

Simulation studies of low-frequency power amplifier class D with operational amplifiers and transistors

Boyan Karapenev

Симулационни изследвания на нискочестотен усилвател на мощност клас D с операционни усилватели и транзистори

Боян Карапенев

Abstract: *This paper presents simulation studies of low-frequency power amplifier class D with operational amplifiers and transistors. Their features have been presented and a selected circuit is described. The obtained results have been presented using MultiSIM software – oscillograms in specific nodes of the circuit, amplitude-frequency and phase-frequency responses and their parameters, and results of carried out Fourier and parameter sweep analyses. Simulation results could be used in carrying out the optimization of its characteristics and qualitative parameters, as well as present and expected practical results.*

Key words: *Low-frequency Power Amplifier class D, Simulation Studies, Qualitative Parameters.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на електрониката е неразривно свързано с използването на усилвателна техника във всичките ѝ честотни и мощностни обхвати. Това налага увеличаване на полезната изходна мощност и повишаване на КПД. Нискочестотните усилватели на мощност (НЧУМ) клас D притежават малки разсейвана мощност и топлоотделяне, малки размери и цена, минимална консумация в режим на празен ход. Основното предимство на усилвателите клас D е високият КПД, който може да достигне $90 \div 98 \%$.

НЧУМ клас D съществуват повече от няколко десетилетия като понастоящем те се използват основно при ниски честоти и големи мощности, т.е. за управление на суббуфери, и по-рядко за усиление на средни и високи честоти от звуковия обхват поради съществуващите значителни изкривявания, свързани с несъвършенството на използваната превключваща технология. Те се използват още и като нискочестотни усилватели в съвременните телевизионни приемници, в аудио- и системите за домашно кино, GSM комуникациите, и др.

