

Група ТИМ

Слободан Ђукић

**ЈЕДНОСТАВНИ
АМПЛИТУДСКИ МОДУЛАТОР**

**РЕАЛИЗОВАН НА БАЗИ ДИФЕРЕНЦИЈАЛНОГ
ПОЈАЧАВАЧА**

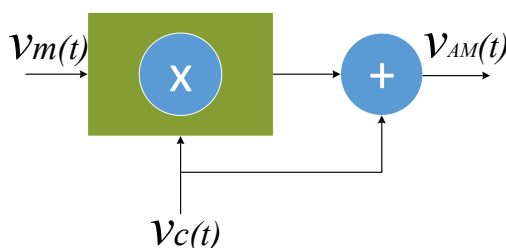
**Чачак
2022. године**

Познато је да напонско појачање диференцијалног појачавача са излазом на једном крају директно зависи од струје у мирној радној тачки (МРТ) транзистора. Ако се обезбеди да се ова струја мења у ритму модулишућег сигнала, онда би то био амплитудски модулатор. Ово се постиже тако што се на базу транзистора који је употребљен за стварање квалитетног струјног извора неопходног за рад диференцијалног појачавача, доведе модулишући сигнал. Под дејством овог сигнала мењаће се појачање диференцијалног појачавача, а то желимо да остваримо.

1. Увод

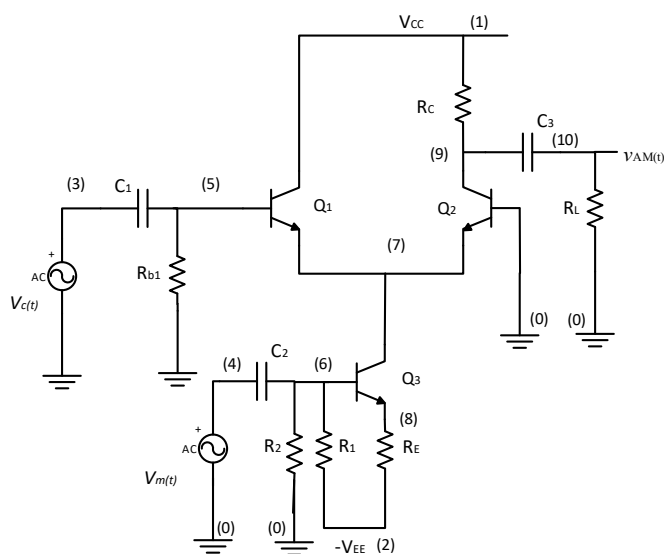
Амплитудска модулација сигнала подразумева употребу простопериодичног сигнала високе учестаности (носилац) чија се амплитуде мења у ритму сигнала ниске учестаности (модулишући сигнал) у коме је садржана информација коју желимо да пренесемо.

У принципу амплитудска модулација се изводи тако што се сигнал носиоца и модулишући сигнал доведу на множач а онда се тај производ уведе у сабирач у коме је на други улаз доведен сигнал носиоца. Најпростију амплитудску модулацију сигнала могуће је реализовати са обичном диодом чија струја има квадратну зависност од примењеног напона [1]. Наравно да у овој ситуацији, поред потребног амплитудски модулисаног сигнала, добијају се и нежељени производи множења, али се они лако уклањају обичним филтром.



2. Теоријска анализа кола

На слици 1 приказана је реализација кола за амплитудску модулацију сигнала, употребом диференцијалног појачавача са излазом на једном крају (Single Ended Output), коме је једносмерни режим обезбеђен са квалитетним извором константне струје [2] са једним транзистором.



Слика 1. Коло за амплитудску модулацију сигнала

Сви транзистори се налазе у активном режиму рада са струјом:

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \frac{1}{2} I_{CQ3}$$

Ово подразумева да за њихове динамичке улазне отпорности важи:

$$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = 2r_{\pi 3} = r_{\pi}$$

Као што се може видети са слике 1, на базу транзистора Q_1 везан је сигнал носиоца $v_c(t)$, на базу транзистора Q_3 везан је модулишући сигнал $v_m(t)$, док се излаз узима са колектора транзистора Q_2 . Модулишући сигнал мења струју струјног извора, а то значи и струју I_{CQ2} транзистора Q_2 .

