

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

Boyan Karapenev, Alexandar Tsekov

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

Боян Карапенов, Александър Цеков

Abstract: This paper presents experimental studies of implemented low-frequency power amplifier class D with operational amplifiers and transistors. The obtained results have been presented - DC operating point, amplitude performances, amplitude-frequency responses and their parameters and also oscillograms in specific nodes of the circuit. Although they appear in the 60s of XX century they are currently being developed and perfected with great pace. From the obtained experimental studies, information can be gathered on the causes for the disadvantages accompanying low-frequency power amplifiers class D, how the technology used can be improved, thus reduced to minimum.

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

ВЪВЕДЕНИЕ

Интересът към нискочестотните усилватели на мощност (НЧУМ) клас D възниква след разработването на първите импулсни захранващи източници. Те са наречени още „цифрови”, тъй като крайните транзистори работят в ключов режим, формирайки правоъгълни импулси. Изходният сигнал постъпва в товара (говорителя) през нискочестотен филтър. КПД при тях може да достигне $90 \div 98 \%$.

Усилвателите клас D съществуват повече от 2-3 десетилетия като понастоящем се използват основно при ниски честоти и големи мощности. Въпреки тяхното голямо и бурно развитие те се характеризират и с недостатъци, свързани с несъвършенството на използваната превключваща технология [1]. Затова и понастоящем те са обект на задълбочени теоретични, симулационни и експериментални изследвания с цел тяхното оптимизиране и усъвършенстване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Принципна схема на нискочестотен усилвател на мощност клас D с операционни усилватели и транзистори

На фиг. 1 е представена избрана от литературата принципна схема на нискочестотен усилвател на мощност (НЧУМ) клас D [2] за практическа реализация и експериментално изследване. Тя съдържа четири предварителни стъпала с операционни усилватели (ОУ), две драйверни стъпала, изградени с двутактно свързани БТ, крайни MOSFET транзистори, предназначени за работа в режим клас D и опростена конфигурация на използвания изходен нискочестотен LC филтър.

2. Експериментални изследвания на реализиран нискочестотен усилвател на мощност клас D с операционни усилватели и транзистори

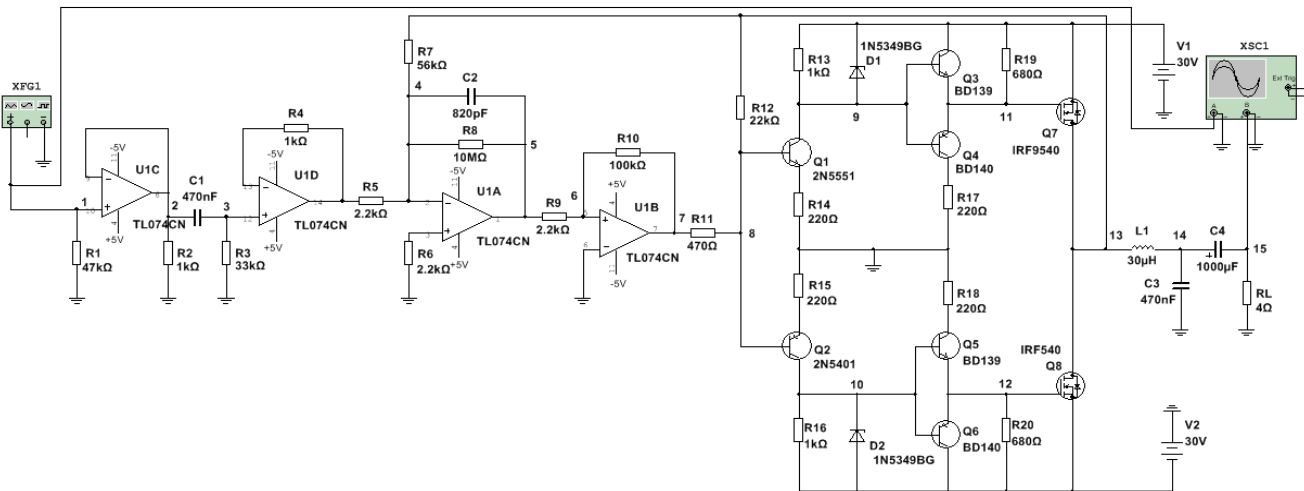
Принципната схема на НЧУМ клас D с операционни усилватели и транзистори от фиг. 1 е практически реализирана и експериментално изследвана.

