

УСИЛВАТЕЛИ КЛАС D

Емил Йончев

e_iontchev@yahoo.com

*Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, катедра “СОТС”
ул. “Гео Милев” 158, София 1574
БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** усилвател клас D, широчинно импулсна модулация, сигма делта модулация, мостово свързан товар*

***Резюме:** В доклада са разгледани основните принципи и схемни решения използвани при конструирането на усилватели клас D. Дадени са зависимости използвани при тяхното оразмеряване. На тази база са реализирани симулационни модели на основни модули от тяхната конструкция, които може да бъдат използвани при обучението на студенти.*

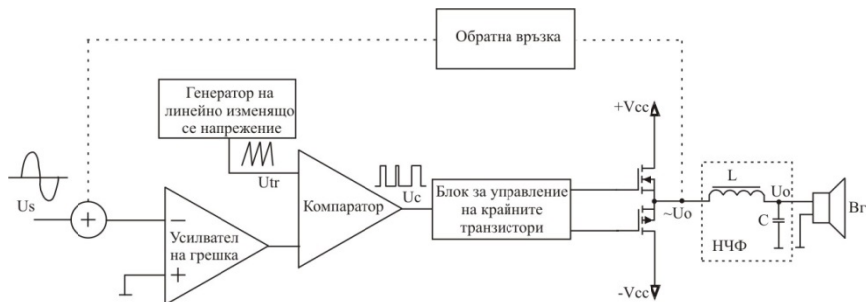
ВЪВЕДЕНИЕ

В днешни дни много от източниците на звук са цифрови: CD, DVD, цифрово радиоразпръскване, цифрова мрежа с интегрирани услуги (ISDN) и други устройства включени към информационната магистрала [1]. Но все още отделни компоненти от в тракта за обработка на сигнала не са цифрови, като например: микрофона, усилвателя и високоговорителите. В същото време някои фирми предлагат интегрални схеми на усилватели с определението, цифрови усилватели [2]. Това всъщност са усилватели клас D, на входа, на които има преобразувател на импулсно кодовата модулация в необходимата, широчинно импулсна модулация. Поради факта, че елементите в схемата на усилвателите от този клас работят в ключов режим отделената загубна мощност е малка, което води до по-малки размери на радиаторите и съответно по-малка маса. Работата им на високи честоти води след себе си до по-малки размери на използваните елементи. Това налага принципите и основните схемни решения на усилвателите клас D да бъдат изучавани подробно в курсовете и прилагани в бъдещи разработки.

2. СТРУКТУРА НА УСИЛВАТЕЛИ КЛАС D

2.1. Блокова схема на усилвател клас D

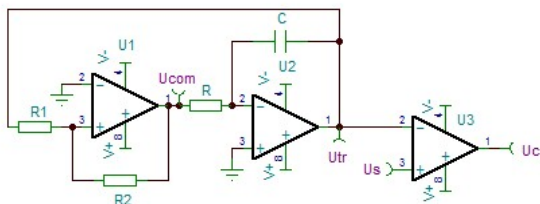
Блоковата схема на усилвател клас D е показана на фигура 1. Основните му компоненти са: широчинно импулсен модулатор (ШИМ), блок за управление на изходното стъпало, крайни транзистори, нискочестотен филтър и звукоизлъчвател. За стабилизиране параметрите на усилвателя към основната схема се добавят и елементите на обратната връзка.



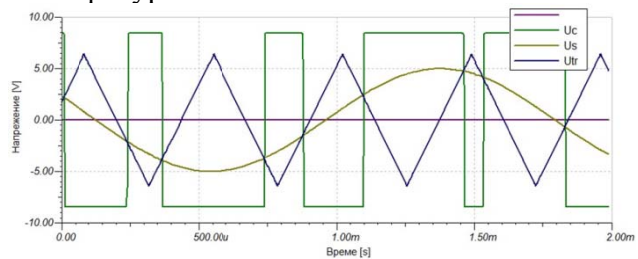
Фиг. 1. Блокова схема на усилвател клас D

2.2.Широчинно импулсен модулатор

За да работи изходното стъпало в ключов режим е необходимо аналоговия сигнал U_s да се преобразува в сигнал с две стойности, съответстващи на включено и изключено състояниена транзисторите. Това се извършва от широчинно импулсния модулатор, който се състои от генератор на линейно изменящо се напрежение и компаратор, в който напрежението на генератора се сравнява със звуковия сигнал. Принципна схема на ШИМ е показана на фигура 2.



