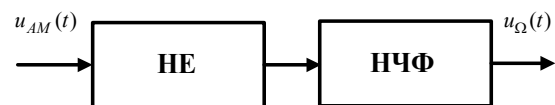
**ИЗЛОЖЕНИЕ**

Амплитудната демодуляция е процес, при който високочестотният амплитудномодулиран сигнал се преобразува в нискочестотен, формата и честотата на който съответства на сигнала, модулирал носещото трептене в предавателната страна или още процес на извличане на информация от амплитудномодулирания сигнал.

При хармоничен управляващ сигнал в спектъра на амплитудномодулираното трептене са съставките с честоти  $\omega_0$ ,  $\omega_0 - \Omega$  и  $\omega_0 + \Omega$ , а след демодулирането се получава сигнал с честота  $\Omega$ .

Аналоговите амплитудни демодулатори (АД) се изграждат от нелинеен елемент (НЕ) като на входа му постъпва амплитудномодулирано трептене  $u_{AM}(t)$ , което се пре-

образува и на изхода чрез нискочестотен филтър (НЧФ) се възстановява модулиращия управляващ (информационен) сигнал  $u_{\Omega}(t)$  – фиг. 2 [2].



Фиг. 2. Блокова схема на аналогов амплитуден демодулатор

Основните качествени показатели и характеристики на аналоговите амплитудни демодулатори са:

- Коефициентът на предаване по напрежение, определящ ефективността на демодулатора

$$A_{U_d} = \frac{U_{\Omega m}}{m U_{om}}; \tag{1}$$

- Коефициентът на филтрация, даващ оценка за остатъчното високочестотно напрежение  $U_{omo}$  на изхода на филтъра;

$$K_f = \frac{U_{omo}}{U_{omi}}; \tag{2}$$

В общия случай неговите стойности са по-малки от 0,01.

- Входният импеданс  $Z_i$

$$Z_i = R_i + \frac{1}{j\omega C_i}, \tag{3}$$

където  $R_i$  и  $C_i$  са съответните съставки. Входното съпротивление  $R_i$  определя натоварването на високочестотния сигнал източник –

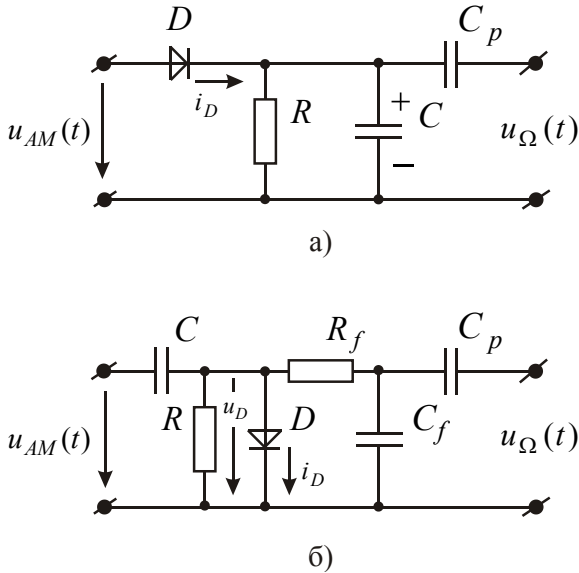
$$R_i = \frac{U_{om}}{I_{om1}};$$

\* Тел.: 066 827-415; e-mail: bkarapenev@tugab.bg

- Честотните изкривявания, които се определят от амплитудно-честотната характеристика  $U_{\Omega m}(f)$  при  $m=C^{te}$ ,  $U_{\Omega m} = C^{te}$  и  $f_H = C^{te}$ ;
- Коэффициентът на нелинейни изкривявания  $k$ .

Най-разпространеният аналогов амплитуден демодулатор е **диодният**, при който като нелинеен елемент се използва полупроводников диод [3].

На фиг. 3,а и фиг. 3,б са представени съответно последователна и паралелна схема на диоден аналогов амплитуден демодулатор.