В таблица 1 са представени постоянните напрежения, различни от 0 V, измерени в посочените контролни възли от схемата на НЧУМ клас D - фиг. 1 при подадено захранващо напрежение $\pm U_{CC} = 30 \text{ V}$ и без подаден входен сигнал.

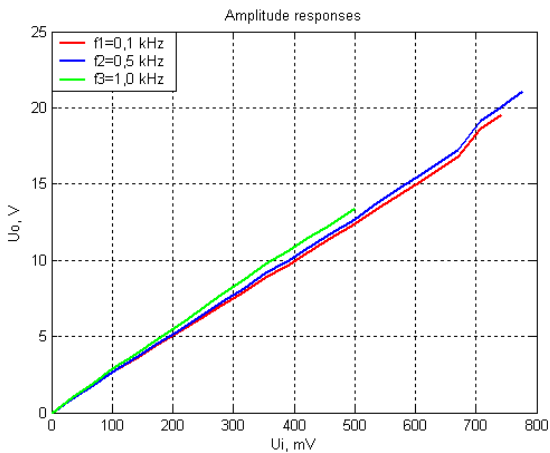
Таблица 1. Постоянни напрежения в съответните възли на НЧУМ клас D

Възел №	5	6	7	8	9	10	11	12	15
U, V	-0,1	-0,1	0,74	0,72	25,6	-25,8	25,8	-26	-0,069

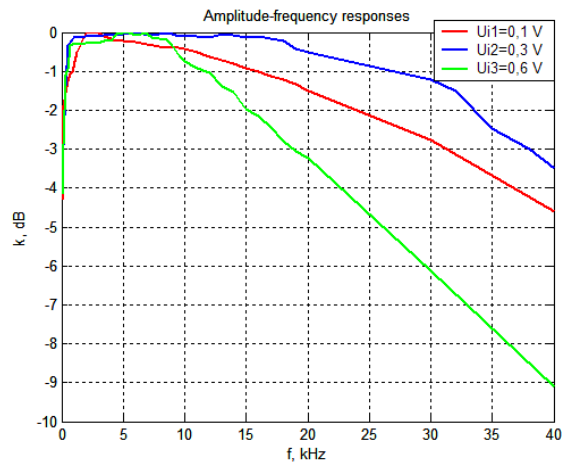
Получените амплитудни (АХ) и амплитудночестотни (АЧХ) характеристики на НЧУМ клас D са представени съответно на фиг. 2 и фиг. 3, а определените му параметри от тях – съответно в таблица 2 и таблица 3.



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



Фиг. 2. АХ на НЧУМ клас D



Фиг. 3. АЧХ на НЧУМ клас D

От фиг. 2 се вижда, че реализираният НЧУМ клас D усилва относително по един и същ начин и при трите работни честоти от направените експериментални изследвания - $f_1 = 0,1$ kHz, $f_2 = 0,5$ kHz и $f_3 = 1$ kHz, но най-линейна е зависимостта при средните честоти (1 kHz), където динамичният обхват D приема най-малка стойност.

Таблица 2. Параметри на НЧУМ клас D, определени от АХ

Параметър	$f_1 = 0,1$ kHz	$f_2 = 0,5$ kHz	$f_3 = 1$ kHz
A_U	26,3	27,1	26,8
u_{imax}, V	0,68	0,68	0,5
u_{imin}, V	0,035	0,035	0,035
D	19,4	19,4	14,2

Максималното входно напрежение $u_{i\max}$, което НЧУМ клас D може да усилва без изкривявания, е еднакво за по-ниските и средните честоти, а за по-високите - стойността му малко намалява. Прагът на чувствителност на схемата е един и същ за изследваните работни честоти и е от порядъка на 35 mV.