Пошто је струјни извор квалитетан [2], што подразумева да му је излазна отпорност велика, па се у таквом случају диференцијално појачање појачавача са излазом на колектору транзистора Q_2 (слика 1) израчунава на основу обрасца [3, 4].

$$A_v = \frac{v_{AM}(t)}{v_c(t)} = \frac{\beta R_C \parallel R_P}{2r_{\pi}} = \frac{\beta R_C \parallel R_P}{2\beta \frac{V_T}{I_{CQ2}}} = \frac{R_C \parallel R_P I_{CQ2}}{2V_T}$$

где је r_{π} динамичка улазна отпорност транзистора Q_2 , док је V_T температурни напон транзистора и он износи:

$$V_T = \frac{kT}{q} \cong 26mV$$

где је

- k – Болцманова константа,
- T – температура у степенима Келвина, а
- q – наелектрисање електрона.

Пошто је на базу транзистора Q_3 доведен променљив сигнал $v_m(t)$, онда се укупна струја транзистора Q_3 може представити као:

$$i_{CQ3}(t) = I_{CQ3} + i_{CQ3}(t) = I_{CQ3} + \beta \frac{v_m(t)}{R_{ul3}},$$

при чему улазна отпорност струјног извора износи:

$$R_{ul3} = r_{\pi 3} + (1 + \beta)R_E$$

Ако се узме да је $v_m(t)$ простопериодичан сигнал ниске учестаности f_m и амплитуде V_m , онда је:

$$v_m(t) = V_m \sin 2\pi f_m t$$

Сада је:

$$i_{CQ3}(t) = I_{CQ3} + \beta \frac{V_m \sin 2\pi f_m t}{R_{ul3}},$$

$$i_{CQ2}(t) = \frac{1}{2} i_{CQ3}(t) = \frac{1}{2} I_{CQ3} + \frac{1}{2} \beta \frac{V_m \sin 2\pi f_m t}{R_{ul3}},$$

$$v_{AM}(t) = A_v v_c(t) = \frac{R_C \parallel R_P}{2V_T} i_{CQ2}(t) v_c(t),$$

$$v_{AM}(t) = \frac{R_C \parallel R_P}{2V_T \left[\frac{1}{2} I_{CQ3} + \frac{1}{2} \beta \frac{V_m \sin 2\pi f_m t}{R_{ul3}} \right]} v_c(t),$$

$$v_{AM}(t) = \frac{(R_C \parallel R_P) I_{CQ3}}{2V_T} V_C \sin 2\pi f_c t + \frac{\beta (R_C \parallel R_P) V_m \sin 2\pi f_m t}{4V_T R_{ul3}} V_C \sin 2\pi f_c t.$$

Ако је $r_{\pi 3} \ll (1 + \beta)R_E$ и $\beta \gg 1$, онда је $R_{ul3} \approx \beta R_E$, па је:

$$v_{AM}(t) = \frac{(R_C \parallel R_P) I_{CQ3}}{4V_T} V_C \sin 2\pi f_c t + \frac{(R_C \parallel R_P) V_m \sin 2\pi f_m t}{4V_T R_E} V_C \sin 2\pi f_c t$$

Када нема модулишућег сигнала, појачање је константно и оно износи:

$$A_v = \frac{(R_C \parallel R_P)}{4V_T} I_{CQ3}.$$

Када постоји модулишући сигнал, појачање диференцијалног појачавача се мења у границама:

$$A_{v_{\max}} = \frac{(R_C \parallel R_P)}{4V_T} \left(I_{CQ3} + \frac{V_m}{R_E} \right),$$

$$A_{v_{\min}} = \frac{(R_C \parallel R_P)}{4V_T} \left(I_{CQ3} - \frac{V_m}{R_E} \right),$$

3. Провера теоријске анализе кола

Већ је на почетку речено да су сви транзистори у активном режиму, а одлучили смо да једносмерне струје транзистора износе:

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = 1\text{mA}, I_{CQ3} = 2\text{mA},$$

Учестаност носећег сигнала износи $f_c = 20$ kHz, док је учестаност модулишућег сигнала $f_m = 1$ kHz. За амплитуду носећег усигнала узећемо вредност $V_C = 30$ mV. Остале компоненте имају вредности:

$$R_{b1} = 1\text{k}\Omega, R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega, R_E = 2.5\text{k}\Omega, R_C = 0.8\text{k}\Omega, R_P = 1\text{k}\Omega,$$

NPN транзистори имају струјно појачање $\beta = 200$.