Фиг. 3. Схема на диоден аналогов амплитуден демодулатор: а) – последователна, б) – паралелна

За правилна работа на демодулаторите – добра филтрация на високочестотното напрежение и отсъствие на инертност, е необходимо да бъдат изпълнени условията:

$$\frac{1}{\omega_H \cdot C} \ll R, \quad \frac{1}{\Omega_H \cdot C} \gg R. \quad (4)$$

В зависимост от амплитудата на входния сигнал  $u_{AM}(t)$  диодните амплитудни демодулатори работят в режим на квадратично или линейно демодулиране.

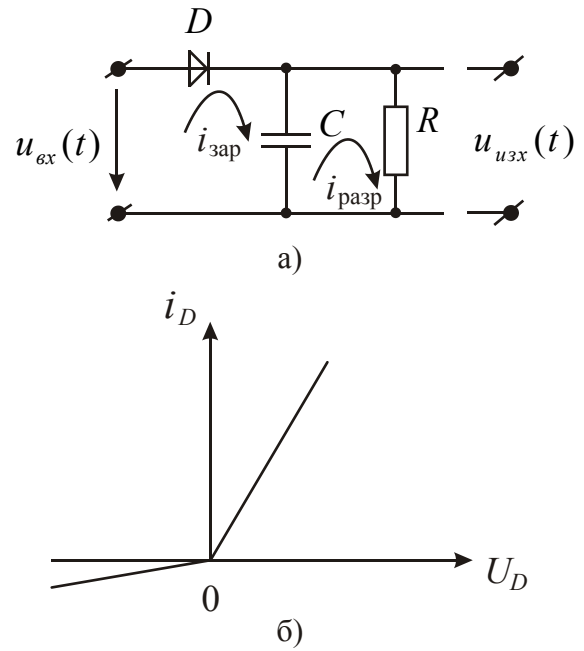
**1. Принцип на действие на аналоговите амплитудни демодулатори**

Качествените показатели на амплитудните демодулатори са силно зависими от амплитудата на входния сигнал. Разработените аналитични методи за тяхното проектиране се разделят относително на: за „малки“ и „големи“ сигнали и се определя от качествените показатели на използвания нелинеен елемент.

От съществуващите нелинейни елементи най-широко се използват полупроводниковите диоди. Към еквивалентен диоден демодулатор се свежда и проектирането на демодулатори с използването на други нелинейни елементи, например с транзистори.

Принципът на действие на най-опростения аналогов амплитуден демодулатор, като представения на фиг. 4,а е изграден на базата на диоден изправител, първоначално при въздействие на хармоничен входен сигнал от вида

$$u_{ex}(t) = U_m \cdot \cos \omega_0 t. \quad (5)$$



Фиг. 4. а) – Амплитуден демодулатор, изграден на базата на диоден изправител, б) – V-A характеристика на полупроводниковия диод

Състоянието на диода се описва с неговата V-A характеристика  $i_D=f(u_D)$ , която в апроксимиран вид е представена на фиг. 4,б. При  $u_D > 0$  диодът се характеризира със съпротивление на поляризирания в права посока  $p-n$  преход  $R_{D+}$ , а при  $u_D < 0$  със съпротивление на запушения  $p-n$  преход  $R_{D-}$ , при което  $R_{D+} \ll R_{D-}$ .

В схемата от фиг. 4,а  $u_D(t) = u_{ex}(t) - u_{изx}(t)$ . През положителната полуwave на входния сигнал и при  $u_{изx}(t) < u_{ex}(t)$  диодът е отпушен и през него протича ток. Кондензаторът  $C$  през отпушения диод бързо се зарежда с времеконстанта  $\tau_{zap} = R_{D+} \cdot C$ . Зарядът продължава докато напрежението на кондензатора ( $u_{изx}$ ) не се изравни с входното напрежение, при което диодът се запушва. Кондензаторът започва да се разрежда през резистора  $R$ . Обикновено  $R \gg R_{D+}$ . Разрядът протича по-бавно от заряда и за времето на отрицателната полуwave на входния сигнал изходното напрежение се изменя сравнително малко.