От фиг. 3 се установява, че НЧУМ клас D има стръмни склонове на АЧХ при ниски честоти. Коефициентът на усилване за средните честоти в лентата на пропускане се характеризира с пулсации. Най-широка честотна лента е реализирана при амплитуда на входния сигнал $u_{i2} = 0,3$ V. В този случай пропусканата честотна лента е най-широка като $\Delta f \approx 38$ kHz.

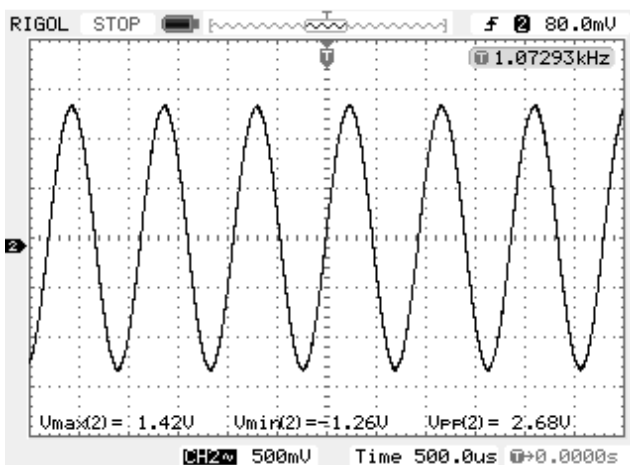
От представените параметри на АЧХ на НЧУМ клас D в таблица 3 се установява, че долната гранична честота f_b има една и съща стойност 20 Hz, стойността на f_h се променя в зависимост от амплитудата на входния сигнал, като тя приема най-голяма стойност при средна амплитуда на входния сигнал. За $u_{i3} = 0,6$ V пропусканата честотна лента е най-тясна и е от порядъка на 19 kHz. От получените стойности за Δf (таблица 3) се установява, че реализираният НЧУМ клас D е Hi-Fi.

Таблица 3. Параметри на НЧУМ клас D, определени от АЧХ

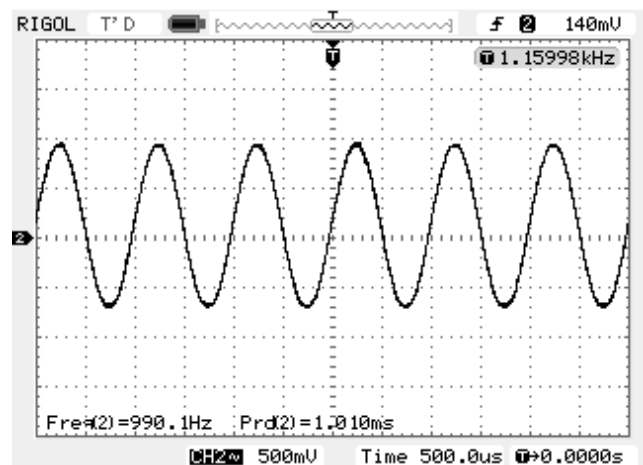
Параметър	$u_{i1} = 0,1$ V	$u_{i2} = 0,3$ V	$u_{i3} = 0,6$ V
f_b , Hz	20	20	20
f_h , kHz	32	38	19
Δf , kHz	≈ 32	≈ 38	≈ 19

На фигури 4 ÷ 13 са показани времедиаграмите, получени с помощта на цифров осцилоскоп в посочените контролни възли на схемата на НЧУМ клас D (фиг. 1), а формата на сигналите преди и след НЧФ е показана на времедиаграмите съответно на фиг. 14 (възел 13) и 15 (възел 15).