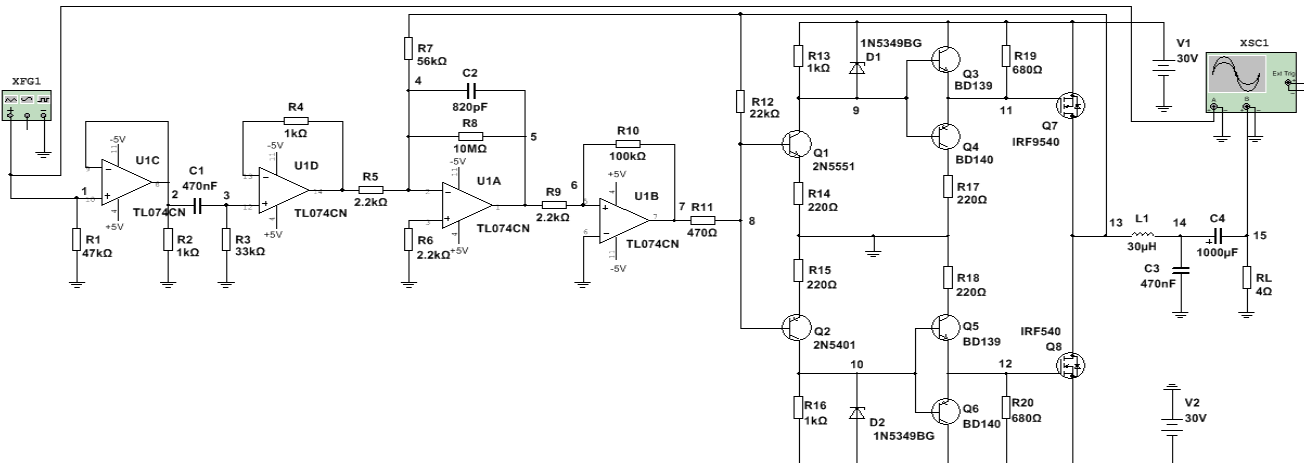
ИЗЛОЖЕНИЕ

Усилвателите клас D работят в ключов режим с две състояния на активния елемент: отпушено, когато протича максимален ток през нищожно малкото съпротивление на наситения краен транзистор за много кратък интервал от време с минимални загуби, и запушено - когато токът е приблизително нула, а напрежителният пад е почти равен на захранващото напрежение без загуби върху транзистора. Основните загуби върху активния елемент се получават главно за времето на формиране на импулсите, т.е. при превключване от едното в другото състояние. Ако продължителността на фронтите се сведат до нула, КПД ще се доближи до 100 %. Такъв е случаят, когато активният електронен елемент се замени с идеален ключ. На практика такъв идеализиран режим не е достижим поради наличието: на минимално напрежение върху наситените транзистори U_{CEsat} при напълно отпушено състояние, на обратен ток при запушено състояние и невъзможност времето за превключване да бъде безкрайно малко. Това време е от порядъка от една (или по-малко) до десетки микросекунди. За да бъде възможно използването на най-ефективния начин на работа на транзисторите, ключовият, е необходимо да се използва определен вид модулация. От възможните начини за модулиране при този режим на работа на устройствата най-удобна е широчинно-

импулсната модулация (ШИМ), при която продължителността на импулсите се изменя в зависимост от амплитудата на входния модулиращ сигнал.

1. Принципна схема на НЧУМ клас D с операционни усилватели и транзистори

На фиг. 1 е представена принципна схема на НЧУМ клас D с операционни усилватели (ОУ) и транзистори [1]. Тя съдържа четири предварителни стъпала с ОУ, две драйверни стъпала, изградени с двукратно свързани биполярни транзистори (БТ), крайни MOSFET транзистори, предназначени за работа в режим клас D и опростена конфигурация на използвания изходен НЧ (LC) филтър. Схемата е подходяща за симулационно изследване и практическа реализация като получените резултати онагледяват принципа ѝ на работа.



Фиг. 1. Принципна схема на НЧУМ клас D с ОУ и транзистори

Входното стъпало е реализирано с неинвертиращ повторител на напрежение с ОУ1 (U1C) като коефициентът на усилване е $A_{UF} \approx 1$. Вторият ОУ2 (U1D) е свързан също като неинвертиращ усилвател с $A_{UF}=1+R_4/R_3$, а кондензаторът C_1 е разделителен между двете входни стъпала. Тези две входни стъпала изпълняват функцията на буферни усилватели.

ОУ3 (U1A) има сложна функция като извършва „сумиране“ на инвертиращия му вход (суматор-интегратор) на входния сигнал с изходните ШИМ сигнали, формирани на изхода на крайното стъпало (възел 13) през ООВ R_7 , в резултат на което изходното напрежение е с триъгълнообразна форма. Неговият коефициент на усилване по напрежение се определя от отношението на стойностите на R_8 и R_5 , а кондензаторът C_2 осигурява и честотна корекция на ОУ. ОУ4 (U1B) е неинвертиращ компаратор на напрежение с ПОВ (наситен усилвател), реализирана с резистора R_{10} , свързан между неговия изход и неинвертиращ вход. Двете стъпала, съдържащи ОУ3 и ОУ4, осъществяват реализирането на ШИМ и заедно формират ШИМ-контролер.

Крайните MOSFET транзистори Q_7 и Q_8 , свързани по схеми OD, съответно от P и N тип, образуват полумостова схема.

Изходният нискочестотен филтър е реализиран с елементите $L_1 - C_3$.

Чрез резисторите R_7 и R_{12} , изпълняващи функциите на междустъпални паралелни ООВ по напрежение, изходното усилено модулирано напрежение с ШИМ се подава съответно на инвертиращия вход на ОУ3 и на базите на драйверните транзистори Q_1 и Q_2 .

При наличие на входен (модулиращ) сигнал, формираните широчинно-модулирани импулси на изхода на ОУ4 (U1B) отпушват последователно транзисторите Q_1 - Q_2 , Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6 , и тъй като потенциалите U_{GS} на крайните MOSFET Q_7 и Q_8 се увеличават, последните също се отпушват.