На фиг. 5 е показан преходният процес на заряд и разряд на кондензатора. Токът през диода протича само в тези моменти от време, когато  $u_D(t) = u_{ex}(t) - u_{изx}(t) > 0$ . Относно диода напрежението  $-U_0$  се явява резултантното. Тъй като  $E_0$  е равно на 0 (фиг. 4,б), то  $E_{cm} = -U_0$  осигурява работата на диода с ъгъл на отсечка по-малък от  $90^\circ$ . При голяма стойност на времеконстантата  $R \cdot C \gg T_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0}$  стойността на

$U_0$  е близка до амплитудата на входния сигнал. Затова се получава достатъчно малък ъгъл на отсечка, който се определя от съотношението на съпротивленията  $R_{D+}$  и  $R$ . Стръмността на V-A характеристика на отпушения диод е  $S=1/R_{D+}$ .

Следователно

$$I_{D,max} = \frac{1}{R_i} \cdot (U_{m,ex} - U_0) \quad (6)$$

$$I_{D,0} = \alpha_0 \cdot I_{D,max} = \alpha_0 \cdot \frac{1}{R_{D+}} \cdot (U_{m,ex} - U_0) \quad (7)$$

При  $E_0 = 0$ ,  $\cos \theta = \frac{U_0}{U_{m,ex}}$ ,

откъдето

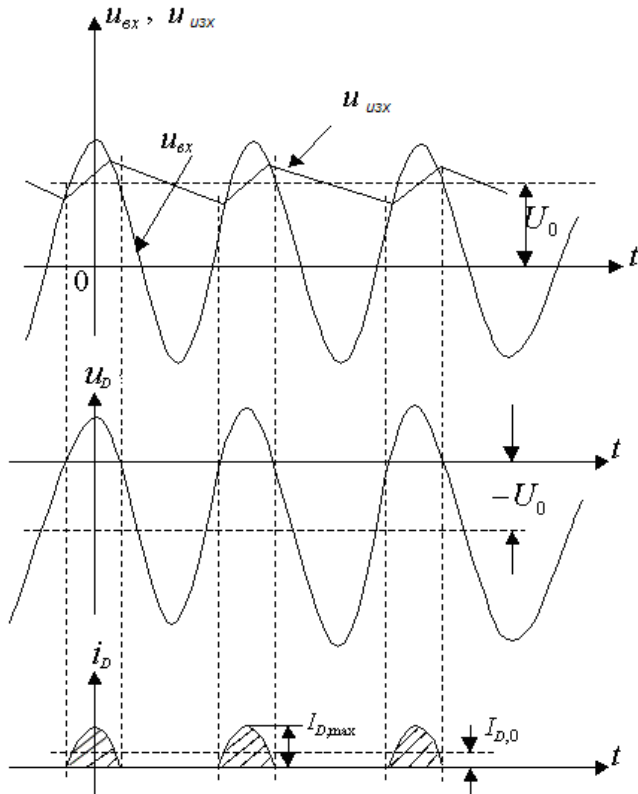
$$\frac{I_{D,0}}{U_0} = \frac{1}{R} = \frac{\alpha_0 \cdot (1 - \cos \theta)}{R_{D+} \cdot \cos \theta} \quad (8)$$

Имайки в предвид, че

$$\alpha_0 = \frac{\sin \theta - \theta \cdot \cos \theta}{\pi \cdot (1 - \cos \theta)} \quad (9)$$

в краен резултат се получава съотношението

$$\frac{R_{D+}}{R} = \frac{\text{tg} \theta - \theta}{\pi} \quad (10)$$



Фиг. 5. Времедиаграми на напреженията и токовете, поясняващи принципа на действие на диодния аналогов амплитуден демодулатор