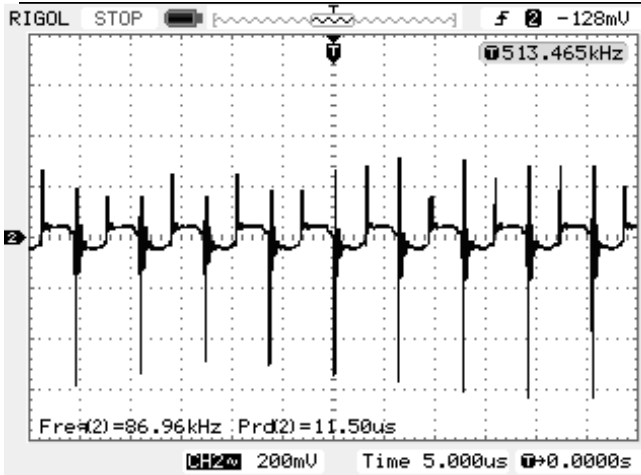
Осцилограмите са заснети при честота на входния сигнал $f = 1$ kHz.



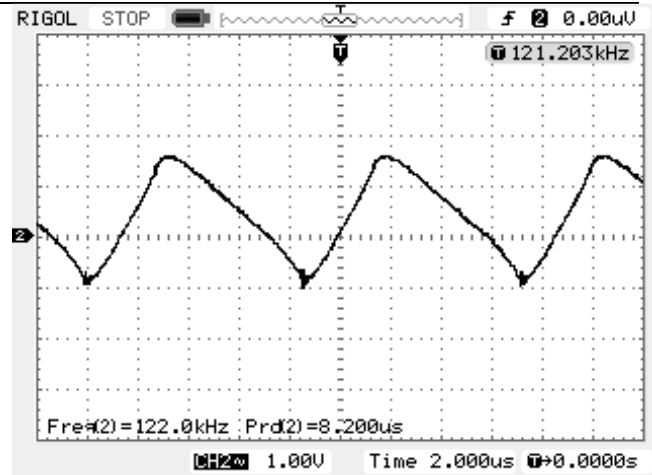
Фиг. 4. Времедиаграма на сигнала от задаващия генератор - възел 1



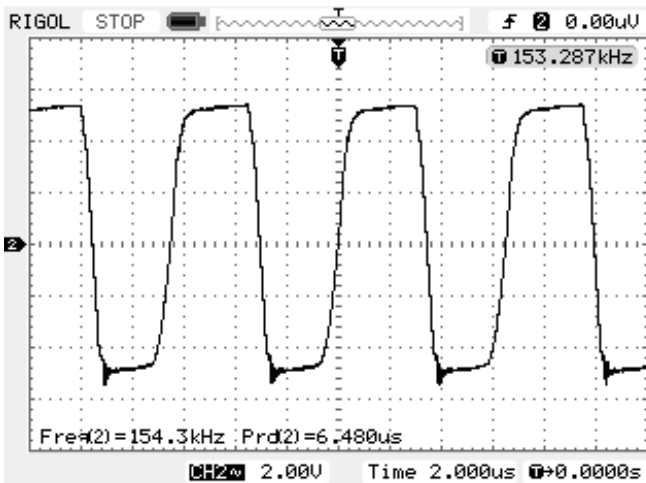
Фиг. 5. Времедиаграма на сигнала след ОУ1 - възел 2



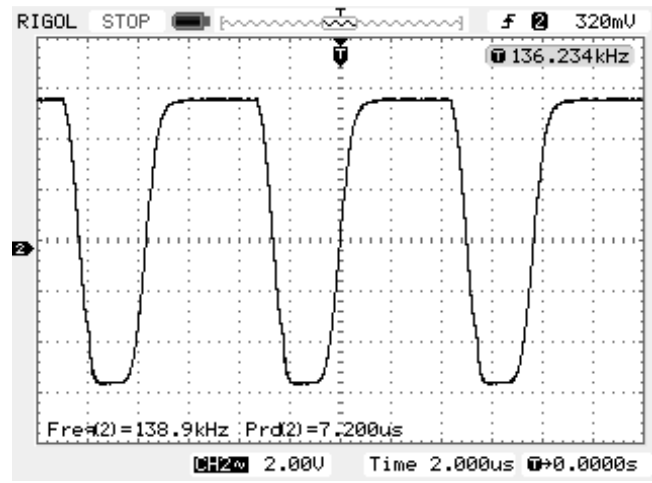
Фиг. 6. Времедиаграма на сигнала във възел 4