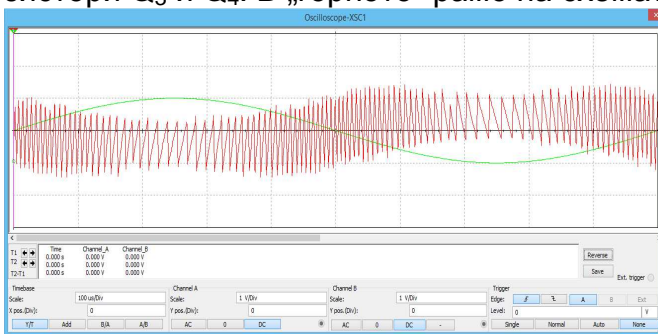
2. Симуляционни изследвания на НЧУМ клас D с ОУ и транзистори

Принципната схема на НЧУМ клас D с ОУ и транзистори от фиг. 1 е въведена в работната среда на модула MultiSIM на продукта Circuit Design Suite, за която са извършени симуляционни изследвания. Зададените параметри на входния синусоиден сигнал чрез използвания функционален генератор са: честота 1 kHz, амплитуда $1 V_p$ и отместване на постояннотоковото ниво - 0 V.

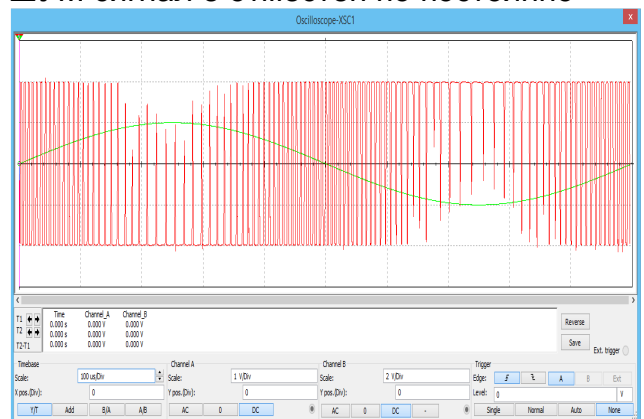
На фиг. 2 е илюстрирано как ОУЗ извършва „сумиране“ на инвертиращия му вход (суматор-интегратор) на входния сигнал с изходните ШИМ сигнали, формирани на изхода на крайното стъпало (възел 13) през ООВ R_7 , в резултат на което изходното напрежение е с триъгълнообразна форма и следва изменението на входния непрекъснат сигнал.

На фиг. 3 е дадена осцилограмата на сигнала, постъпващ на базите на транзисторите Q_1 и Q_2 , които имат функцията да формират амплитудата на ШИМ високочестотен сигнал. Тъй като R_{12} връща част от изходния усилен ШИМ сигнал, сигналът е леко усилен спрямо този от възел 7. В областта на преминаване на входния сигнал през нулевото ниво импулсите на изхода на ОУ4 са с коефициент на запълване около 50 % с постоянна амплитуда. При максимална стойност на входния сигнал се установява наличието на минимална широчина на импулсите и намаляване на амплитудата, а при минимална - обратното. На осцилограмата на изходния сигнал на фиг. 3 се забелязва наличието на отскок на предния и задния фронт на импулсите.