Појачање диференцијалног појачавача на једном излазу дато је са [2]:

$$A_{VM} = \left| \frac{(R_C \parallel R_P)}{4V_T} I_{CQ3} \right| = 8,$$

па амплитуда сигнала на излазу износи:

$$V_{AM} = A_{VM} \cdot V_C = 240 \text{ mV}.$$

Познато је да код амплитудске модулације сигнал на излазу може да има максималну амплитуду

$$V_{AM\max} = 2V_{AM} = 480 \text{ mV},$$

па из израза за највеће појачање може да се изрази највећа вредност за појачање као:

$$A_{AM\max} = 480 \text{ mV} / 30 \text{ mV} = 16.$$

Највећа вредност за амплитуду модулишућег сигнала V_m се одређује из израза:

$$A_{v_{\max}} = \frac{(R_C \parallel R_P)}{4V_T} \left(I_{CQ3} + \frac{V_m}{R_E} \right),$$

одакле је

$$V_{m\max} = 5 \text{ V},$$

Резултати теоријске анализе приказани су у табели 1.

Табела 1: Амплитудски модулатор сигнала – теоријска анализа

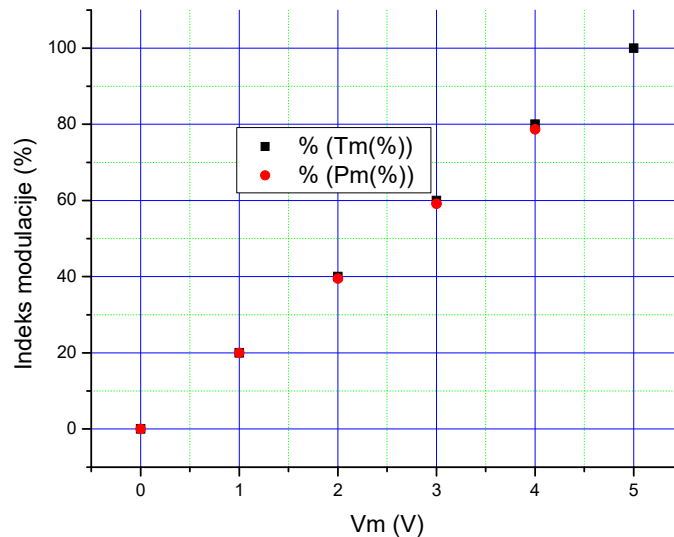
V_m (V)	0	1	2	3	4	5
$V_{AM\max}$	240	288	336	384	432	480
$A_{VM\max}$	8	9.6	11.2	12.8	14.4	16
$V_{AM\min}$	240	192	144	96	48	0
$A_{VM\min}$	8	6.4	4.8	3.2	1.6	0
m (%)	0	20	40	60	80	100

Индекс модулације се рачуна по обрасцу:

$$m = \frac{V_{AM_{\max}} - V_{AM}}{V_{AM}}$$

Као пример, из Табеле 1, у случају када је $V_m = 2 \text{ V}$ индекс модулације износи:

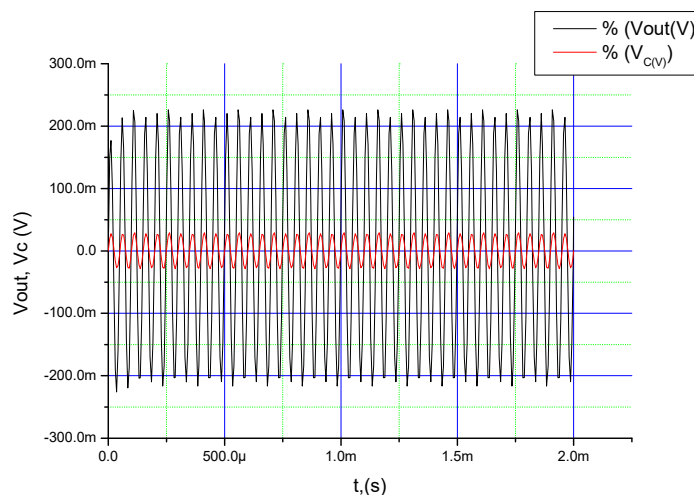
$$m = \frac{V_{AM_{\max}} - V_{AM}}{V_{AM}} = \frac{336 - 240}{240} = \frac{96}{240} = 0.4(40\%)$$