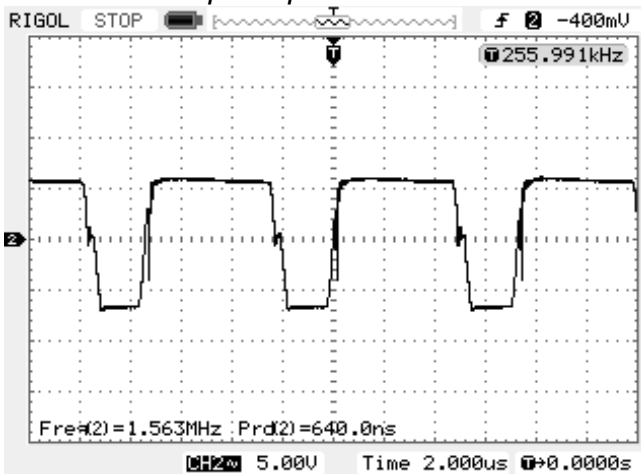
Фиг. 7. Времедиаграма на изхода на ОУЗ - възел 5



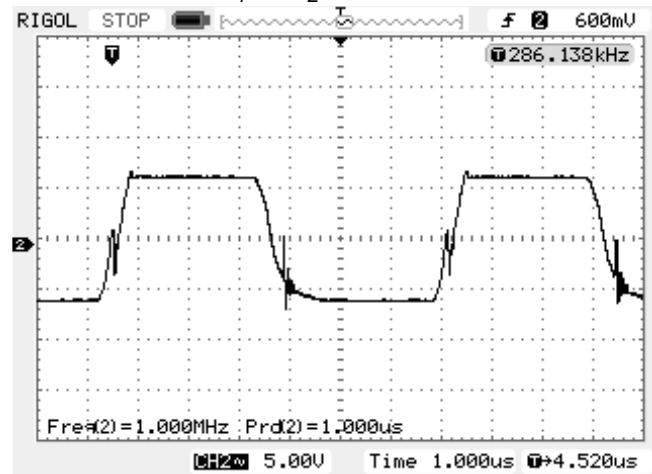
Фиг. 8. Времедиаграма на сигнала след компаратора ОУ4 - възел 7



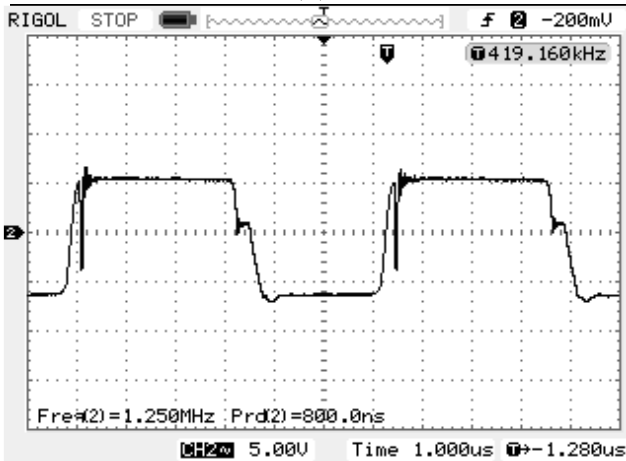
Фиг. 9. Времедиаграма на базите на Q₁ и Q₂ - възел 8



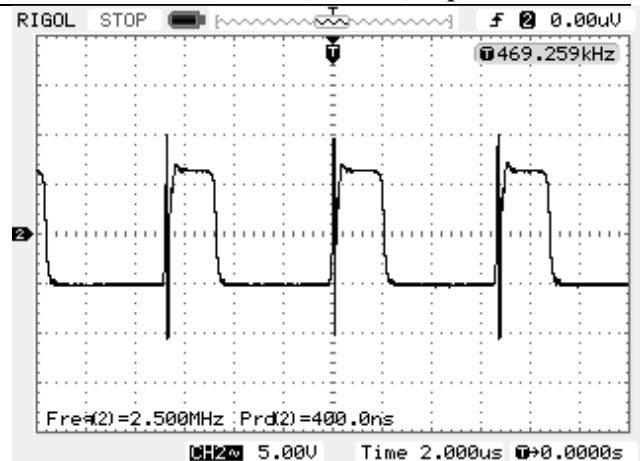
Фиг. 10. Времедиаграма на базите на Q₃ и Q₄ - възел 9