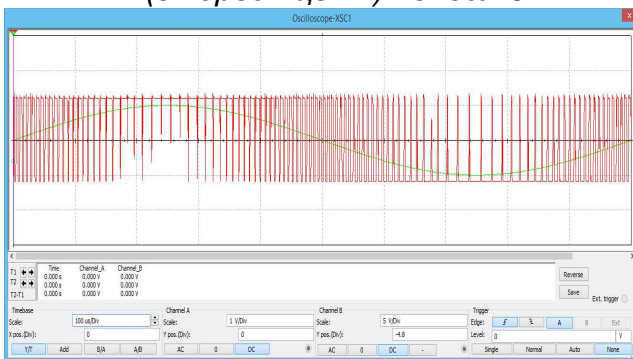
На фиг. 4, сигналът е вече усилен и постъпва на базите на драйверните транзистори Q_3 и Q_4 . В „горното“ рамо на схемата ШУМ сигнал е отместен по постоянно-



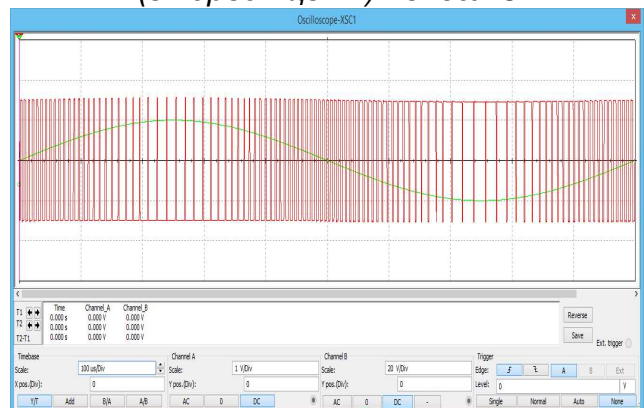
Фиг. 2. Входен сигнал (в зелен цвят) и сигнал на изхода на ОУЗ (в червен цвят) - възел 5



Фиг. 3. Входен сигнал (в зелен цвят) и сигнал на базите на Q_1 и Q_2 (в червен цвят) - възел 8



Фиг. 4. Входен сигнал (в зелен цвят) и сигнал на базите на Q_3 и Q_4 (в червен цвят) - възел 9



Фиг. 5. Входен сигнал (в зелен цвят) и сигнал на дрейновете на Q_7 и Q_8 (в червен цвят) - възел 13

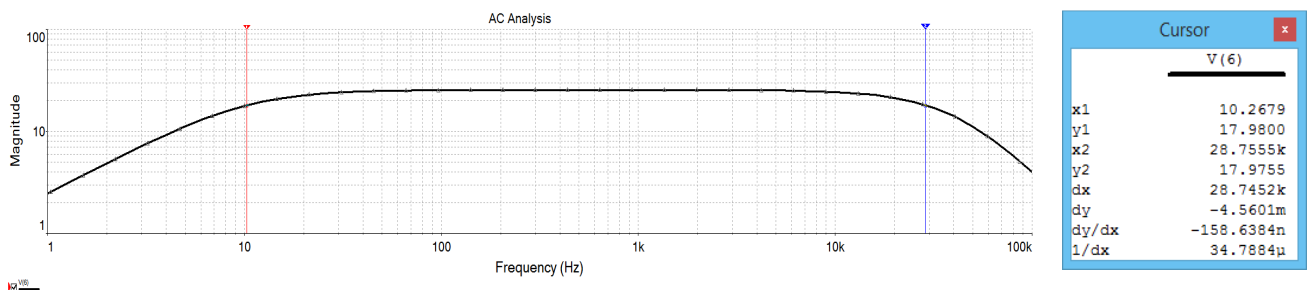
токово ниво (възел 9), което на осцилограмата е с изместване $Y \text{ pos.}(\text{div}): -4,8$. За разлика от осцилограмите във възел 7 и фиг. 3, правоъгълните импулси са с еднаква амплитуда за отрицателната част на входния синусоидален сигнал.

На фиг. 5 е дадена осцилограмата на усиления сигнал на дрейновете на крайните MOSFET транзистори Q_7 и Q_8 . Това е ШИМ сигнал, обединяващ импулсите на крайните MOSFET транзистори, където сигналите са с постоянна амплитуда и компенсирани от двете рамена изкривявания на отскока на предния и задния фронт на импулсите.