Слика 2. Временски дијаграм сигнала на излазу диференцијалног појачавача када он ради без модулирајућег сигнала

4. PSPICE analiza

Ако се у колу са слике 1 уклони модулирајући сигнал, и остане само сигнал $v_C(t) = V_C \sin 2\pi f_C t$, где је $V_C = 30 \text{ mV}$, а $f_C = 20 \text{ kHz}$, на излазу се добија сигнал $v_{AM} = V_{AM} \sin 2\pi f_C t$, где је $V_{AM} = 225 \text{ mV}$, добија се изглед сигнала као на слици 3.

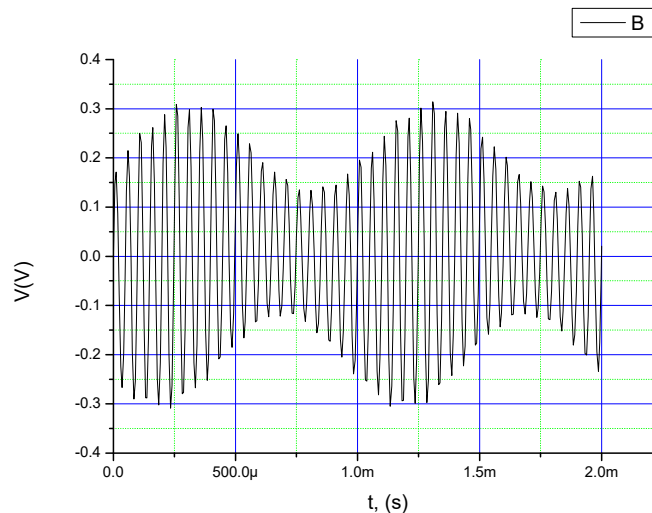


Слика 3. Временски дијаграм сигнала на излазу диференцијалног појачавача када он ради без модулирајућег сигнала

На основу дијаграма са слике 3, види се да амплитуда сигнала на излазу износи 225 mV па у том случају појачање износи:

$$A_{VM} = \frac{V_{AM}}{V_C} = \frac{225mV}{30mV} = 7.5$$

Када се укључи модулишући сигнал $v_m(t) = V_m \sin 2\pi f_m t$, где је $V_m = 2V$, а $f_m = 1kHz$, онда се на излазу диференцијалног појачавача добија сигнал приказан на слици 4, где се види како се мења појачање кола у ритму модулишућег сигнала.



Slika 4. Дијаграм AM сигнала за случај када је $V_m = 2V$, $v_{AM}(t)$ за случај $m = 0.395(39,5\%)$, PSPICE анализа

Са дијаграма може се видети да је $V_{AM_{max}} = 314mV$, где је $V_C = 30mV$ па је максимално појачање

$$A_{v_{max}} = \frac{V_{AM_{max}}}{V_C} = \frac{314_{mV}}{30_{mV}} = 10.5.$$

$$A_{v_{max}} = 10.5,$$

Такође, се са дијаграма може узети да је $V_{AM_{min}} = 138mV$, па се за минимално појачање у овом случају добија:

$$A_{v_{min}} = 4.6.$$

Индекс модулације износи:

$$m = \frac{V_{AM_{max}} - V_{AM}}{V_C} = \frac{314 - 225}{225} = \frac{89}{225} = 0.395(39.5\%)$$

Овај дијаграм за $v_{AM}(t)$ приказан је на слици 4 за случај $m = 0.395(39.5\%)$.

За промену $v_m(t)$ и опсегу од 0 V – 5 V, комплетни подаци PSPICE анализе дати су у Табели 2.

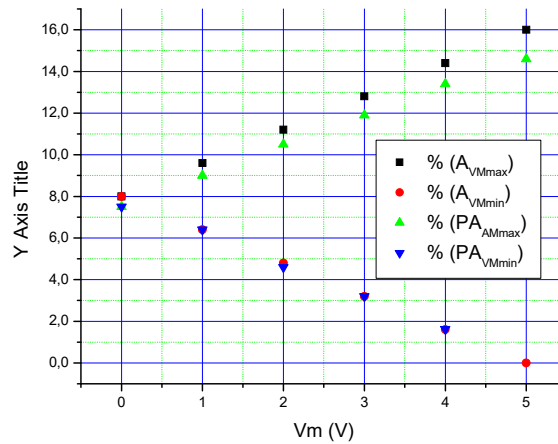
Tabela 2: Amplitudski modulator signala – PSPICE analiza