Фиг. 11. Времедиаграма на базите на Q₅ и Q₆ - възел 10



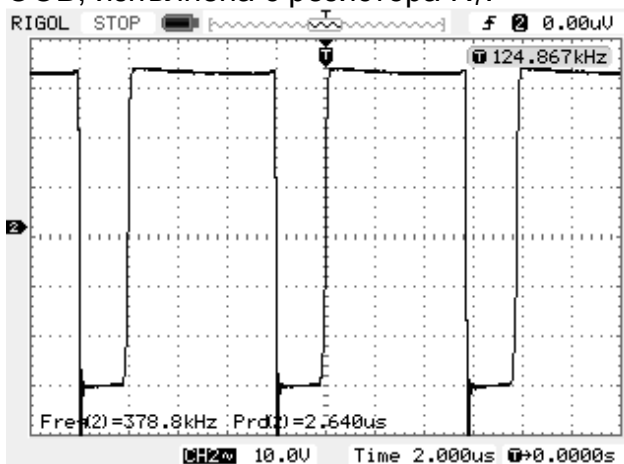
Фиг. 12. Времедиаграма на сигнала на гейта на Q7 - възел 11



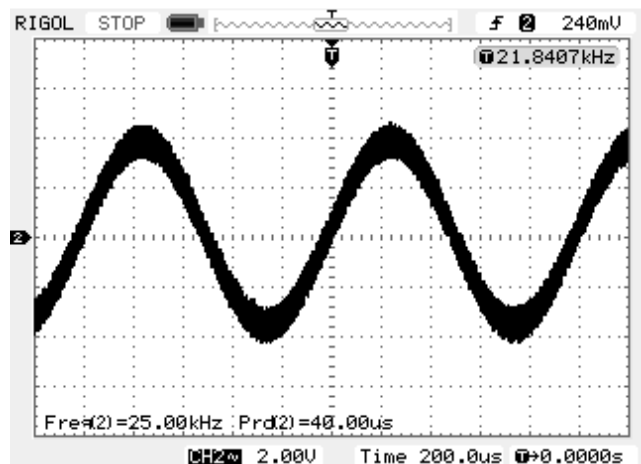
Фиг. 13. Времедиаграма на сигнала на гейта на Q8 - възел 12

На фиг. 4 и фиг. 5 са представени времедиаграмите на входния хармоничен сигнал, подаден от използвания функционален генератор MCP SG2110 DDS. Тъй като ОУ1 е повторител сигналите имат еднаква амплитуда.

На фиг. 6 е показан видът на сигнала във възел 4 - ОУ3 изпълнява функцията на суматор-интегратор, като на неговия неинвертиращ вход се подават двата сигнала: входният непрекъснат и високочестотният ШИМ от изхода чрез веригата на ООВ, изпълнена с резистора R₇.



Фиг. 14. Времедиаграма на сигнала преди НЧФ - възел 13



Фиг. 15. Времедиаграма на изхода на НЧФ и НЧУМ клас D - възел 15

На фиг. 7 е показана времедиаграмата на сигнала след суматор-интегратора (ОУ3, възел 5). Той е с триъгълнообразна форма и има работна честота по-голяма от 100 kHz. Правоъгълните импулси се формират на изхода на компаратора - ОУ4 и техният вид е показан на осцилограмата на фиг. 8. В следствие на наличието на резистора R₁₁ и ООВ, изпълнена с R₁₂, на фиг. 9 е показан видът на сигнала на базите на транзисторите Q1 и Q2, където коефициентът на запълване на импулсите е по-голям от 50 %.

От времедиаграмите във възли 9 и 10 (фиг. 10 и фиг. 11) се установява, че управляващите, а също така и изходните сигнали за двете двойки комплементарни транзистори имат различен коефициент на запълване - съответно по-голям и по-малък от 50 %.