Изходният сигнал на НЧУМ с ОУ и транзистори е с ниска честота като съдържа ВЧ съставлящи, наподобяващи ВЧ носещо трептение и с форма на сигнала, близка до синусоидалната, и е дефазирани на 180° спрямо входния непрекъснат сигнал.

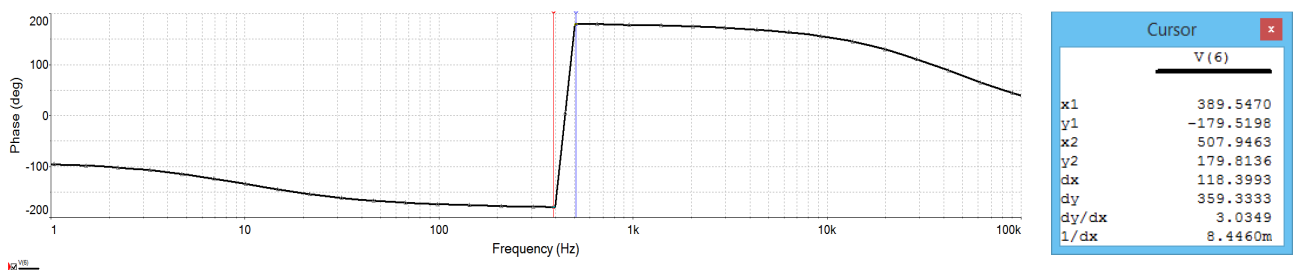
От извършения постояннотоков анализ (DC Operating Point) на НЧУМ клас D се установява, че постояннотоковите потенциали в отделните възли имат стойности от порядъка на десетки μV и тъй като ОУ4 и транзисторите $Q_1 \div Q_8$ работят в ключов режим, липсват потенциали за установяването на схемата в постояннотоков режим.

На фиг. 6 и фиг. 7 са представени получените резултати от извършения променливочестотен анализ (AC Frequency) за НЧУМ – съответно АЧХ и ФЧХ.



Фиг. 6. АЧХ на НЧУМ клас D с ОУ и транзистори

От фиг. 6 се определят параметрите на НЧУМ: долна $f_b = 10 \text{ Hz}$, горна $f_h = 28,75 \text{ kHz}$ гранични честоти и пропускана честотна лента $\Delta f = f_h - f_b = 28,74 \text{ kHz}$.



Фиг. 7. ФЧХ на НЧУМ клас D с ОУ и транзистори

На показаната ФЧХ (фиг. 7) се наблюдава преход с дефазирание от -180° на $+180^\circ$, т.е. на 360° на изходния сигнал за честоти между 389 и 507 Hz. Това би могло да удовлетвори условието за баланс на фазовите ъгли и схемата на НЧУМ клас D да се превърне в генератор на трептения.

На фиг. 8 са представени резултатите от извършения Fourier Analysis, където в табличен вид са представени постояннотоковата съставляща, броят на хармониците, пълният коефициент на хармонични изкривявания (THD) както и реалната и имагинерната част на отделните хармоници и техните нормирани стойности.

Fourier Analysis

1	Fourier analysis for V(6):				
2	DC component:	0.249727			
3	No. Harmonics:	9			
4	THD:	0.615826 %			
5	Grid size:	256			
6	Interpolation Degree:	1			
7					
8	Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag
9	1	1000	25.4254	177.54	1
10	2	2000	0.0194284	159.788	0.000764135
11	3	3000	0.0898278	56.5093	0.003533
12	4	4000	0.0377477	175.691	0.00148465
13	5	5000	0.0549667	-76.054	0.00216188
14	6	6000	0.0402929	-62.62	0.00158475
15	7	7000	0.0711598	-174.15	0.00279877
16	8	8000	0.066207	-70.83	0.00260397
17	9	9000	0.0235104	-10.12	0.000924682