Фиг. 2. Принципна схема на ШИМ



Фиг. 3. Форма на напреженията в различни точки

Схемата на генератора на линейно изменящо се напрежение се състои от два основни блока: регенеративен компаратор реализиран с операционния усилвател (ОУ) U_1 и интегратор реализиран с ОУ U_2 обхванати с обратна връзка. На изхода на компаратора U_1 се генерират правоъгълни импулси с амплитуда равна на максималното му положително и отрицателно изходно напрежение U_{com} . Праговете напрежения, при които става превключване на компаратора се определят с изрази (1) и (2):

$$(1) U_{thr_high} = \frac{R_1}{R_2} U_{com}^+$$

$$(2) U_{thr_low} = \frac{R_1}{R_2} U_{com}^-$$

За време $T/2$ изходното напрежение на интегратора се изменя от U_{thr_low} до U_{thr_high} , със скорост определена от параметрите на интегратора, R и C и напрежението на изхода на компаратора (3):

$$(3) U_{thr_high} - U_{thr_low} = -\frac{1}{RC} \int_0^{T/2} (U_{com}^-) dt = \frac{U_{com}^- T}{2RC}$$

За следващият полупериод напрежението се изменя от U_{thr_high} до U_{thr_low} и се изменя по същия закон. Като се заместят стойностите на U_{thr_low} и U_{thr_high} , в израз (3), с изрази (1) и (2) се получава изрза (4) за определяне на честотата на генерираните сигнали:

$$(4) f_{tr} = \frac{R_2}{4RCR_1}$$

Сигналът със звукова честота се сравнява с получения U_{tr} в компаратора U_3 , на изхода, на който се получава широчинно модулиран сигнал U_c . Когато моментната стойност на U_s е с амплитуда по-голяма от U_{tr} , на изхода на компаратора U_c , напрежението е с максималната положителна стойност. Обратно когато U_s е с по-малка амплитуда от U_{tr} , на изхода на компаратора U_c , напрежението е с максималната

отрицателна стойност. Това е показано на фигура 3. Напрежението U_c управлява крайните транзистори през блока за управление. Така когато $U_s > 0$, коефициента на запълване се променя, така че потенциалът в точка $\sim U_o$ е по-дълго време положителен и обратното когато $U_s < 0$ потенциалът в точка $\sim U_o$ е по-дълго време отрицателен.

Коефициентът на усилване на усилвателя се определя с израза (5):

$$(5) k = \frac{\langle \sim U_o \rangle}{U_s} = \frac{U_c}{U_{tr}}$$

Където $\langle \sim U_o \rangle$ е средната стойност на $\sim U_o$ определена с израза (6):

$$(6) \langle \sim U_o \rangle = U_c^+ D + U_c^- (1 - D), \text{ където } D = \frac{T_{on}}{T} \text{ е коефициент на запълване}$$

Когато сигнала U_s нараства, линейно нараства и $\langle \sim U_o \rangle$, до достигане на U_c , което се случва когато $U_c = U_{tr}$.

2.3. Ниско честотен филтър

За възстановяване на усиленият аналогов сигнал се използва нискочестотен филтър (НЧФ), обикновено от втори ред, реализиран с LC елементи. Неговата предавателна характеристика се описва с израза (7)[3]:

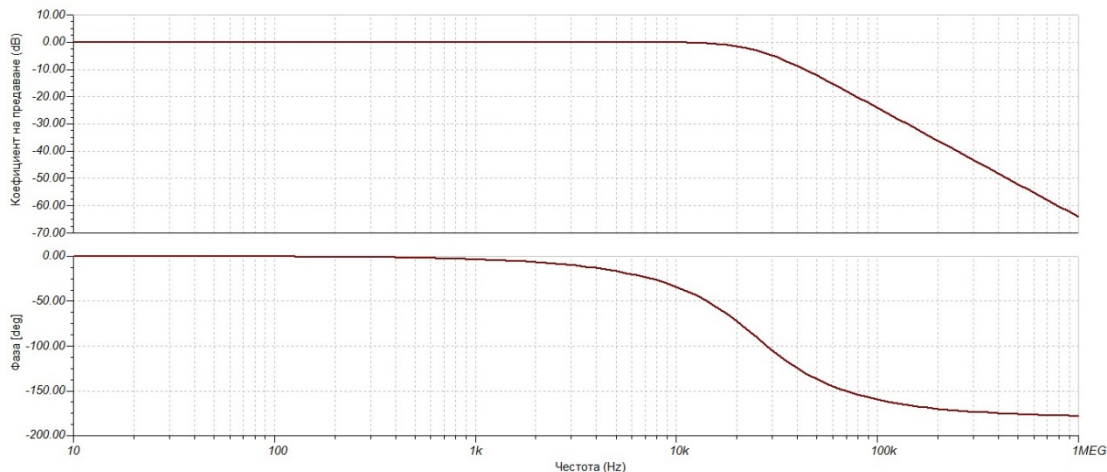
$$(7) \frac{U_o}{\sim U_o} = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$$

Влияние върху честотните характеристики оказва и стойността на активното съпротивление на високоговорителя. За определяне стойностите на L и C се използват зависимостите (8) и (9):

$$(8) C = \frac{1}{2\pi R_{вг} f_c \sqrt{2}}$$

$$(9) L = \frac{R_{вг} \sqrt{2}}{2\pi f_c}$$

Честотните характеристики на LC филтър с товар, високоговорител със активно съпротивление 4Ω , честота на среза 25kHz и стойности на L и C, изчислени с изрази (8) и (9) са показани на фигура 4.

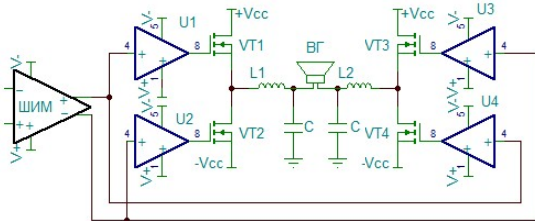


Фиг. 4. Честотни характеристики на LC филтъра

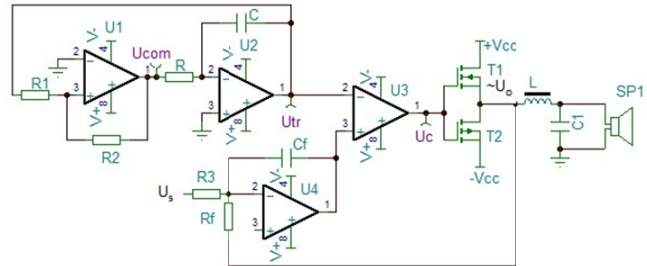
При необходимост от по-голяма стръмност на амплитудно честотната характеристика в преходната област, се използват филтри от по-висок ред. Честотата на триъгълното напрежение трябва да бъде много по-висока от честотата на звуковия сигнал и честотата на среза на НЧФ. Тя трябва да е минимум поне два пъти по-висока от най-високата честота на звуковия сигнал, но на практика, за по-малко изкривявания се избира да е 5-50 пъти по-висока[4].

2.4.Топология на крайното стъпало

Крайните транзистори съответно с n и p канал от фигура 1, са включени в полумостова схема и са захранени от двуполярен източник. Поради различните честотни характеристики на транзисторите с n и p канал, подборането на двойка транзистори е трудно. Този недостатък се избягва при свързването на транзисторите в мостова схема, фигура 5, където са използвани транзистори само от един вид - с n канал. При мостовата схема не е необходимо захранването да бъде двуполярно.