От времедиаграмите на фиг. 12 и фиг. 13 се установява разликата в управляващите сигнали за крайните MOSFET транзистори. Те показват, че

транзисторът Q_7 е отпушен през по-голямата част от периода на ШИМ сигнал на изхода на НЧУМ клас D в сравнение с Q_8 .

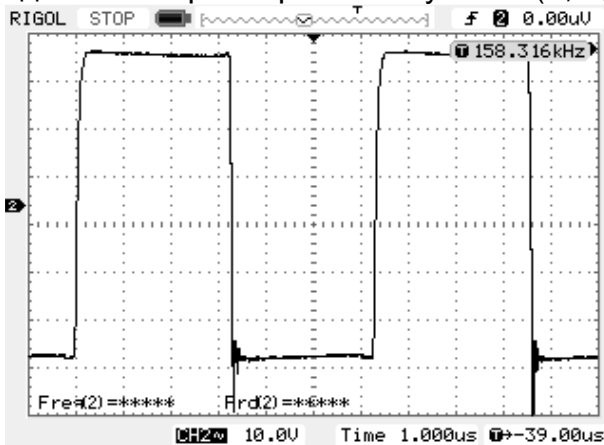
Изходният сигнал на НЧУМ клас D, който се явява и изходен на НЧФ, е представен на осцилограмата на фиг. 15. Той е със синусоидална форма, а също така се установява и наличието на високочестотни съставящи.

На фигури 16 ÷ 19 са представени времедиаграмите на изходния ШИМ сигнал във възел 13 на НЧУМ клас D при различна амплитуда на непрекъснатия входен сигнал и различна входна честота. С помощта на използвания цифров осцилоскоп RIGOL-DS1102E са измерени параметрите на импулсите, чиито стойности са представени в таблица 4. От нея се установява, че при различна амплитуда на входния сигнал стойностите на параметрите на ШИМ сигнали (импулсите във възел 13) са различни, както е и различна и „високата” работна честота. За втората стойност на входното напрежение $U_{i2} = 0,3 \text{ V}$ при $f = 1 \text{ kHz}$ параметрите на импулсите:

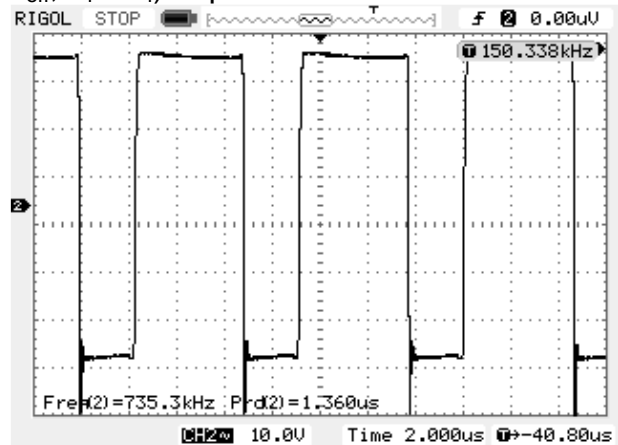
- T – период на импулса;
- T_{on} – време на нарастване на импулса;
- T_{off} – време на спад на импулса;
- T_r – продължителност (време) на обратния отскок на импулса;
- δ_f – отскок на задния фронт на импулса

приемат най-големи стойности.

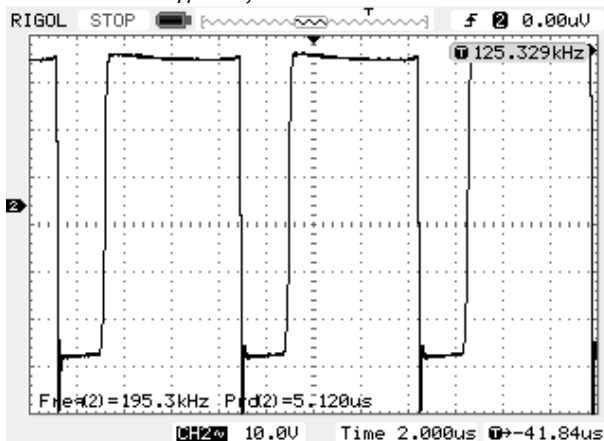
При по-малка честота на входния сигнал $f_2 = 100 \text{ Hz}$ при едно и също напрежение работната честота на ШИМ сигнали намалява, а стойностите на отделните параметри на импулсите (T , T_{on} , T_{off} , T_r и δ_f) нарастват.