Фиг. 8. Резултати от извършения анализ на Фурие

С така получените стойности на амплитудите на отделните хармонични съставлящи от спектъра на изходния сигнал на НЧУМ клас D (фиг. 8, Magnitude) се определя коефициентът на нелинейни изкривявания, за чиято стойност се получава

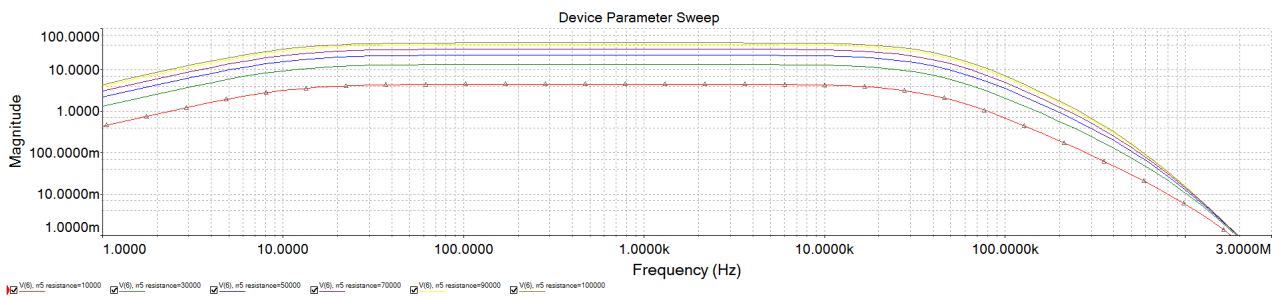
$$k = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + U_6^2 + U_7^2 + U_8^2 + U_9^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{0,02419}}{25,4} = 0,006123 \cdot 100 = 0,6123 \% .$$

Получената стойност на $k=0,6123\%$ е малка, тъй като амплитудата на първата хармонична съставляща е значително по-голяма от тези на останалите, което определя, че НЧУМ клас D от фиг. 1 е качествен - Hi-Fi.

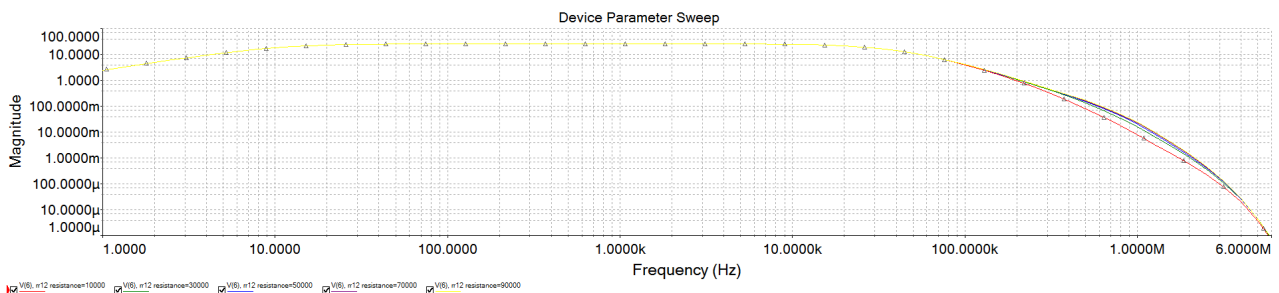
Относителната разлика между стойността на k и параметъра THD (фиг. 8) е

$$\varepsilon = \frac{k - THD}{THD} = \frac{0,6123 - 0,6158}{0,6158} = -0,00568 \% .$$