Фиг. 5. Мостова схема на включване на крайните транзистори



Фиг. 6. Усилвател клас D с обратна връзка

2.5.Обратна връзка

За стабилизиране работата на усилвателя обикновено се реализира обратна връзка. Част от сигнала, взет преди НЧФ, се сумира със звуковия сигнал. Вземането на сигнал след НЧФ е нежелателно заради фазовата разлика, която филтъра внася и която разлика се променя, с промяна на честотата, фигура 4. Принципната схема на усилвател клас D с обратна връзка, реализирана с допълнителен операционен усилвател, работещ като интегратор, е показана на фигура 6. Предавателната функция за синусодален сигнал с честота много по-ниска от честотата на триъгълното напрежение се определя с израза (10):

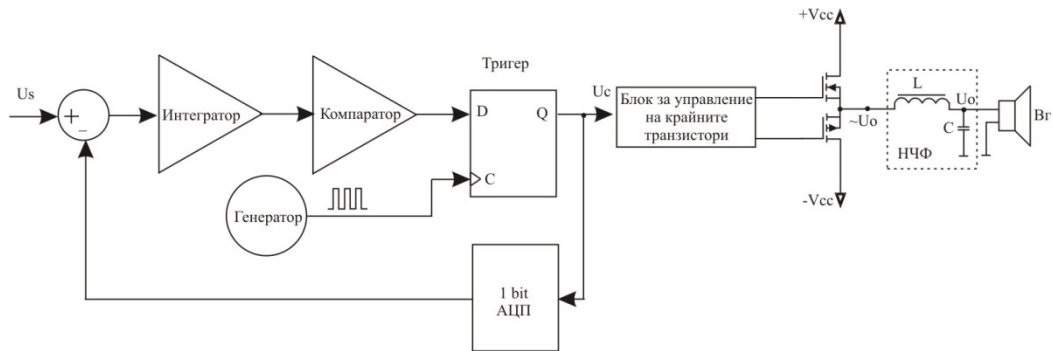
$$(10) \frac{\sim U_o}{U_s} = - \frac{R_f}{R_s} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0}} \text{ където } \omega_0 = \frac{k}{R_f C_f}$$

Честотата на среза на интегратора, трябва да бъде по-голяма от честотата на сигнала и по-ниска от честотата на триъгълното напрежение. С тази обратна връзка се стабилизира постоянно токовия режим на усилвателя.

3.НОВИ ПРИНЦИПНИ РЕШЕНИЯ

3.1.Сигма делта модулатор

Широчинно импулсната модулация има няколко недостатъка: на нея са й присъщи изкривявания на преобразувания сигнал; хармоничните сигнали на тактовата честота предизвикват електромагнитни смущаващи сигнали в радиочестотния спектър на къси, дълги и средни вълни; ширината на импулсите става много малка при пълна модулация, което причинява проблеми при превключването на крайните транзистори, това ограничава и достигането на максималната теоретична изходна мощност [5,6]. Алтернатива на ШИМ е честотно импулсната модулация (ЧИМ), при която броят на импулсите за даден времеви прозорец, е пропорционален на средната стойност на входния аналогов сигнал [6]. Еднобитовата сигма делта модулация е форма на ЧИМ. При нея енергията на електромагнитните излъчвания се разпределя върху широк честотен диапазон, което предизвиква по-малко смущения, в сравнение с ШИМ. Блоквата схема на такъв вид модулация е показана на фигура 7. И в този случай, както при ШИМ, честотата на дискретизация трябва да бъде в границите 5-50 пъти честотната лента на аналоговия сигнал.



Фиг. 7. Усилвател клас D със сигма дделта модулация

3.2. Усилватели без НЧФ

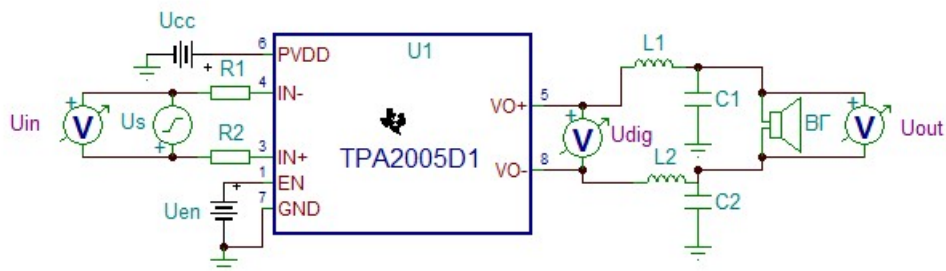
С цел намаляване на загубите в НЧФ, обема и масата на усилвателя, има схемни решения, при които липсва филтър. Неговата роля се изпълнява от високоговорителя. Това решение се прилага най-често при маломощни усилватели използвани в преносими устройства.