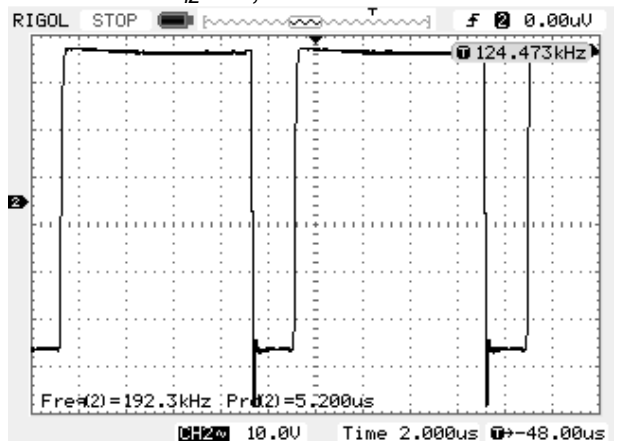
Фиг. 16. Времедиаграма на дрейновете на Q_7 и Q_8 - възел 13 за $U_{i1} = 0,1 \text{ V}$ и $f = 1 \text{ kHz}$



Фиг. 17. Времедиаграма на дрейновете на Q_7 и Q_8 - възел 13 за $U_{i2} = 0,3 \text{ V}$ и $f = 1 \text{ kHz}$



Фиг. 18. Времедиаграма на дрейновете на Q_7 и Q_8 - възел 13 за $U_{i1} = 0,1 \text{ V}$ и $f = 1 \text{ kHz}$



Фиг. 19. Времедиаграма на дрейновете на Q_7 и Q_8 - възел 13 за $U_{i2} = 0,3 \text{ V}$ и $f = 1 \text{ kHz}$

$$U_{i3} = 0,6 \text{ V u } f = 1 \text{ kHz}$$

$$U_{i3} = 0,6 \text{ V u } f = 100 \text{ Hz}$$

Таблица 4. Измерени параметри на изходния ШИМ сигнал на дрейновете на крайните MOSFET транзистори - възел 13

		U_{i1}	U_{i2}	U_{i3}
			0,1 V	0,3 V
$f_1 = 1 \text{ kHz}$	T	3,32 μs	5,24 μs	2,4 μs
	T_{on}	160 ns	400 ns	272 ns
	T_{off}	320 ns	336 ns	264 ns
	T_r	40 ns	232 ns	128 ns
	δ_f	12,8 %	12,4 %	9,6 %

		U_{i1}
$f_2 = 100 \text{ Hz}$	T	3,18 μs
	T_{on}	320 ns
	T_{off}	304 ns
	T_r	208 ns
	δ_f	12,8 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Експерименталните изследвания на реализирания НЧУМ клас D с операционни усилватели и транзистори представят неговите качествени показатели и характеристики, както и онагледяват вида на сигналите в отделните възли на схемата. От тях може да се получи информация за причините, пораждащи съпътстващите НЧУМ клас D недостатъци, да бъде извършено усъвършенстване на използваната технология и те максимално да бъдат сведени до минимум.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Неделчев, И. Мощен радиочестотен усилвател клас DE. Международна научна конференция, UNITECH'2014 Gabrovo, стр. II-64 – II-69, 21-22 Ноември 2014.
 [2] 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 Карапенов, Катедра „Комуникационна техника и технологии“, Технически университет - Габрово, тел.: 066/827-415, e-mail: bkarapenev@tugab.bg
 инж. Александър Цеков, студент ОКС „Магистър“, специалност „Комуникационна техника и технологии“, Технически университет – Габрово, e-mail: alextsekov91@gmail.com