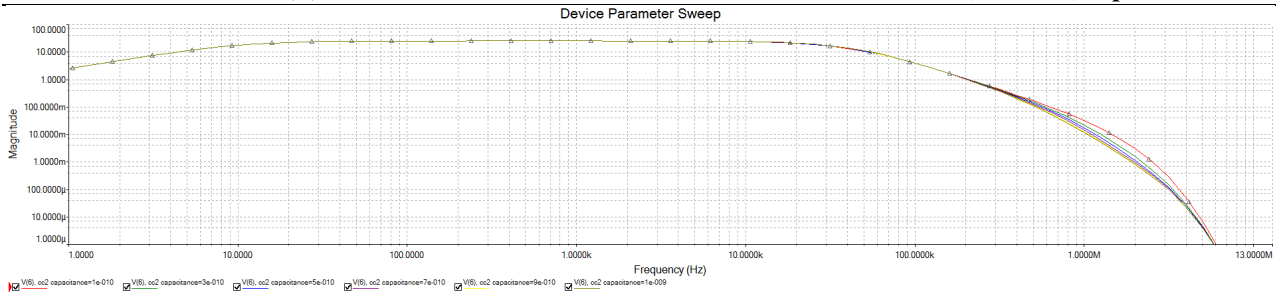
С помощта на Parameter Sweep Analysis на фиг. 9 ÷ фиг. 11 е представено влиянието съответно на стойностите на елементите R_7 , R_{12} (от ООВ) и C_2 (въвеждащ нискофреотна корекция на ОУЗ) върху АЧХ на НЧУМ клас D с ОУ и транзистори.



Фиг. 9. Параметричен анализ спрямо стойността на R_7



Фиг. 10. Параметричен анализ спрямо стойността на R_{12}



Фиг. 11. Параметричен анализ спрямо стойността на C_2

От фиг. 9 се установява, че стойността на резистора R_7 от ООВ променя коефициента на усилване (амплитудата на изходния сигнал), наклона на спад на АЧХ и стойностите на f_b , f_h и Δf . За някои от зададените стойности на резистора R_7 реализираните параметри на НЧУМ клас D от фиг. 1 са представени в таблица 2.

Таблица 2. Реализирани параметри на НЧУМ клас D при различни стойности на резистора R_7 от ООВ

Стойност на R_7 , k Ω	U_0 , V	A_u	f_b , Hz	f_h , kHz	Δf , kHz
10	4,54	12	10,3	27,3	27,3
30	13,6	38	10	28	28
50	22,7	64	10	28,5	28,5
100	45,4	128	10	32	32

След графично построяване на зависимостите A_u , f_b , f_h и Δf във функция на стойността на резистора R_7 от ООВ на НЧУМ клас D се установява, че:

- зависимостта на коефициента на усилване A_u от стойността на R_7 е линейна;
- по-малките стойности на R_7 изменят незначително стойността на f_b , а по-големите не оказват влияние;
- зависимостите на f_h и Δf са почти линейни, които съвпадат, тъй като f_h определя пропусканата честотна лента.

Промяната на стойностите на резистора R_{12} и кондензатора C_2 оказват влияние върху АЧХ на НЧУМ клас D само във високочестотната област, за честоти над 200 kHz, извън пропусканата честотна лента. Установява се, че тяхното влияние е „противопосочно”, т.е. увеличаването на стойността на R_{12} разширява спада на АЧХ при ВЧ, а увеличаването на стойността на C_2 го стеснява.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената схемотехника и получените симулационни резултати обясняват принципа на действие и онагледяват работата на НЧУМ клас D от фиг. 1, изпълнен с широко разпространени и с голямо приложение в практиката дискретни елементи с малка себестойност - ОУ и транзистори. Те биха могли да бъдат използвани при извършването на оптимизация на неговите качествени показатели – параметри и характеристики, а също така представят и очаквани практически резултати.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Class D 200 Wrms with 2 mosfet, <http://www.diysmps.com/forums/showthread.php?237-Class-D-200-Wrms-with-2-mosfet-cheap>

За контакти:

доц. д-р Боян Карапенев, Катедра „Комуникационна техника и технологии”, Технически университет - Габрово, тел.: 066/827-415, e-mail: bkarapenev@tugab.bg