V_m (V)	0	1	2	3	4	5
$V_{AM_{max}}$	225	270	314	358	402	438
$A_{VM_{max}}$	7.5	9	10.5	11.9	13.4	14.6
$V_{AM_{min}}$	225	182	138	95	49	20
$A_{VM_{min}}$	7.5	6	4.6	3.17	1.63	0.67
m (%)	0	20	39.55	59.11	78.67	94.67

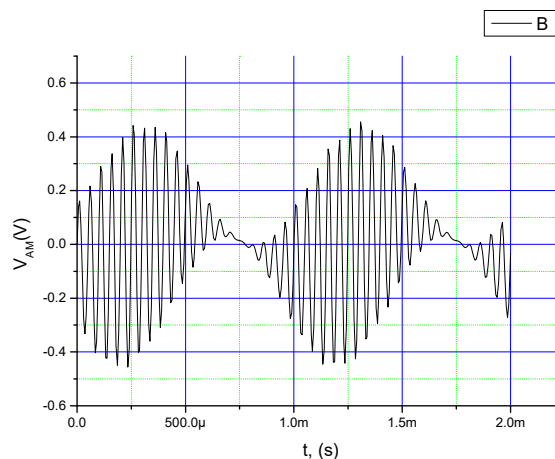
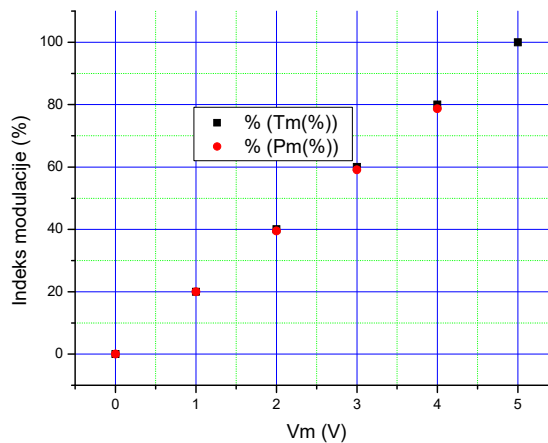
Из Табеле 2 види се да за $V_m = 5 V$ индекс модулације износи:

$$m = \frac{V_{AM_{max}} - V_{AM}}{V_C} = \frac{438 - 225}{225} = \frac{213}{225} = 0.9467(94.67\%).$$

Индекс модулације је мањи него што би теоријски требало да буде. Разлог за ово одступање лежи у чињеници да при померању МРТ транзистора у координатном систему у близини координатног почетка, модел транзистора за мале сигнале постаје непрецизан.



Слика 5. Појачање АМ модулатора: A_V теорија, PA_V PSPICE анализа



Слика 6: Дијаграм $v_m(t)$ за случај $m = 0.95(95\%)$, PSPICE анализа

5. Закључак

На основу изведене анализе (теоријске и уз помоћ софтверског пакета PSPICE), може се закључити да диференцијални појачавач може да буде и коло за амплитудску

модулацију сигнала, ако се употреби на начин како је то у раду предложено. Предност овог решења су његова једноставност и ниска цена коштања реализације. озбиљан недостатак је то што се индекс модулације мења променом амплитуде модулишућег сигнала, што се у пракси не ради. У пракси имамо задати модулишући сигнал, па његову промену морамо да изводимо преко додатног напонског појачавача са подесивим појачањем, а то подиже његову цену.

6. Литература

- [1] Louis E. Frenzel, „*Principles of Electronic Communication Systems*“, Mc Grow Hill, second edition, 2003.
- [2] D. M. Vasiljević, M. Hribšek, M. Ilić „*Linearna elektronika, zbirka rešenih zadataka*“, Naučna knjiga, Beograd, 1992
- [3] Slobodan Đukić, „*Linearna elektronika*“, Tehnički fakultet Čačak, 2006.
- [4] Allen R. Hambley, „*Electronics – a top-down approach to computer-aided circuit design*“, Prentice Hall, Englewood, New Jersey, 1994 year
- [5] “*Pspice circuit analysis*”, MicroSim Corporation Irvine, California U.S.A version 4.05, 1991.