По такъв начин вътрешното съпротивление на диода  $R_{D+}$  и товарното съпротивление еднозначно определят ъгъла на отсечка  $\theta$ . Колкото стойността на  $U_0$  е по-близка до  $U_{m,изх}$  толкова по-малък е ъгълът на отсечка. При работа с  $\theta=10^\circ$  ( $\cos \theta=0,9848$ ) е необходимо

$$R = \frac{\pi \cdot R_{D+}}{\text{tg} \theta - \theta} \approx 2000 \cdot R_{D+} \text{ . При } \theta \leq (10-20)^\circ \text{ изходното}$$

напрежение на демодулатора е близко по амплитуда с входното. След определяне на стойността на  $R$  може да се изчисли и необходимата стойност на капацитета на  $C$  от условието за пропускане на високочестотните съставлящи и предаването на нискочестотния спектър на тока без изкривявания

$$\frac{2 \cdot \pi}{\omega_0} \ll R \cdot C \ll \frac{2 \cdot \pi}{f_H} \quad (11)$$

Тъй като  $\omega_0 \gg f_H$  условието е лесно изпълнимо.

Тъй като амплитудният демодулатор се свързва като товар на усилвателя на високи честоти, то важно значение има стойността на неговото входно съпротивление. При  $R \gg R_{D+}$  практически цялата мощност се отдава в съпротивлението  $R$ . При това, може приблизително да се приеме, че

$$\frac{1}{2} U_{m,ex} \cdot I_{m,D,1} \approx U_0 \cdot I_{D,0} \quad (12)$$

където  $I_{m,D,1}$  и  $I_{D,0}$  са съответно амплитудата на първия хармоник и постоянната съставляща на тока на диода. Като се раздели лявата и дясната част на  $U_{m,ex}^2$  се получава

$$\frac{I_{m,D,1}}{2 \cdot U_{m,ex}} = \frac{U_0}{U_{m,ex}} \cdot \frac{I_{D,0}}{U_{m,ex}} \quad (13)$$

Като се отчете, че  $U_0 \approx U_{m,вх}$

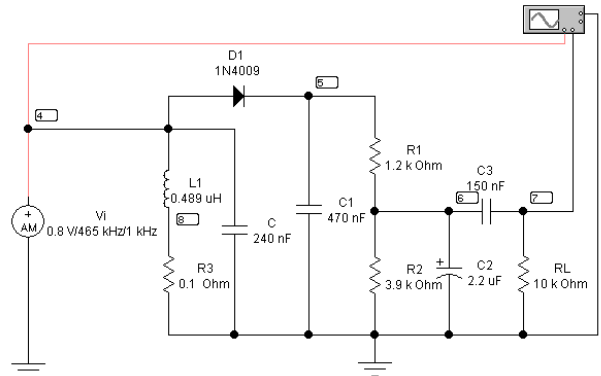
$$\frac{1}{2 \cdot R_{ex}} = \frac{1}{R} \quad (14)$$

откъдето  $R_{ex} = \frac{1}{2} \cdot R$ .

За да може демодулаторът да не влияе върху честотните характеристики на усилвателя е необходимо при избора на  $R$  да бъде спазено условието  $R \gg Z_p$ , където  $Z_p$  е резонансното съпротивление на кръга на усилвателя.

## 2. Симулационни изследвания на последователна и паралелна схема на диодни аналогови амплитудни демодулатори

На фиг. 6 е показана схемата на свързване на опитната постановка за симулационно изследване на проектирана схема на последователен диоден аналогов амплитуден демодулатор [5] с изходни данни: междинна честота  $f_0=465$  kHz, долна и горна честота от спектъра на модулацията сигнал  $f_B=0,3$  kHz и  $f_H=3$  kHz, индекс на модулацията  $m=0,8$ , входно съпротивление и капацитет на нискочестотния усилвател  $R_{ВХНЧУ}=10$  k $\Omega$  и  $C_{ВХНЧУ}=1$  nF, допустими честотни изкривявания за най-високите и най-ниските честоти на модулацията  $M_B=1,2$  и  $M_H=1,2$ .