3.2. Преобразувател импулсно кодова модулация в широчинно импулсна модулация

Когато към структурата на усилвател клас D се добави модулза преобразуване на импулсно кодова модулация в широчинно импулсна модулация, може да се реализира звуков усилвател, който директно да се свързва с цифрови източници на звукова информация [7]. На пазара се предлагат такива усилватели в интегрално изпълнение, с минимален брой външни елементи за включване [8].

4. СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ИНТЕГРАЛЕН УСИЛВАТЕЛ КЛАС D

Фирми производителки на интегрални схеми като: Philips, National semiconductor, Texas Instrument, Analog Devices, International Rectifier и други, предлагат готови схемни решения на усилватели клас D, което значително опростява конструирането на завършено устройство. Пример за такава интегрална схема е TPA2005D1, производство на фирма Texas Instrument [9].



Фиг. 8. Усилвател клас D с TPA2005D1

Тя е избрана за реализиране на симулационен модел, поради малкия брой външни елементи необходими за нейната работа и същевременно с възможност за работата както с филтър, така и без такъв. Симулационният модел е показан на фигура 8. С негова помощ може да се определя коефициента на усилване на усилвателя, с конкретен високоговорител, със или без филтър. Да се оразмерява филтъра и да се изследва неговото влияние върху амплитудата и фазата на сигнала върху високоговорителя, спрямо входния или дискретния сигнал на изходите на интегралната схема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усилвателите клас D работят в ключов режим в резултат, на което тяхната ефективност, теоретично може да достигне до 100%. Следователно те са блоковете, чрез които може да бъде повишена енергийната ефективност на електрическите и електронните устройства и системи, което е основна задача на всеки производител и държава. Възможността да се свързват директно към цифрови източници на звуков сигнал, съчетано с характеристики, които са съпоставими с тези на усилвателите клас А, предопределя тяхното широко разпространение в следващите години.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] BenDuncan, HighPerformanceAudioPowerAmplifiersformusicperformanceandreproduction, Newnes, 1997, ISBN 0 7506 2629 1
- [2] Purepath™ digital amplifiers, Texas Instruments, www.ti.com/audio
- [3] Design considerations for Class D audio power amplifiers, Advanced Analog Products Technical report, Texas Instruments, August, 1999, pp 10
- [4] Moreno Sanchez Sergio, Class D audio amplifiers: theory and design, Revision A, June 2005 pp 4
- [5] Pereira Nuno, NunoPaulino, Design and Implementation of Sigma Delta Modulators ($\Sigma\Delta M$) for Class D Audio Amplifiers Using Differential Pairs, Springer, 2015, ISBN 978-3-319-11637-2
- [6] Gaalaas Eric, Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How, Analog Dialogue 40-06, June (2006), <http://www.analog.com/analogdialogue>
- [7] Ahmad Faroze, G. Mohiuddin, Design and Implementation of PCM-to-PWM Data Converter, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 93 – No 10, May 2014
- [8] www.ti.com/lit/gpn/tas5015
- [9] www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa2005d1.pdf

CLASS D AUDIO AMPLIFIER

Emil Iontchev
e_iontchev@yahoo.com

Todor Kableshkov University of Transport
158, Geo Milev Str., 1574 Sofia,
BULGARIA

Key words: class D amplifiers, Pulse Width Modulation, Sigma Delta Modulator, bridge-tied load

Abstract: The report presents the main principles and circuit solutions used in the construction of amplifiers class D. There are also given dependencies used in their dimensioning. Based on this, are realized the simulation models on basic modules of their construction, which can be used in the education of students.