Фиг. 6. Схема на свързване на опитната постановка за симулационно изследване на последователен диоден аналогов амплитуден демодулатор

На фиг. 7 е показана осцилограмата на входния (представен с червен цвят) и изходния (представен с чер цвят) сигнал, получена при симулационното из-

следване на схемата на последователния диоден амплитуден демодулатор. От нея се определят:

- максималната стойност на входния сигнал

$$U_{in,max} = 1,08 \text{ V};$$

- максималната стойност на демодулирания сигнал

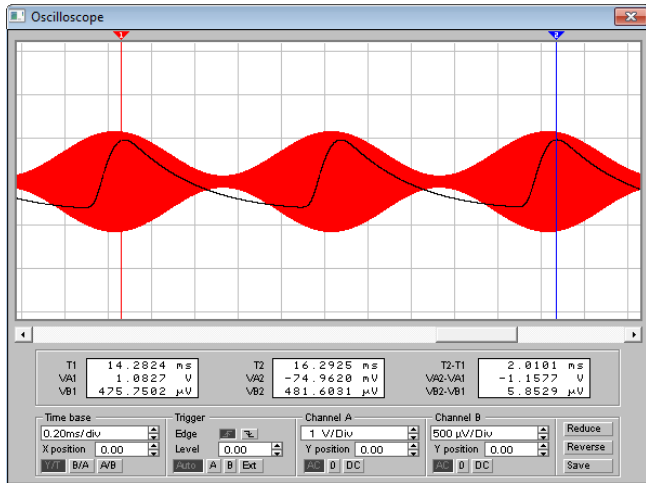
$$U_{0D,max} = 481,6 \mu\text{V};$$

- минималната стойност на входния сигнал

$$U_{in,min} = -1,09 \text{ V};$$

- минималната стойност на демодулирания сигнал

$$U_{0D,min} = -301,64 \mu\text{V}.$$

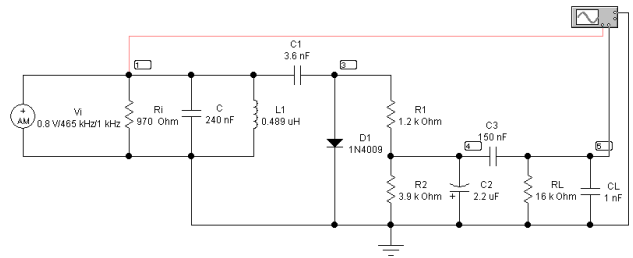


Фиг. 7. Осцилограма на входния и изходния сигнал, получена при симулационното изследване на схемата на последователния диоден аналогов амплитуден демодулатор

В последователната схема на диодния амплитуден демодулатор, показана на фиг. 6, диодът  $D1$  1N4009 е запушен при входно напрежение, по-малко от неговото отпушващо. Когато напрежението върху диода достигне  $0,6 \text{ V}$ , той се отпушва. При намаляване на входното напрежение спрямо неговата максимална стойност (под  $1,08 \text{ V}$ ) и при спад под  $0,6 \text{ V}$  диодът се запущва. От осцилограмата се вижда се, че максималната стойност на демодулирания сигнал много малко закъснява спрямо тази на входния, а минимумът е изместен значително спрямо този на входния сигнал. Това се дължи на факта, че когато диодът е запушен, в рамките на един период кондензаторът  $C2$  се презарежда до все по-малка стойност на приложеното върху него напрежение.

През положителната полуwave на амплитудно-модулираното напрежение от протичащия ток през диода се зарежда кондензаторът в демодулаторната верига. Когато входното напрежение започне да намалява и стане равно на напрежението на кондензатора, резултантното напрежение между катода и анода на диода става равно на нула и ток във веригата престава да протича. Кондензаторът не може да се разрежи през диода, поради отрицателната полярност или еднаквостта на напрежението върху кондензатора и диода, и затова разрядният му ток протича през резистора  $R2$ . Той трябва да има относително голямо съпротивление, което не позволява за кратко време кондензаторът да се разрежи до нула, тъй като започва отново зареждането му с напрежението на следващия период. Минималните многократни пулсации на демодулирания сигнал в рамките на един период се дължат да разреждането и презареждането на кондензатора  $C2$  през  $C1$ , който има значително по-малка стойност на своя капацитет.

На фиг. 8 е показана схемата на свързване на опитната постановка за симулационно изследване на проектирана схема на паралелен диоден аналогов амплитуден демодулатор.



Фиг. 8. Схема на свързване на опитната постановка за симулационно изследване на паралелен диоден аналогов амплитуден демодулатор

На фиг. 9 е показана получената осцилограма на входния (представен с червен цвят) и изходния (представен с чер цвят) сигнал от извършеното симулационно изследване на схемата на паралелния диоден амплитуден демодулатор. От нея се определят:

- максималната стойност на входния сигнал

$$U_{in,max} = 1,0117 \text{ V};$$

- максималната стойност на демодулирания сигнал

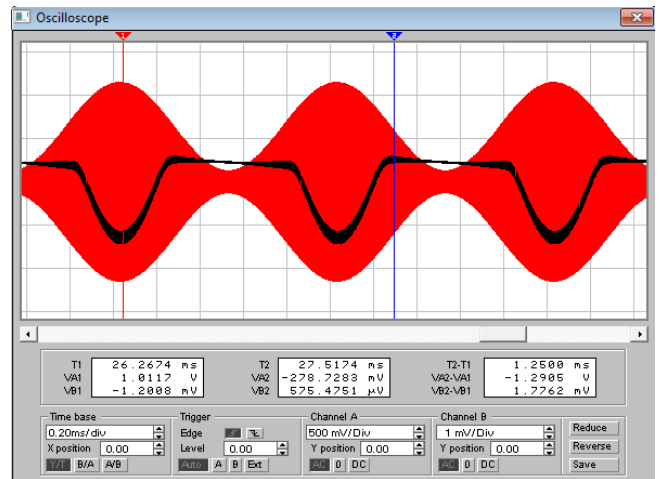
$$U_{0D,max} = 575,4751 \mu\text{V};$$

- минималната стойност на входния сигнал

$$U_{in,min} = -1,1334 \text{ V};$$

- минималната стойност на демодулирания сигнал

$$U_{0D,min} = -1,3852 \text{ mV}.$$



Фиг. 9. Осцилограма на входния и изходния сигнал, получена при симулационното изследване на схемата на паралелния диоден аналогов амплитуден демодулатор

На осцилограмата от фиг. 9 се вижда, че изходният демодулиран сигнал е дефазирен на  $180^\circ$  спрямо входния амплитудно-модулиран - при максимална стойност на входния сигнал се наблюдава минимална стойност на демодулирания сигнал. Изходният и входният сигнал ще бъдат синфазни, ако свързаният паралелно на схемата диод бъде включен в обратна посока.

Извършени са и симулационни изследвания на схемите на последователния и паралелния диоден амплитуден демодулатор и при  $m = 0,6$ .

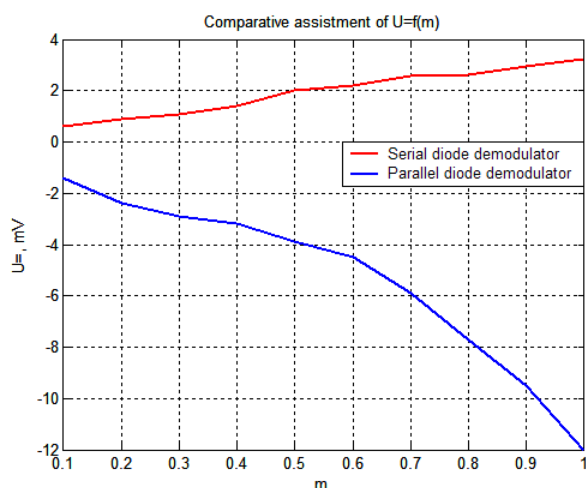
От извършената сравнителна оценка между получените симулационни резултати на схемите на последова-

телния и паралелния диоден амплитуден демодулатор при стойности на  $m$  0,8 и 0,6 могат да се направят следните изводи:

1) Паралелната схема, въпреки че притежава по-малко входно съпротивление, осигурява по-малки общ коэффициент на разложение на демодулирания сигнал (от порядъка на два пъти) и коэффициент на нелинейни изкривявания  $k$ ;

2) По-малкият индекс на амплитудна модулация ( $m$ ) води до значително намаляване на амплитудата на амплитуднодемодулирания сигнал и тъй като намаляват амплитудите на отделните хармонични съставящи – и стойността на коефициента на нелинейни изкривявания  $k$ .

На фиг. 10 е представена извършената сравнителна оценка на получените графични зависимости на измерената постояннотокова съставяща на изхода на последователния и паралелния диоден аналогов амплитуден демодулатор от индекса на подадения входен амплитудномодулиран сигнал  $U_{\Sigma}=f(m)$ .



Фиг. 10. Сравнителна оценка на получените графични зависимости  $U_{\Sigma}=f(m)$  на схемите на диодните аналогови амплитудни демодулатори

От направената сравнителна оценка на зависимостта на  $U_{\Sigma}=f(m)$  за последователния и паралелния диоден демодулатор се установява, че:

- с увеличаване на стойността на индекса на амплитудна модулация  $m$  расте и постояннотоковата съставяща на изходния демодулиран сигнал;

- при паралелната схема на диодния аналогов амплитуден демодулатор постояннотоковата съставяща на изходния демодулиран сигнал има по-големи стойности;

- зависимостта при последователната схема притежава по-голяма линейност и значително по-малки граници на изменение на постояннотоковата съставяща на изходния демодулиран сигнал, които са от порядъка на 3 mV;

- нелинейната зависимост при паралелната схема може да се раздели на два участъка, като при  $m > 0,6$  се получава значително по-голямо изменение на  $U_{\Sigma}$ . Нейният динамичен обхват на изменение е значително по-голям и е от порядъка на 6, докато този при последователната схема има 2 пъти по-малка стойност.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата публикация представя същността и принципът на работа на диодните аналогови амплитудни демодулатори – последователен и паралелен, а също така и симулационно получени резултати, с помощта на които е онагледен видът на изходния и входния сигнал и са представени графичните зависимости на измерената постояннотокова съставяща на изхода във функция от индекса на подадения входен амплитудномодулиран сигнал. С възможностите на съвременните продукти за симулационно изследване на принципни електрически схеми би могло да бъдат получени резултати от извършени и други анализи като: Fourier, с помощта на който да се определи коефициентът на общо хармонично разложение и коефициентът на нелинейни изкривявания, параметрични анализи с цел установяване на влиянието на стойностите на използваните честотнозависими пасивни елементи - кондензаторите и др.

Симулационно получените резултати онагледяват работата и поясняват принципа на действие на представените диодни аналогови амплитудни демодулатори.

По аналогичен начин могат да бъдат представени и симулационно изследвани и схеми на други видове аналогови и цифрови модулатори и демодулатори.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Младенова В., Н. Пенчев. Радиоприемни устройства, Издателство „Техника“, София, 2007.
- [2] Немигенчев И., Б. Карапенов. Комуникационни преобразователни устройства, Университетско издателство „Васил Априлов“, Габрово, 2007.
- [3] Ненов Г., Наръчник по електронни схеми, том 6, Нелинейни радиоелектронни схеми, Издателство „Техника“, София, 1983.
- [4] Пецулев С., В. Сифоров. Радиоприемни устройства, Издателство „Техника“, София, 1979.
- [5] Афанасьев Г., Курсовое проектирование каскадов главного тракта приёма радиосигналов, Ульяновск, 2006.